

Bilan sédimentaire et géochimique d'un barrage sans vidange:

le cas de la retenue de Wettingen

Stéphanie JUSTRICH¹, Lukas HUNZIGER², Walter WILDI³

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

Abstract

Sedimentary and geochemical balance of a dam without flushing: the case study of the Wettingen reservoir (Switzerland)

The Wettingen reservoir located on the Limmat river downstream of Zürich is exploited without flushing. Therefore it has been possible to reconstruct historic sedimentation rates since the construction of the dam in 1932, using regularly measured transverse depth profiles. Periodic sampling of suspensions and sediments in the inflowing and outflowing waters during a one year period allowed an attempt to quantify the sediment and geochemical balance. Grain size and concentration for 14 metals have been analysed for suspensions and sediments.

The actual sediment fill reaches almost half of the reservoir volume. The sediment record includes a contaminated layer dating from the fifties to the seventies. Actual sedimentation has a deposition rate of 50% by meanflow but reaches 90% by high flow events. Indeed, reservoir sedimentation is closely related to high flow events. The contribution of the effluents (rivers and sewage waters from two local facilities) reaches only one percent of the total contaminant flux by meanflow and becomes non important under high flow conditions. The dominant source of contamination lies upstream (city of Zürich). The Wettingen reservoir traps the main of this contamination and the environment risk involved is the uptake of contaminants from sediments by in-stream erosion.

Keywords: Reservoir; sedimentation; suspended sediments; contaminants; dam; flux; Limmat river.

Résumé

Le barrage de Wettingen, situé sur la Limmat en aval de la ville de Zürich, est un barrage sans vidange. L'histoire de la sédimentation de ce réservoir, depuis la mise en eau en 1932, a pu être établie à l'aide de profils transverses levés périodiquement pour le compte de l'Office fédéral de l'environnement. Un échantillonnage régulier sur une année des matières en suspension et des sédiments des principaux affluents (rivières et stations d'épuration locales), ainsi que de l'entrée et de l'exutoire du réservoir a permis d'établir le bilan sédimentaire et géochimique actuel du réservoir. La granulométrie et l'analyse de 14 métaux ont été réalisées pour l'ensemble des échantillons.

Aujourd'hui, 45% du volume total (et non du volume utile) du lac de barrage est comblé de sédiments, dont une couche datant des années 1958 à 1975, qui est fortement contaminée en métaux lourds. Les flux sédimentaires actuels sont caractérisés par un taux de déposition dans le réservoir de 50% par débit moyen, mais atteignant les 90% en cas de crue. La sédimentation du réservoir est très fortement liée à l'histoire des crues. L'apport des différents affluents ne représente qu'un pourcent de l'apport total en sédiments et en contaminants qui devient quasi insignifiant en période de crue de la Limmat. Le principal apport de polluants provient de l'amont du réservoir, probablement de la ville de Zurich.

La présence de sédiments contaminés soulève le problème de la remobilisation des polluants par érosion.

Mots clefs: Réservoir; sédimentation; MES; polluants; barrage; flux; Limmat.

Abréviations:

CIPR = Commission Internationale pour la Protection du Rhin – EWZ = Elektrizitätswerk der Stadt Zürich – MES = matière en suspension – STEP = station d'épuration

¹ Institut F.-A. Forel, rte de Suisse 10, case postale 416, CH-1290 Versoix – stephanie.justrich@terre.unige.ch

² SA+H, Schälchli, Abegg + Hunzinger, Schwartztorstrasse 7, CH-3007 Bern

³ Institut F.-A. Forel, Rte de Suisse 10, case postale 416, CH-1290 Versoix

Introduction

Alors que la pratique des vidanges triennales du barrage de Verbois (Genève, Suisse) est aujourd'hui discutée, voici l'exemple d'un barrage n'ayant subi aucune vidange depuis sa mise en eau: le barrage de Wettingen situé dans le canton d'Argovie et dont la concession s'étend sur le canton de Zurich. Le réservoir est considéré comme un bassin sédimentaire dans lequel s'accumulent les matières en suspension de toute sorte y compris des polluants.

L'étude du bilan sédimentaire et géochimique de cette retenue s'inscrit dans un programme de surveillance établi suite à l'étude d'impact réalisée pour le compte de l'EWZ (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich) (Institut Forel 1998) dans le cadre du renouvellement de la concession et d'une réflexion des installations du barrage de Wettingen. En effet, une couche de sédiments fortement contaminés, datant des années 1950 à 1975 environ, a été observée à faible profondeur sous les sédiments actuels et a fait l'objet d'une analyse de risque. La retenue de Wettingen doit être considérée, au sens de l'Ordonnance sur l'assainissement des sites pollués (OSites 1998), comme un site contaminé qui doit

faire l'objet d'une surveillance. Cependant, ni les eaux de la Limmat, ni les eaux souterraines ne sont directement menacées dans le sens de l'ordonnance, ceci grâce à une forte dilution naturelle des concentrations de polluants. De ce fait, le site n'est pas l'objet d'un assainissement (Forel & SA+H 2004). Les sédiments de la retenue de Wettingen montrent une contamination métallique élevée comparée à d'autres réservoirs, notamment ceux de Klingnau, Mühleberg et Verbois (Wildi et al. 2004). La problématique est observée ici d'un point de vue sédimentaire et géochimique.

Contexte géographique et sédimentaire

Le barrage de Wettingen, mis en eau en 1932, se situe dans un contexte similaire à celui de Verbois (situé en aval de Genève sur le Rhône). Il est localisé en aval de la ville de Zurich et de son lac, dont l'exutoire (la Limmat) alimente le barrage en eau et, de manière restreinte, en matières en suspension. La Limmat a un débit moyen de 96.4 m³/s (OFEV) et des eaux très peu chargées en sédiments (<3 mg/l) à l'exutoire du lac de Zurich. Le principal apport sédimentaire du réservoir se fait par le biais de la Sihl, une rivière alpine

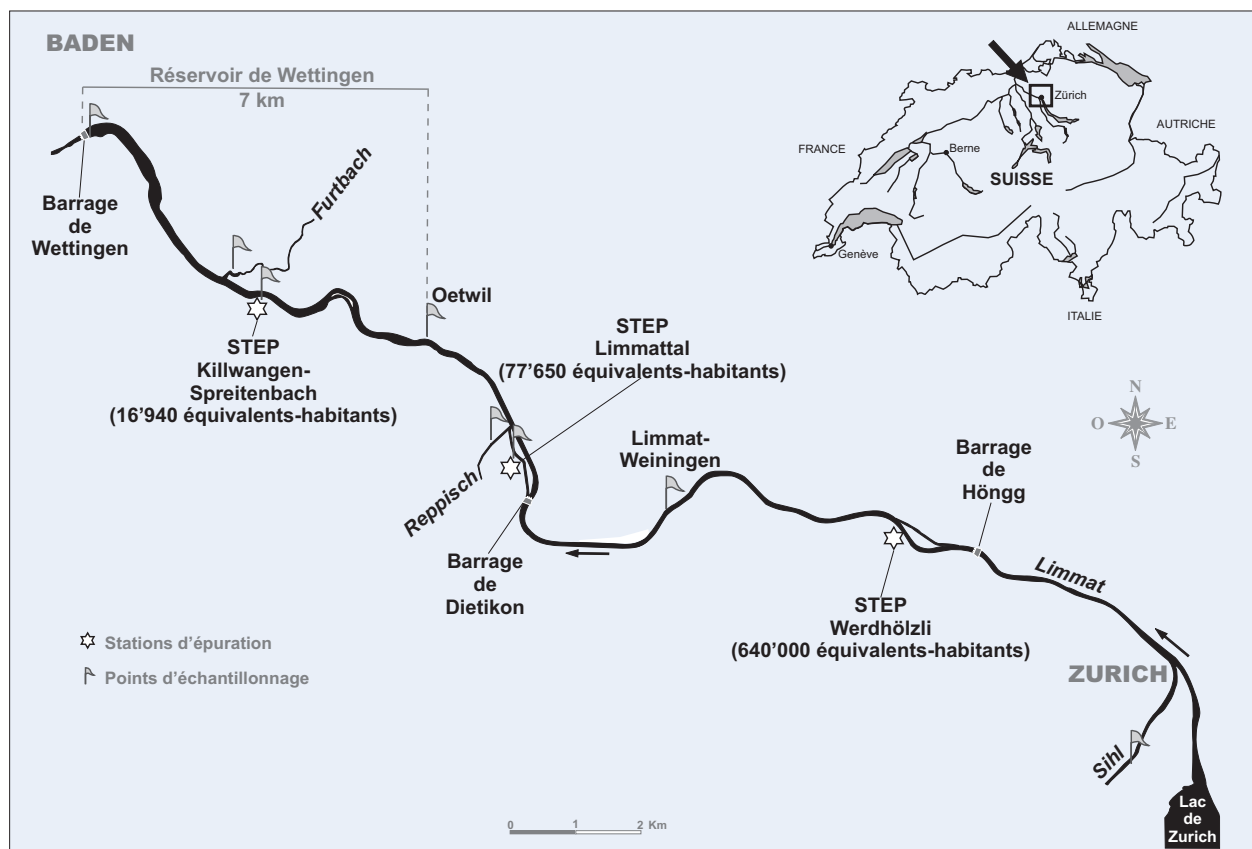


Fig. 1: Situation des différents affluents et des stations d'épuration rejetant leurs effluents dans le réservoir de Wettingen. Localisation des sites d'échantillonnage.

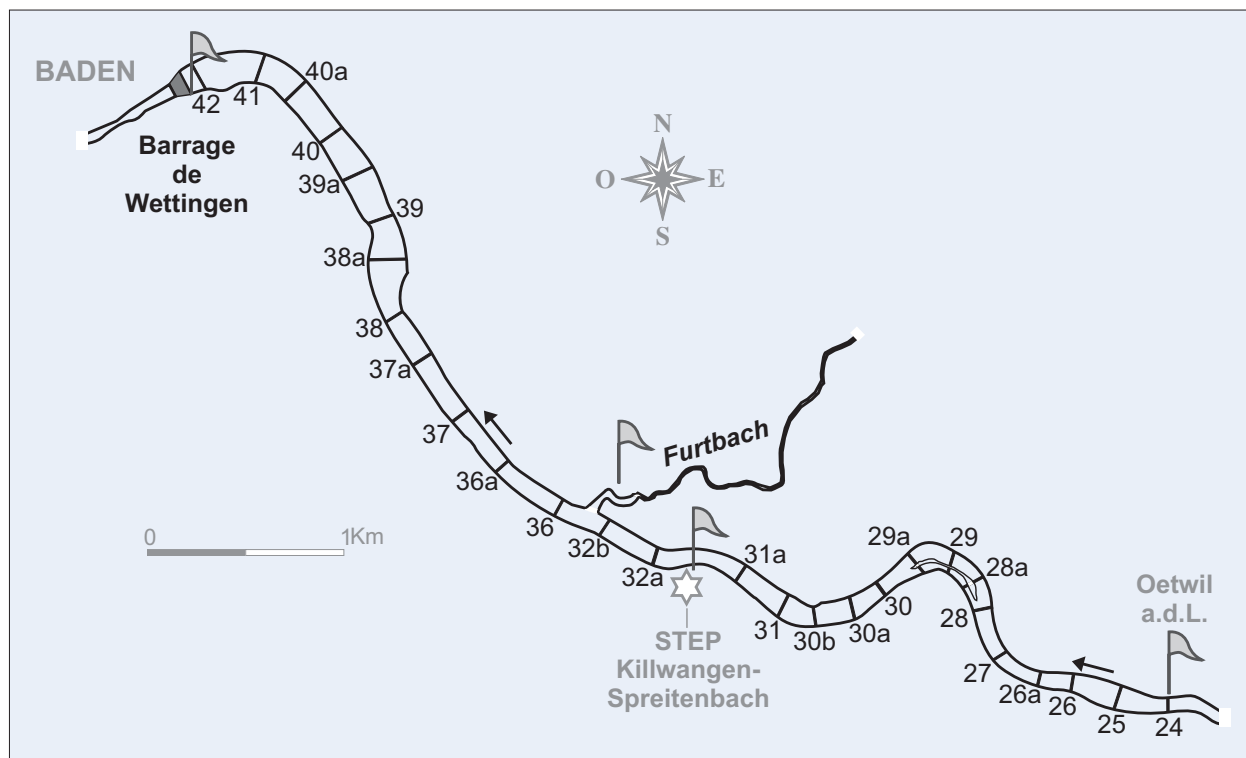


Fig. 2: Localisation des 28 profils transverses le long du réservoir.

chargée en suspensions (environ 8 mg/l) et d'un débit moyen de 7.3 m³/s (OFEV), qui se jette dans la Limmat au niveau de la ville de Zurich. Deux autres affluents de moindre importance se jettent directement dans le réservoir, la Reppisch et le Furtbach (Fig. 1).

Le réservoir de Wettingen reçoit les eaux épurées de trois stations d'épuration situées en amont du barrage, à savoir la STEP de la ville de Zürich (Werdhölzli), celle de Dietikon (Limmattal) et enfin celle de Killwangen-Spreitenbach, dont les rejets aboutissent directement dans le lac de barrage.

Matériel et méthodes

Une série de 28 profils transverses de la retenue (Fig. 2) réalisés pour le compte de l'Office fédéral de l'environnement ont été mesurés régulièrement depuis la construction du barrage en 1932 et utilisés afin de suivre l'évolution de la sédimentation dans le réservoir (Institut Forel 1998). Les profils ont été relevés en 1932, 1958, 1963, 1975, 1988, 1991, ainsi qu'en 2003 et 2005, où les profils ont été mesurés par bathymétrie à l'aide d'un échosondeur travaillant à 200 kHz.

Des profils longitudinaux ont été extrapolés à partir des profils transverses (Forel & SA+H 2004).

Le bilan sédimentaire historique de la retenue de Wettingen a été établi à partir des profils transverses. Les profils 24 à 42 ont été mesurés de manière discontinue entre 1932 et 2003 (tous les profils n'ont pas été mesurés à chaque fois), cependant la plupart des profils ont été mesurés lors des relevés effectués en 1932, 1958, 1975, 1988 et 2003. Quatre périodes de déposition ont été déterminées à partir de ces dates. Les volumes pour chaque période ont été mesurés à partir des profils originaux (échelle 1:100). Le volume de sédiment humide a d'abord été calculé pour chaque section de la rivière, puis multiplié par l'épaisseur moyenne. La rivière a été découpée en tronçons de largeur constante (valeur extrapolée à partir du profil mesuré) commençant à mi-distance du profil précédent jusqu'à mi-distance du profil suivant. De cette manière, l'ensemble du réservoir a été pris en compte, donnant un volume de sédiment déposé pour une période donnée.

Concernant l'étude des sédiments se déposant ou transitant actuellement par le réservoir, deux types d'échantillons ont été analysés: les matières en suspension, prélevées par un système de centrifugation à flux continu de l'eau (Burrus et al. 1989; Ongley et Thomas 1989) et les sédiments piégés par des trappes sédimentaires disposées sur le fond de la retenue et des rivières affluentes.

Tableau 1: périodes et type de campagne d'échantillonnage.

Campagnes	Dates	Echantillonnage
1	30 mai-3 juin 2005	6 points
2	8-12 août 2005	6 points
-	23 août 2005	Spécial : crue
3	18-23 septembre 2005	6 points + 2 points de références
4	21-25 novembre 2005	6 points
5	16-20 janvier 2006	6 points
6	25-30 avril 2006	6 points + 2 points de référence

Les points d'échantillonnage (Fig. 1), prélevés tous les deux mois sur une période d'un an, de mai 2005 à avril 2006 (Tableau 1), sont situés à l'entrée (Oetwil) et à la sortie du réservoir (barrage de Wettingen), à la hauteur de deux petites stations d'épuration (Killwangen-Spreitenbach et Limmattal) et à l'embouchure des deux affluents (Furtbach et Reppisch) qui se jettent dans le réservoir. De plus, deux points d'échantillonnage supplémentaires, servant de référence quant à la qualité sédimentaire (Sihl) et géochimique (Limmat-Weiningen) de l'eau et des suspensions avant leur arrivée dans la zone de barrage ont été déterminés. Ces échantillons ont été prélevés une fois par débit moyen et une fois par débit fort (en septembre 2005 et en avril 2006 respectivement).

Des analyses de concentrations ont été effectuées sur l'ensemble des suspensions et des sédiments prélevés pour 14 métaux (Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, V, Zn) après attaque à l'acide HNO₃-2M (méthode OSol, 1998) et détermination à l'ICP-MS. L'analyse granulométrique a été effectuée à l'aide d'un diffractomètre laser de type Coulter LS-100 (Loizeau *et al.* 1994).

Résultats

Histoire sédimentaire de la retenue de Wettingen 1932-2003

Parmi les 28 profils transverses mesurés depuis la construction du barrage, les profils 39a et 42 présentés ici (Fig. 3) révèlent les caractéris-

tiques morphologiques du bassin de Wettingen. Les sédiments fluviaux déposés entre 1932 et 1958 forment la couche la plus ancienne du bassin. Au-dessus, une couche de sédiments fortement contaminés par des métaux traces et datant des années 1958 à 1975 a été mise en évidence (Institut Forel 1998). La couche la plus récente, déposée entre 1975 et 2003 présente des concentrations métalliques plus faibles.

Le profil 39a (Fig. 3a) est une section de la rivière mesurant environ 170 mètres et située dans la partie proximale du barrage. Le chenal principal, d'abord assez étroit et caractérisé par une forme en «U» jusqu'en 1958, s'élargit et s'aplanit jusqu'à ne présenter plus qu'une dépression profonde de 2 à 3 mètres en 2003. L'accumulation de sédiments en rive gauche (0 à 90 m) forme une barre de pointe. On peut observer sur la rive gauche la couche contaminée à l'affleurement. Bien que située près d'une zone d'accumulation, celle-ci pourrait être érodée lors de l'effondrement de la berge en cas de forte crue par exemple et remettre en suspension des sédiments fortement contaminés déposés entre 1958 et 1975.

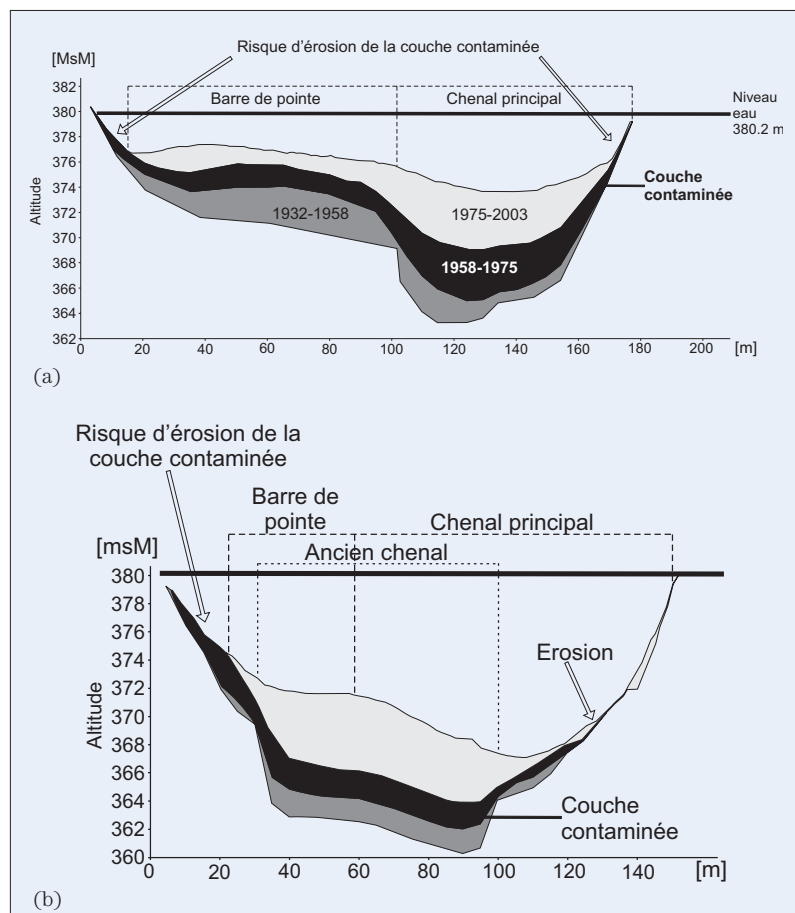


Fig. 3: Profils transverses du réservoir, a: profil 39a; b: profil 42 (exagération verticale de 4x). Localisation des profils en figure 2.

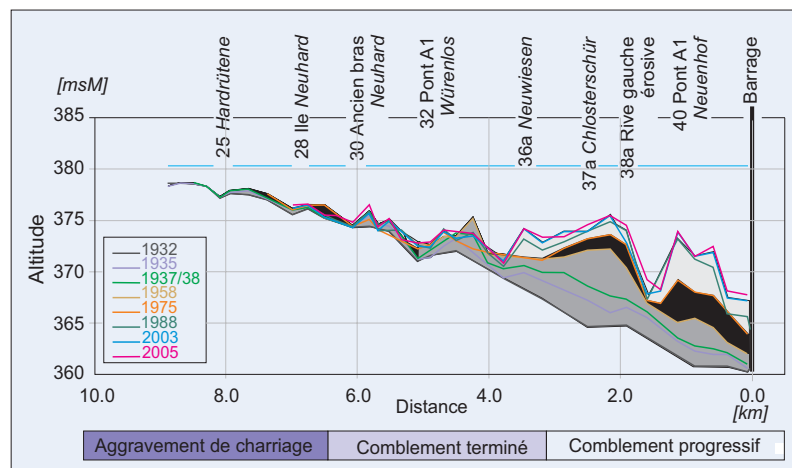
Fig. 4: Evolution du niveau de fond du chenal principal: profils longitudinaux. Exagération verticale de 150x. D'après Hunzinger (Institut Forel et SA+H 2004).

Le profil 42 (Fig. 3b) est situé à 200 mètres du barrage et mesure environ 140 mètres d'une rive à l'autre. On observe une migration du chenal en direction de la rive droite de 30 à 40 mètres environ, à partir de 1975. La couche sédimentaire la plus récente commence à former une barre de pointe jusqu'à 65 mètres de la rive gauche.

On observe une transition du profil 39a au profil 42 avec le rétrécissement de la rivière à l'approche du barrage et un surcreusement du chenal principal, passant de 6 à 12 mètres de profondeur au point le plus bas.

Des profils longitudinaux de la retenue (Forel & SA+H 2004) permettent de distinguer trois zones différentes de l'amont à l'aval, caractérisées par un régime fluvial et sédimentaire particulier (Fig. 4). La partie amont du réservoir, allant de l'entrée du réservoir (Oetwil, km 8) jusqu'au kilomètre 6 environ, subit un dépôt de gravier qui provient de la charge de fond passant le barrage de Dietikon en amont. Dans cette zone, le profil du chenal est à l'équilibre. La zone centrale du réservoir, allant jusqu'au kilomètre 4 environ, dépend du régime hydrique, il peut y avoir soit sédimentation, soit érosion. Enfin, la partie proximale du barrage est une zone dominée par le dépôt de sédiments fins.

Les volumes sédimentaires calculés à partir des profils transverses indiquent que le taux de sédimentation est passé d'environ 38 000 m³/an à 18 000 m³/an en fonction du comblement du réservoir, de 1932 à 2003 (Fig. 5). Cependant, la période de 1975 à 1988 montre une anomalie du taux de sédimentation, puisque le volume déposé correspond à environ 50 000 m³/an. Pour cette période, une éventuelle source sédimentaire extraordinaire dans le bassin versant de la Limmat est exclue puisque le lac de Zurich agit comme un piège à sédiments et laisse ressortir des eaux très faiblement chargées à son exutoire. Cet accroissement ponctuel pourrait être dû à la vidange d'un barrage situé dans le bassin versant de la Sihl comprenant 2 ouvrages (Sihlsee et Sihl-Höfe) situés dans le canton de Schwytz dans la partie amont du bassin versant de la rivière ou alors d'un des deux ouvrages situés sur la Limmat en amont du réservoir (barrage de Hönegg et de Dietikon, cf Fig. 1). Un historique complet de ces ouvrages pourrait faire la lu-



mière sur ce taux de sédimentation anormalement élevé. D'autre part, une étude détaillée de l'évolution hydrologique de la Sihl entre 1932 et 2003 n'a pas permis de mettre en évidence un événement exceptionnel pour la période 1975-88. Avec un comblement d'un volume total de 2.4 millions de m³, 45% du volume initial du bassin était donc comblé en 2003. Le volume de la couche de sédiments contaminés déposés entre 1958 et 1975 est estimé à 560 000 m³, ce qui correspond à plus de 20% du volume de comblement.

■ Sédimentation actuelle (année 2005): flux sédimentaires et de substances

Granulométrie

Les matières en suspension récoltées au cours de l'année 2005 (moyenne des campagnes 1 à 4, cf. Tableau 1) sont des silts sableux d'une granulométrie moyenne de 24 microns et contenant des argiles (Fig. 6a). Les sédiments des trappes sont des sables silteux avec une granulométrie moyenne de 78 microns (Fig. 6b). Les échantillons de matière en suspension

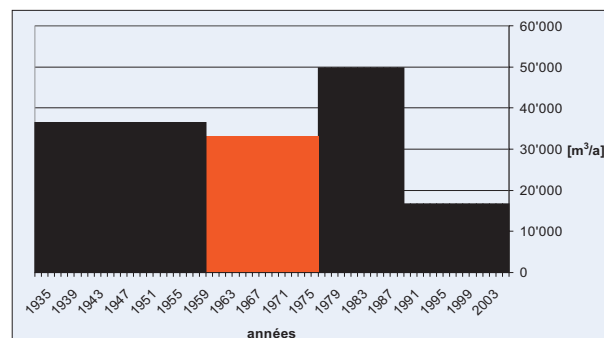


Fig. 5: Evolution du bilan sédimentaire du réservoir de Wettingen: volume de sédiments humide (en m³) déposés par année; volume de sédiments contaminés en rouge.

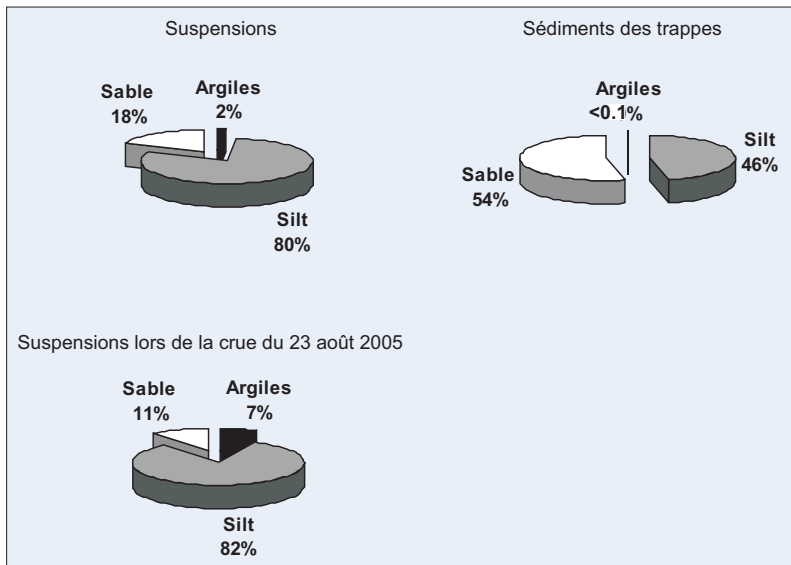


Fig. 6: Répartition granulométrique moyenne des campagnes d'échantillonnage 1-4 (a et b); comparaison avec les suspensions de la crue du mois d'août 2005 (c).

récoltés lors de la crue du mois d'août 2005 (Fig. 6c) révèlent une teneur en argiles d'environ 7%, ce sont des silts dont la taille moyenne est de 14 microns. Les valeurs de granulométrie par site sont données dans la figure 7.

De manière générale, la granulométrie diminue d'amont en aval, le long du bassin du lac de barrage. Il y a d'abord sédimentation des graviers, puis des sables, des silts et des argiles. On observe notamment cette tendance pour les suspensions prélevées à l'entrée (Oetwil) et à proximité du barrage (Wettingen) (Fig. 7a), ainsi que pour l'ensemble des échantillons de sédiments (Fig. 7b), avec une diminution de la proportion de sable en direction du barrage. Cette tendance, déjà relevée par plusieurs auteurs (Perroud 2000, Remini 2001) est due à la dynamique sédimentaire. Les particules fines nécessitent un milieu de faible énergie pour se déposer, relativement à la loi de Stokes (Allen 1985). Ces conditions sont atteintes dans les zones de formation de barres de pointes, tout au long du bassin, ainsi qu'à proximité du barrage où l'on met en évidence une zone de transition entre le milieu fluvial et un milieu lacustre artificiel de plus basse énergie.

Flux sédimentaires

Le débit de la Limmat étant environ 100 fois plus élevé que celui de ses affluents en période de débit moyen, les flux sédimentaires peuvent être répartis en flux principal, pour les échantillons prélevés dans la Limmat, et en flux secondaire pour les échantillons des quatre affluents du réservoir. Lors de la

campagne 1 (mai-juin 2005) on observe un flux sédimentaire de 440 g/s à l'entrée du réservoir (Oetwil), alors que le flux à l'exutoire (Wettingen) est de 200 g/s pour un débit quasiment constant (Fig. 8a). La différence (240 g/s) reste piégée et sédimente dans le réservoir. Dans ces conditions, cela correspond à environ 20 tonnes de sédiments piégés par jour. La proportion de sédiments se déposant dans le réservoir atteint environ 50% du flux entrant par débit d'été moyen. Le flux sédimentaire secondaire (Fig. 8b) varie entre 0.4 et 7 g/s (STEP Killwangen et Reppisch, respectivement) pour cette période, il ne représente qu'un pourcent environ du flux principal. De ce fait, son impact est considéré comme quantitativement négligeable sur le système sédimentaire étudié lors de conditions

hydrologiques moyennes. Cependant, la valeur de charge sédimentaire pour la Reppisch (7 mg/l) atteint le double de celle de la Limmat à Oetwil (3.5 mg/l). Ceci signifie qu'en cas de crue de la Reppisch et sans qu'il n'y ait de crue de la Limmat, le flux de la Reppisch pourrait atteindre une valeur significative et influencer légèrement la sédimentation du réservoir par un apport extraordinaire.

Le 23 août 2005, jour suivant le débit maximal de la crue du mois d'août 2005 (22.08.2005), le flux sédimentaire de la Limmat était de 2100 kg/s à l'entrée du réservoir, soit plus de 4000 fois celui observé en situation de débit d'été moyen (environ 110 m³/s) et de 120 kg/s à proximité du barrage (Fig. 9). La différence se déposant dans le réservoir atteint 1980 kg/s pour cet événement exceptionnel, ce qui représente environ 11 000 tonnes de sédiments piégés en une heure et demie (c'est-à-dire le temps de résidence de l'eau en cas de crue dans le réservoir). Lors d'un événement de crue, les sources sédimentaires sont plus nombreuses. La matière en suspension peut également provenir de l'arrachement des berges ou de la remise en suspension de sédiments déposés et non consolidés à cause de la très haute énergie dégagée par l'augmentation du débit. Ce phénomène décèle un autre risque, celui de remettre en suspension des sédiments fortement contaminés et enfouis jusqu'ici sous une couche sédimentaire plus ou moins épaisse. Quant aux valeurs pour le flux secondaire, elles s'échelonnent entre <math><0.1</math> et 1.4 kg/s (pour la Reppisch). Elles correspondent à peine à 1% du flux principal de la Limmat. Lors d'une crue de la Limmat, l'importance du flux secondaire devient insignifiante.

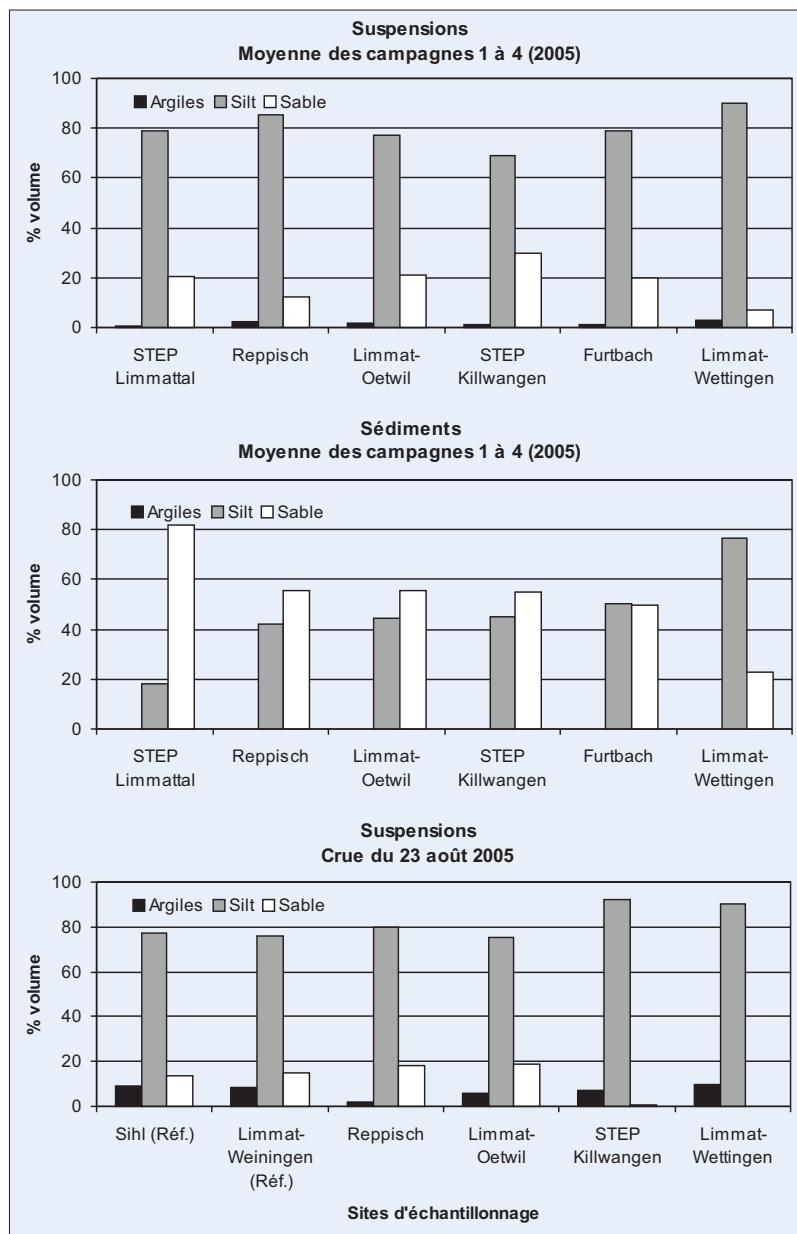


Fig. 7: Répartition granulométrique moyenne pour les suspensions (a) et les sédiments (b) des campagnes d'échantillonnage 1 à 4 et pour la crue du mois d'août 2005 (c) (cf. Tableau 1), par site d'échantillonnage d'amont en aval (Fig. 1). Les barres inexistantes indiquent des valeurs <0.1%.

ment le flux moyen de la section mouillée, puisque les concentrations en MES varient dans celle-ci.

Flux de métaux

Les flux de métaux pour la campagne 1 (mai-juin 2005) (Fig. 10) sont calculés en milligrammes par seconde. Ils varient de 0.1 à 118.7 mg/s pour le mercure (Hg) et le zinc (Zn) à Oetwil, alors que le flux à proximité du barrage est de <0.1 et 52.7 mg/s pour les mêmes métaux respectivement. Dans ce cas, la proportion de zinc piégée dans le réservoir avec les matières en suspension atteint environ 66 mg/s, ce qui représente près de 6 kg de zinc se déposant par jour. Les flux de métaux du Furtbach, de la Reppisch et des STEP de Killwangen-Spreitenbach et Limmattal présentent des valeurs inférieures à celles observées dans la Limmat. Par exemple, pour le zinc, elle varie entre 0.2 (STEP Killwangen) et 1.5 mg/s (Reppisch).

Les flux sédimentaires calculés pour la crue (Fig. 9) montrent que 90% de la matière amenée dans le réservoir se dépose, alors que par débit moyen, la proportion de matière sédimentée est d'environ 50%.

Plusieurs auteurs ont mis en évidence le rôle quantitatif d'événements rares ou extrêmes dans l'établissement d'une moyenne à long terme de la concentration en MES (Meybeck et al. 2003). Par exemple, Rowan et al. (2001) soulignent que la nature épisodique de l'apport sédimentaire est mise en évidence par le fait que 85% des sédiments sont transportés en 2% du temps.

Il est toutefois important de noter que les valeurs de flux pour cette étude proviennent d'un échantillonnage ponctuel, ils ne représentent donc pas forcé-

ment à mettre en évidence la source de contamination métallique du réservoir. La STEP Limmattal et l'affluent Reppisch se jettent dans la Limmat légèrement en amont de l'entrée du réservoir à Oetwil. Cependant, leurs flux métalliques, même cumulés, atteignent à peine plus d'un pourcent du flux métallique entrant. De ce fait, la source de contamination doit se situer plus en amont. Elle provient probablement de la Ville de Zürich, c'est-à-dire, de la STEP Werdhölzli (Fig. 1).

Toutefois, les valeurs de flux métalliques très élevées de la Reppisch pourraient influencer significativement la contamination du réservoir de manière ponctuelle, en cas de crue de l'affluent par exemple.

Des valeurs indicatives proposées par l'ordonnance OSol (1998), permettent d'évaluer les atteintes por-

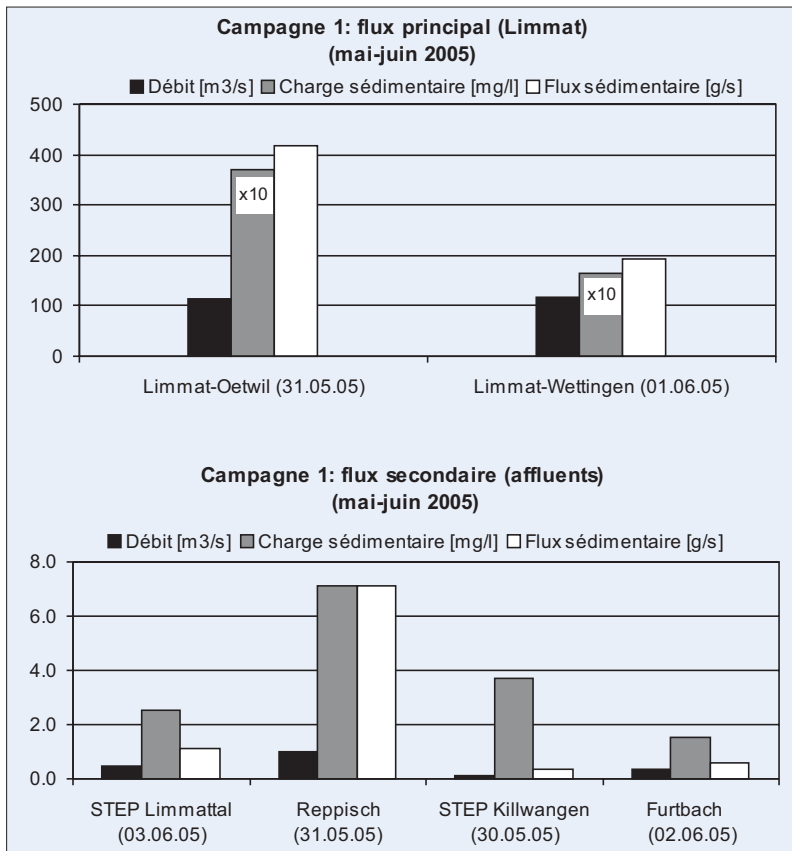
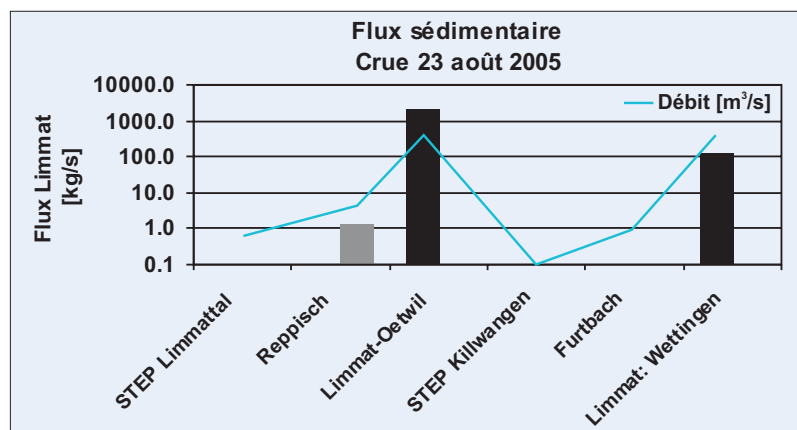


Fig. 8: Débit, charge et flux sédimentaires: (a) flux principal (Limmat), (b) flux secondaire (affluents). Les colonnes comportant l'encadré «x10» représentent 10 fois la valeur réelle pour un souci d'échelle. (Source: <http://www.hochwasser.zh.ch/internet/bd/awel/wb/hw/de/home.html>)

tées aux sols par les métaux lourds à partir de 9 métaux, dont le chrome (Cr), le nickel (Ni), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le cadmium (Cd), le mercure (Hg) et le plomb (Pb). Seuls ces 6 métaux ont été choisis ici, car ils correspondent également aux métaux proposés comme objectifs de référence de la CIPR (Source: <http://www.iksr.org/index.php?id=194>) et à une étude sur les concentrations dans les MES des grandes rivières suisses (Pardos et al. 2003).

Les suspensions montrent des teneurs en cuivre (Cu) et en zinc (Zn) de 88.2 et 406 mg/kg respectivement, dépassant les objectifs de référence de la CIPR (valeur la plus élevée des 3 références) de 1.7 à 2 fois. Les teneurs pour les autres métaux (Cr, Ni,

Fig. 9: Flux sédimentaire et débit des rivières le 23 août 2005, jour suivant le débit maximal de la crue, atteint le 22 août 2005. Echelle logarithmique. Source: www.hochwasser.zh.ch/internet/bd/awel/wb/hw/de/home.html)



Cd, Hg et Pb) égalent ou dépassent les valeurs moyennes sur les MES des cours d'eau suisses, mais restent en dessous des objectifs de référence de la CIPR et des valeurs indicatives OSol (1998). En ce qui concerne les sédiments, seule la teneur en zinc de 168.7 mg/kg dépasse la valeur indicative OSol (1998) fixée à 150. Les teneurs en cuivre, cadmium et plomb dépassent les valeurs moyennes des MES des grands cours d'eau suisses, alors que les teneurs en chrome, nickel, cadmium et mercure se situent en dessous de la moyenne.

La retenue de Wettingen révèle une contamination actuelle élevée en cuivre et en zinc. De plus, d'autres métaux traces (Cd, Hg, Pb) analysés dépassent ponctuellement les valeurs indicatives OSol (1998).

La concentration en polluants est directement liée à la granulométrie, comme le mettent en évidence plusieurs auteurs. En effet, les fractions les plus fines, ici les suspensions, sont aussi les plus concentrées, ce que notent également Pardos et al. (2003) dans leur étude des suspensions dans les grands cours d'eau suisses. D'autre part, Horowitz et al. (1987)

mettent en évidence la relation entre la concentration en métaux traces qui augmente lorsque la surface spécifique d'un grain augmente alors que la taille de la particule diminue. Eggleton et al. (2004), quant à eux, mettent en avant la tendance des sédiments fins à accumuler les polluants à cause de leur nature sorptive. De cette manière, les sédiments fins agissent comme un réservoir en réduisant le potentiel de toxicité par rapport aux organismes aquatiques. Cependant, un changement dans la chimie des sédiments dû à des

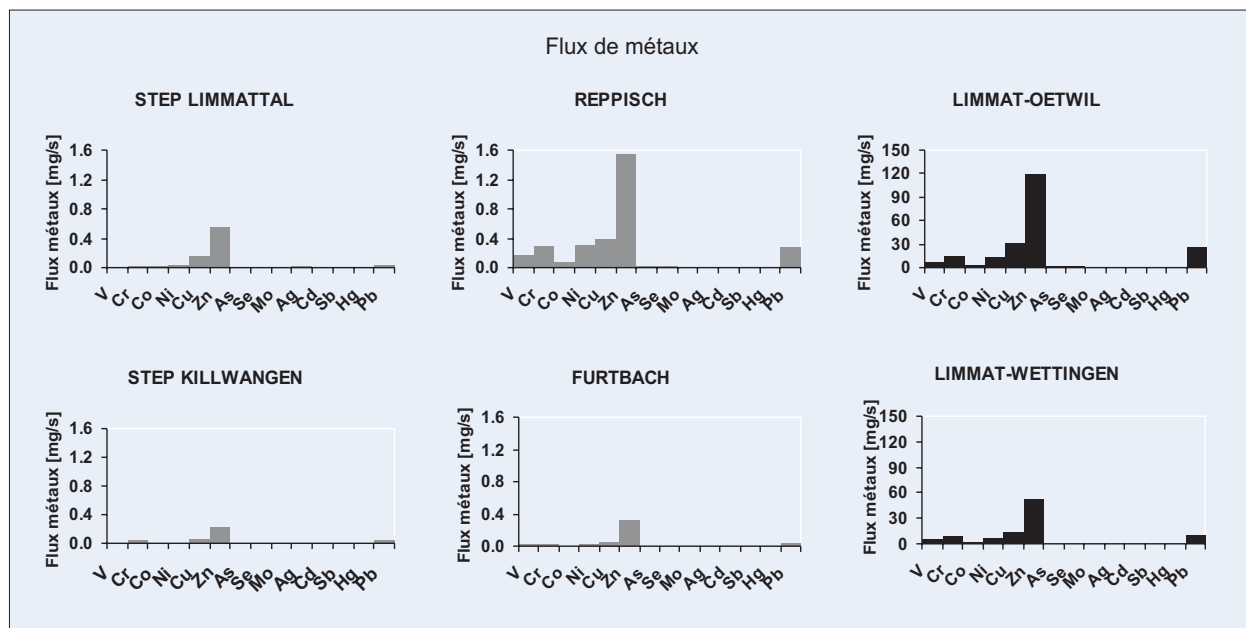


Fig. 10: Flux de métaux [mg/s] pour la campagne 1 (cf. Tableau 1) et pour chaque site d'échantillonnage d'amont en aval. Les barres inexistantes indiquent des valeurs <0.1 [mg/s].

perturbations peut résulter en une remobilisation des polluants couplée à une transformation de ceux-ci dans des formes chimiques plus toxiques et biodisponibles.

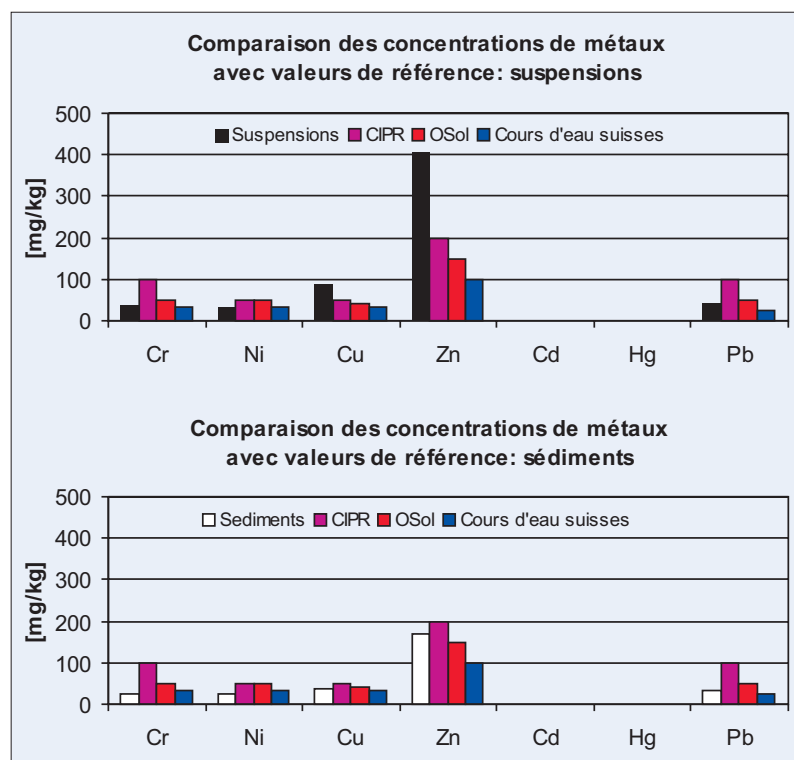
De toute évidence, l'accumulation de sédiments fins et contaminés présente des risques de pollution élevés.

flux ne représentent que un pourcent environ du flux de la Limmat en période de débit moyen et moins encore en cas de crue. Ceci permet de dire que les matières en suspension entrant dans le réservoir sont déjà contaminées par une source plus en amont, probablement la ville de Zurich. Les points d'échantillonnages de référence confirment que la charge sédimentaire provient essentiellement de la Sihl.

Conclusions

On constate que la sédimentation du réservoir est déterminante en période de crue. En effet, le flux est alors supérieur d'un facteur de 4000 par rapport à un flux moyen et la quantité de sédiments se déposant dépasse les 90%, alors qu'elle est de 50% en période de débit moyen. D'autre part, les affluents (Furtbach et Reppisch) et les stations d'épuration locales (Killwangen-Spreitenbach et Limmattal) contribuant au

Fig. 11: Comparaison des concentrations de métaux dans les suspensions (a) et les sédiments (b) des campagnes 1-4 (Tableau 1) avec les objectifs de référence de la CIPR, avec les valeurs indicatives de l'ordonnance OSol (1998) et avec les moyennes dans les MES des grands cours d'eau suisses (Pardos et al. 2003).



On constate finalement que le comblement du réservoir a atteint près de 45% du volume initial pour une période de 70 ans et que ces sédiments, en partie contaminés, présentent un risque au niveau de la remise en suspension possible des polluants par érosion, notamment. Le réservoir de Wettingen est un site contaminé nécessitant une surveillance selon l'ordonnance Osites (1998).

La granulométrie et la dynamique de transport hydraulique permettent de considérer le réservoir de Wettingen comme un piège à polluants. En effet, les particules les plus fines sont celles qui sont transportées le plus loin, elles se déposent généralement dans la partie proximale du barrage et ce sont également les plus concentrées.

Il est important de tenir compte du piège à sédiments contaminés potentiel que représente le bassin final d'une retenue d'eau artificielle comme celle de Wettingen ou celle de Verbois, lors d'une réflexion concernant leur gestion. En effet, l'absence de vidange dans la retenue de Wettingen pose également

un problème environnemental lié à la toxicité des sédiments qui s'y accumulent. Ce problème ne serait pourtant pas réglé en instaurant un système de chasse, cela ne ferait que repousser le problème en aval ou alors dans le temps en admettant que les concentrations de polluants se diluent dans la suite du cours d'eau. Il s'agit plutôt de considérer ces sites comme contaminés si cela se vérifie et de les traiter en conséquence à l'aide de l'ordonnance Osites (1998) notamment.

Remerciements

Cette recherche a été co-financée par le «Réseau Universitaire International de Genève» (RUIG), dans le cadre du projet «Changements climatiques, hydrologie des montagnes et contraintes institutionnelles à l'échelle internationale». Nous remercions «Elektrizitätswerke der Stadt Zürich» de l'appui pour la réalisation et la publication de cette recherche.

Références

- ALLEN JRL. 1985. Principles of physical sedimentation. 272p.
- BURRUS D, THOMAS RL, DOMINIK J, VERNET JP. 1989. Recovery and concentration of suspended solids in the upper Rhone river by continuous flow centrifugation. *Hydrological Processes* 3, pp 65-74.
- EGGLETON J AND THOMAS KV. 2004. A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environment International* 30, pp 973-980.
- FOREL (INSTITUT) 1998. Sédimente Stauraum Wettingen. In: CREATO: Erneuerung Limmatwerk Wettingen, Umweltverträglichkeitsbericht 1. Stufe, pp. 6-1 – 6-21, Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, Ingenieurbüro für bauliche Anlagen.
- FOREL (INSTITUT) ET SA+H (SCHÄLCHLI, ABEGG UND HUNZINGER). 2004. Überwachung Stauraum KW Wettingen 2002/03. In: Erneuerung Kraftwerk Wettingen, Untersuchungen Startphase 2002/03, pp. 8-36, Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, Arbeitsgemeinschaft Stauraumüberwachung.
- HOROWITZ AJ, ELRICK KA. 1987. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry. *Applied Geochemistry*, Vol. 2, pp 437-451.
- LOIZEAU JL, ARBOUILLE D, SANTIAGO S, VERNET JP. 1994. Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments. *Sedimentology* 41, pp 353-361.
- MEYBECK M, LAROCHE L, DÜRR HH, SYVITSKI JPM. 2003. Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and Planetary Change* 39, pp 65-93.
- ONGLEY ED, THOMAS RL. 1989. Dewatering solids by continuous-flow centrifugation: practical considerations. *Hydrological Processes* 3, pp 255-260.
- OSITES 1998. Ordonnance sur l'assainissement des sites pollués. RS 814.680
- OSOL 1998. Ordonnance sur les atteintes portées aux sols. RS 814.12
- PARDOS M, HOURIET JP, DOMINIK J. 2003. Micropolluants dans les sédiments. Documents environnement n° 353, OFEFP, 58p.
- PERROUD A. 2000. Etude sédimentologique et géochimique des sédiments de la retenue de Verbois (Genève). Dipl. Inédit.
- REMINI B. 2001. Une approche sur le mécanisme de l'envasement des petites retenues, cas du barrage de Beni Amrane (Algérie). Sém. Int. sur les petits barrages dans le monde méditerranéen. Tunis, mai 2001. Source: www.tn.ird.fr/actualites/pages/CDHYDROMRD/Pages/Communications/RESPOST_uneapproche_sur_le_mecanisme_du.pdf
- ROWAN JS, PRICE LE, FAWCETT CP, YOUNG PC. 2001. Reconstructing historic reservoir sedimentation rates using data-based mechanistic modelling. *Phys. Chem. Earth (B)*, vol 26, n°1, pp 77-82.
- WILDI W, DOMINIK J, LOIZEAU JL, THOMAS R, FAVARGER PY, HALLER L, PERROUD A, PEYREMANN C. 2004. River, reservoir and lake sediment contamination by heavy metals downstream from urban areas of Switzerland. *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 9, pp 75-87.