

Suivi de l'évolution morphologique et sédimentaire de l'Yonne suite à la première phase du démantèlement du barrage de la Pierre-Glissotte (Massif du Morvan)

Louis Gilet¹, Frédéric Gob^{1*}, Clément Virmoux¹, Jonathan Touche¹, Sophie Harrache¹, Emmanuèle Gautier¹, Matthieu Moës²

¹Université Panthéon-Sorbonne (Paris 1), Laboratoire de Géographie Physique, CNRS UMR8591, 1 Place Aristide Briand, FR-92195 Meudon cedex, France.

² Agence de l'Eau Seine Normandie, DT Seine Amont, 18 cours Tarbé, CS 70702, 89107 SENS cedex, France.

*frederic.gob@univ-paris1.fr

Résumé

L'étude présente les travaux en cours visant à réaliser un suivi hydromorphologique de l'Yonne supérieure consécutivement à la première phase d'arasement d'un petit ouvrage hydroélectrique (7,29 m de hauteur), le barrage de la Pierre-Glissotte. La retenue de ce barrage construit dans les années 1920 était presque entièrement comblée par des sédiments et l'ouvrage représentait un obstacle à la continuité biologique et sédimentaire. Les enjeux et les questionnements liés à la suppression du barrage sont nombreux : quelle sera la vitesse d'évacuation de la charge sédimentaire contenue dans le barrage ? Quelle sera la taille des sédiments remobilisés et susceptibles de transiter à travers les restes de l'ouvrage ? Quels ajustements morphologiques se manifesteront à l'aval comme à l'amont de l'ouvrage ? À quel rythme et sous quelles conditions hydrauliques s'effectueront ces ajustements ?

Afin de répondre à ces interrogations, plusieurs méthodes (traçage de la charge de fond, équipement hydrologique, levés topographiques, analyse de photographies aériennes, photogrammétrie, etc.) et outils (RFID, sondes Diver, station totale, drone, etc.) ont été déployés pour suivre le charriage, l'hydrologie, la morphologie et la granulométrie du lit. Plusieurs sites ont été équipés au sein et autour du complexe de la Pierre-Glissotte pour suivre les réajustements du lit dans les situations sous et hors influence du barrage.

Ces premiers résultats montrent que le barrage a presque totalement interrompu le transit sédimentaire pendant près de 30 ans, entraînant une sédimentation très importante dans la retenue et en amont de celle-ci et, en aval, une incision du lit supérieure à 1m sur plusieurs kilomètres. L'ouverture du barrage ne s'est pas passée comme prévue et une quantité importante de particules fines ont très rapidement été évacuées de la retenue. Depuis plus d'un an, un nouveau lit est en cours de formation et, aujourd'hui, près de 30 % du volume total des sédiments qui occupaient l'ancien réservoir a d'ores et déjà été réinjecté dans le système. La charge grossière piégée en queue de retenue a elle aussi été remobilisée et est en cours d'évacuation. Nos marquages ont montré que les cailloux et galets étaient très mobiles et progressaient très rapidement à travers la retenue. La vague sédimentaire n'est pas encore visible à l'aval de l'ancienne retenue et l'enjeu du suivi dans les mois et années à venir est de voir si cette vague sédimentaire sera évacuée au fur et à mesure de son avancée ou si une nouvelle sédimentation viendra combler l'enfoncement du lit de ces 90 dernières années.

1 Le désaménagement des ouvrages transversaux et la continuité sédimentaire

Les très nombreux barrages et seuils installés de longue date sur les cours d'eau font l'objet de plus en plus d'attention de la part des gestionnaires et de la communauté scientifique. L'interruption de la continuité écologique et sédimentaire ainsi que l'étagement des cours d'eau consécutifs à la présence de ces obstacles transversaux sont en effet aujourd'hui reconnus comme des enjeux majeurs de leur gestion écologique. Encouragé par le cadre réglementaire (notamment la DCE) qui impose une attention particulière à la libre circulation des poissons et des sédiments, de plus en plus d'opérations de restauration se construisent autour du démantèlement total ou partiel de ces ouvrages. Ce mouvement a débuté il y a une vingtaine d'années aux États-Unis, où plusieurs dizaines de barrages sont supprimés chaque année. En France, il ne s'intensifie que depuis quelques années (Barraud, 2011 ; Lespezet *et al.*, 2016) et les suppressions d'obstacles concernent essentiellement des seuils de petite dimension (inférieure à 2-3 m de hauteur). L'effacement des barrages de plusieurs mètres de haut reste exceptionnel : à titre d'exemple, on peut citer les démantèlements des barrages de Kernansquillec sur le Léguer (1996, hauteur : 15 m ; Derville *et al.*, 2010), de Saint Etienne de Vigan sur l'Allier (1998, hauteur : 12 m) ou de Maison Rouge sur la Vienne (1998, hauteur : 3,8 m ; Coudrec, 1998) et les effacements à venir de la Roche-qui-Boit et de Vezins sur la Sélune (respectivement hauteur de 16 m et de 36 m ; Germaine et Barraud, 2013) et de Poutès sur l'Allier (hauteur : 17 m ; Lecuna, 2015). De plus, si cette politique de démantèlement semble aujourd'hui s'accélérer, le montage des projets est toujours compliqué et fait très souvent débat. La gestion de ces grands projets et les questions de représentation autour des notions de « nature » et de « paysage » sont en effet souvent au cœur de nombreux conflits opposant gestionnaires, propriétaires, et groupes de citoyens (Barraud, 2011 ; Germaine et Barraud, 2013 ; Lespezet *et al.*, 2016).

Du point de vue du fonctionnement hydrosédimentaire, les conséquences des obstacles transversaux ont été abondamment décrites et théorisées, mais l'évolution du lit après l'effacement d'un ouvrage reste mal connue. Aux États-Unis, de nombreuses opérations de restauration ont fait l'objet de suivi de l'évolution du milieu pendant et après les travaux. On trouve ainsi dans la littérature scientifique un nombre grandissant d'études de cas qui sont attachées à étudier le transit sédimentaire et les ajustements morphologiques consécutifs aux travaux eux-mêmes et à la libération des masses sédimentaires piégées dans la retenue (Pizutto, 2002; Doyle *et al.*, 2003 ; Burroughs *et al.*, 2009 ; Magilligan *et al.*, 2016). D'autres publications proposent quant à elles un cadre méthodologique pour la réalisation des suivis (Bushaw-Newton *et al.*, 2002 ; Darby et Sears, 2008 ; Kibler *et al.*, 2010). Cependant, ce type d'étude est beaucoup plus rare en France et compte tenu de la grande variabilité des réponses associées à la présence d'un barrage, il est encore bien délicat de pouvoir correctement anticiper la trajectoire que prendra le cours d'eau après le rétablissement de sa continuité sédimentaire. Celle-ci dépend en effet de la taille de l'ouvrage, de son mode de gestion, des caractéristiques hydrologiques et sédimentaires du cours d'eau sur lequel il a été installé et de la durée de fonctionnement de l'ouvrage.

Cette étude a pour objectif d'alimenter cette base documentaire à partir d'un exemple français, l'arasement du barrage de la Pierre-Glissotte sur l'Yonne, au droit de la ville de Château-Chinon. C'est un ouvrage de taille moyenne (7,5 m de hauteur) construit dans les années 1920 dont le démantèlement a débuté en juillet 2015. Ce cas d'étude est intéressant à plusieurs titres : (i) d'une part par la nature du montage du projet qui concilie les intérêts économiques du propriétaire et les intérêts écologiques défendus par les gestionnaires de bassin ; (ii) d'autre part car la retenue est aujourd'hui entièrement comblée, ce qui pose un certain nombre de questions sur la gestion de ce stock sédimentaire ; (iii) enfin, car ce démantèlement s'inscrit dans une longue histoire d'aménagement du cours d'eau et de son bassin et offre l'opportunité de reconstruire la trajectoire hydrosédimentaire d'un hydrosystème fortement anthropisé.

Entre le 16^e et le 19^e siècle, les rivières du Morvan ont en effet subi des aménagements conséquents afin de permettre la pratique du flottage du bois pour répondre à une demande croissante en bois de chauffe de la ville de Paris. La petite taille de ces cours d'eau a poussé à la création d'un très grand nombre de petits étangs dans les têtes de bassin. Ces retenues étaient régulièrement ouvertes pour augmenter le débit de la rivière et ainsi permettre l'acheminement du bois vers la vallée (Bravard, 1999 ; Rezée 2002 ; Benoit *et al.* 2004 ; Poux *et al.*, 2011). Ces lâchers réguliers ont engendré un accroissement drastique du transport solide qui s'est traduit par une incision généralisée des lits de tête de bassin. Plus bas dans la vallée, l'énergie des

cours d'eau étant moins importante, les lits ont au contraire stocké les sédiments venus de l'amont. Une véritable vague sédimentaire s'est propagée depuis le haut bassin vers la moyenne vallée. Cette dernière s'est traduite par un exhaussement des lits de la moyenne vallée parfois supérieur à un mètre et, par réaction, par la mise en place de levées de débordement de part et d'autre du chenal actuel (Poux *et al.*, 2011). Dans ce contexte général d'excès sédimentaire engendré par le flottage, le barrage de la Pierre-Glissotte a inversé cette tendance et interrompu le charriage. Aujourd'hui, suite à l'arasement du barrage de la Pierre-Glissotte, la situation est en train de s'inverser.

Cette étude présente les impacts hydrosédimentaires du barrage, les suivis entrepris autour de son démantèlement et les premières évolutions du site un an après la première phase des travaux. Nous nous attacherons tout d'abord à décrire les aménagements et le bassin amont de l'Yonne. Le projet de restauration et les méthodes seront ensuite présentés. Nous terminerons enfin par les premiers résultats sur l'évolution morphologique de l'ancienne retenue et sur la remobilisation de la charge grossière piégée en queue de retenue.

2 Le bassin supérieur de l'Yonne et le barrage hydro-électrique de la Pierre-Glissotte

Le barrage de la Pierre-Glissotte est situé sur l'Yonne en contrebas de la ville de Château-Chinon. Au franchissement du barrage, la rivière draine un bassin versant de 78 km² entièrement inscrit dans le massif cristallin du Morvan (Figure 1). Elle prend sa source à plus de 700 m d'altitude et draine des sommets qui dépassent 800 m d'altitude. L'Yonne est une rivière de moyenne montagne marquée par un régime pluvio-océanique avec des hautes-eaux centrées sur les mois d'hiver et des basses-eaux en août et septembre. Les sommets du Morvan reçoivent plus de 1600mm de précipitation par an qui, conjugués à un substratum rocheux imperméable, confèrent un caractère très réactif à l'hydrologie du cours d'eau. Les crues y sont courtes mais rapides et les écoulements abondants. La station de Corancy, située 3 km en aval de la Pierre-Glissotte (bassin versant de 106 km²), enregistre un module de 2,8 m³/s correspondant à un débit spécifique de 26 l/s/km². À cette même station, la crue biennale est de 20 m³/s et la décennale de 29 m³/s. L'Yonne est une rivière à pente relativement forte, en moyenne 0,02 m/m sur les 20 km qui séparent sa source et la station hydrométrique de Corancy. Elle charrie une charge caillouteuse grossière. Le D₅₀ de son lit varie entre 30 et 70 mm et le D₉₀ entre 75 et 120 mm (Poux *et al.*, 2011).

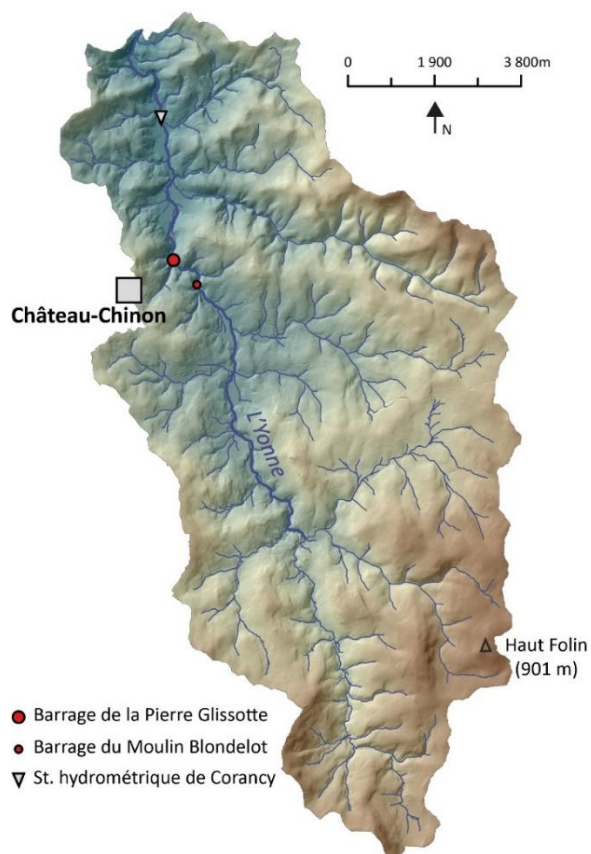


Figure 1 : Carte du bassin versant de l'Yonne et localisation du barrage de la Pierre-Glissotte

Le barrage de la Pierre-Glissotte était un barrage de type poids construit entre 1923 et 1927 par la famille Gallois pour alimenter leurs usines (Figures 2 et 3). Les Usines Morvan ont compté plus de 600 employés dans les années 1950 et ont fonctionné jusqu'en 1978. Elles étaient spécialisées dans la fabrication de pièces techniques (masques à gaz, soufflets, joints) et semelles en caoutchouc. Pour sa production hydro-électrique, Louis Gallois a fondé en 1928 la Société Hydro-Electrique et Industrielle du Morvan, la SHEIM. L'usine hydro-électrique associée au barrage a fonctionné jusqu'à la seconde moitié des années 1950 lorsqu'elle a été détruite par un incendie. Le barrage est alors resté hors d'eau jusqu'à la reconstruction d'une nouvelle centrale en 1985. La première usine était située 200 m en aval du barrage et restituait le débit turbiné 450 m en aval. La plus récente a été construite au pied de la retenue et son canal de décharge ne faisait qu'une cinquantaine de mètres de long (Reilé, 2014). La puissance autorisée en 1984 pour 40 ans est de 400 kW pour un débit prélevé de $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ mais elle n'était équipée que pour produire 150 kW.

Le site de la Pierre-Glissotte était couplé à un barrage plus petit, le Moulin Blondelot, situé 1200 m en amont (Figures 2 et 3). La centrale associée a été créée à la fin du 19^e siècle par la ville de Château-Chinon et comptait deux turbines qui produisaient de l'électricité jusqu'au début des travaux de restauration. Elle a été rénovée entre 1993 et 1997 pour y remplacer l'une des turbines, tandis que le barrage s'est vu doter d'un vannage (un clapet et une vanne secteur) et d'une passe à poisson. En 1983, la centrale fut autorisée à produire, pour 40 ans, une puissance brute de 340 kW bruts (Reilé, 2014). Son fonctionnement et celui de la centrale de la Pierre-Glissotte sont indépendants l'un de l'autre.

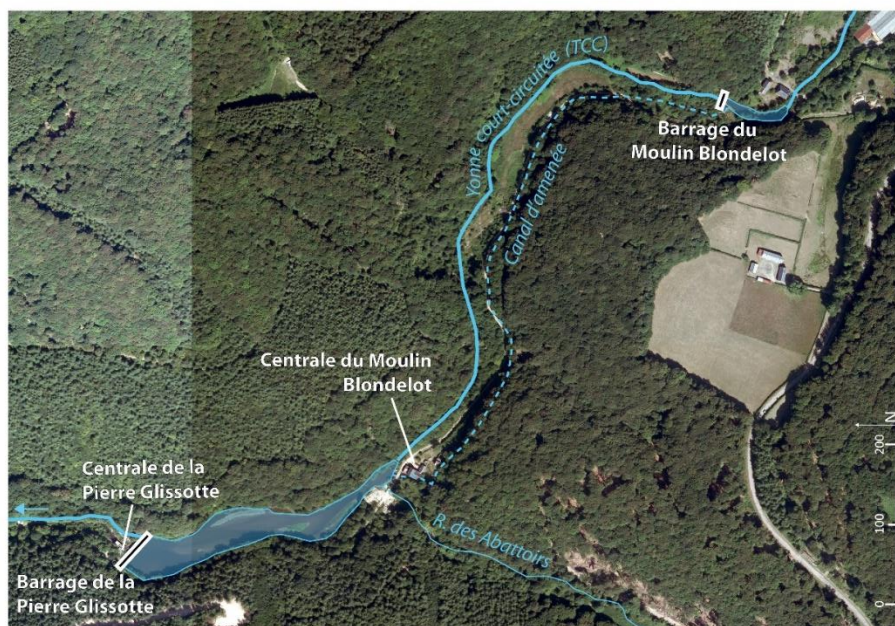


Figure 2 : Plan de situation du Moulin Blondelot et du Barrage de la Pierre-Glissotte

Le barrage du Moulin Blondelot est haut de 3,49 m. Lorsqu’il est fermé, il peut retenir un volume d’eau de 700 m³ et permet de dériver une partie du débit de la rivière (jusqu’à 2,3 m³/s) le long du versant vers une conduite forcée qui précipite les eaux jusqu’à la centrale située une quinzaine de mètres plus bas. Le canal d’amenée est long de 720 m, laissant un tronçon court-circuité de la rivière de 820 m. Il est à noter que ce barrage a été installé à l’entrée d’un tronçon de l’Yonne dans lequel la vallée y est très étroite et la pente particulièrement forte (0,035 m/m).

Le barrage de la Pierre-Glissotte fonctionnait différemment puisque la centrale était implantée à l’aval immédiat d’un mur en pierres maçonnées de 7,29 m de hauteur, installé sur un seuil rocheux de 0,9 m de haut. Il créait une retenue d’environ 40000 m³ qui remontait jusqu’au canal de fuite de la centrale du Moulin Blondelot située 340 m en amont. Le barrage a été équipé à sa construction de deux vannes de fond (2 m sur 2 m). L’une a cessé de fonctionner assez rapidement après sa mise en service et l’autre en 2002 suite à une crue qui a détérioré le système de vannage permettant son ouverture (Reilé, 2014). Le barrage était également équipé d’une surverse de 12 m de large située en rive droite, une cinquantaine de centimètres sous la crête du barrage. Depuis l’arrêt de la seconde vanne de fond en 2002, les débits non turbinés s’écoulaient uniquement via ce déversoir de décharge.

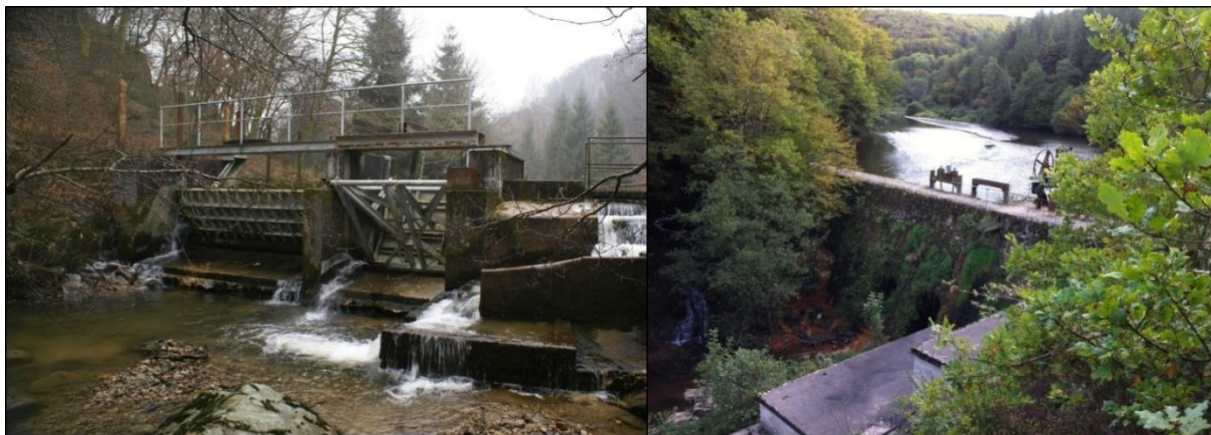


Figure 3 : Photographies du Moulin Blondelot (à gauche) et du Barrage de la Pierre-Glissotte (à droite)

Avant la première phase de son démantèlement en juillet 2015, le réservoir du barrage de la Pierre-Glissotte était presque entièrement comblé de sédiments, très grossiers dans la partie amont de la retenue, et sablo-vaseux jusqu'au barrage. D'après le témoignage du gestionnaire, ce comblement est récent. Il apparaît sur les photographies aériennes de 1998 et 2002 et il est très présent à partir de 2007. La charge sédimentaire piégée a bien entendu été apportée par l'Yonne (un important dépôt de charge grossière est bien visible en queue de retenue) mais également par un petit affluent de rive gauche, le ruisseau des Abattoirs, qui se jette dans la queue de retenue juste à l'aval de la centrale du Moulin Blondelot.

3 Le projet de démantèlement du barrage

Ce projet de restauration est le résultat d'une co-construction entre l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN) et le propriétaire privé des deux barrages (Société Hydroélectrique de la Pierre-Glissotte). Les discussions ont été amorcées suite à la volonté du propriétaire de moderniser la centrale de la Pierre-Glissotte et de se mettre en conformité avec la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (2006). À l'origine, le plus grand des deux barrages ne devait pas être démantelé et seules les vannes de fond devaient être réouvertes. Partant du principe que le propriétaire avait pour projet de moderniser ses installations et se devait de rétablir la libre circulation des poissons et des sédiments, les gestionnaires de l'AESN ont souhaité profiter de ces travaux pour proposer un projet plus ambitieux permettant la réouverture du linéaire. Les surcoûts engendrés par l'arasement du barrage sont pris en charge à 95 % par l'Agence de l'Eau Seine Normandie, les 5 % restant étant à la charge du propriétaire. Le tout représente un budget de 133000 € comprenant la réalisation des travaux d'arasement, la pêche de sauvegarde et une étude de suivi post-travaux.

Le site de la Pierre-Glissotte est très isolé et n'est pas accessible au public. Il est donc relativement peu connu et la population locale ne s'est jamais opposée à son démantèlement. Une enquête publique a été menée par la Préfecture de La Nièvre du 20 avril au 21 mai 2015. Elle n'a suscité que très peu d'intérêt et n'a recueilli aucun avis défavorable de la population. Durant l'enquête, le PNR du Morvan, la DDT, l'ONEMA et les communes de Château-Chinon et de Corancy ont également été consultés et ont rendu un avis favorable au projet. La seule réelle opposition est venue de la pisciculture de Corancy, gérée par le Lycée agricole de Château-Chinon. Celle-ci craignait en effet que, durant les travaux, la concentration en matière en suspension de la rivière n'augmente drastiquement et menace en conséquence sa production. Pour minimiser ce risque, des solutions techniques ont été proposées (arasement en deux temps) et le calendrier des travaux a été ajusté en concertation avec la pisciculture.

Le projet construit par la Société Hydroélectrique de la Pierre-Glissotte et l'Agence de l'Eau Seine Normandie repose finalement sur trois principaux éléments : (i) l'abandon de l'unité de production hydroélectrique du Moulin Blondelot et la modernisation de celle de la Pierre-Glissotte, (ii) l'arasement du barrage de la Pierre-Glissotte et (iii) le remplacement de la passe à poisson du barrage du Moulin Blondelot. Le projet d'aménagement et une étude d'impact ont été réalisés par le Cabinet Reilé. Les

descriptions techniques du projet présentées ci-dessous sont extraites du rapport technique produit par ce bureau d'étude (Reilé, 2014). Dans ce projet, le nouveau complexe hydroélectrique repose sur une unité de production unique située à l'emplacement de la centrale de la Pierre-Glissotte. Pour alimenter celle-ci, la conduite forcée raccordée à la prise d'eau du Moulin Blondelot n'est plus raccordée à la centrale du Moulin Blondelot mais a été prolongée de 450 m jusqu'à la centrale de la Pierre-Glissotte. La hauteur de chute atteint ainsi 24,85 m permettant à la nouvelle turbine de produire une puissance électrique de 400 kW. Cela représente une augmentation de 11,5 % de production supplémentaire par rapport à la situation avant travaux. Le débit maximal turbiné est de 2,5 m³/s et le débit réservé a été fixé à 320 l/s. Le TCC est à présent long de 1160 m.

Le barrage du Moulin Blondelot a un impact relativement limité sur le transit sédimentaire. Il est en effet équipé d'un système de vannage depuis les années 1990 qui s'ouvre automatiquement pendant les crues et s'efface totalement lorsque le débit dépasse 20 m³/s. Un seuil bétonné de 1,2 m de hauteur sur lequel viennent se fermer la vanne et le clapet a toutefois arrêté une partie du transport sédimentaire jusqu'à son comblement et interrompt la continuité ichtyologique. Dans le projet de restauration, le barrage est conservé en l'état pour détourner le débit nécessaire au bon fonctionnement de la nouvelle centrale mais la passe à poisson doit être remplacée pour rétablir la continuité écologique.

L'arasement du barrage de la Pierre-Glissotte est sans aucun doute l'élément le plus impactant de ce projet de restauration. Le maître d'ouvrage a opté pour un arasement du barrage en deux temps afin notamment d'éviter une libération trop rapide et massive des sédiments contenus dans l'ancienne retenue. Une première phase, réalisée en juillet-août 2015, consistait à vidanger le réservoir puis déconstruire les 3 m supérieurs du barrage (avant la vidange, une pêche de sauvegarde a été effectuée). La seconde phase, qui devrait intervenir en 2017, finalisera l'arasement en effaçant les 4 mètres inférieurs de l'ouvrage. L'objectif de ce calendrier divisé en deux phases est de permettre une certaine stabilisation du lit fluvial formé suite à la première étape de l'arasement. La période d'attente doit en particulier assurer un séchage des sédiments dans le but de minimiser leur érosion au moment de la deuxième phase d'effacement. Une partie des sédiments (environ 1000 m³) devrait être évacuée mécaniquement avant le début de la 2^e phase. Les sédiments seront stockés sur une parcelle proche de l'ancienne centrale du Moulin Blondelot. Le cabinet Reilé a fait analyser les sédiments d'un prélèvement effectué dans la retenue. Ceux-ci ne présentent pas de pollution dépassant les seuils légaux. Toutefois, compte-tenu de l'historique du remplissage et du passé industriel du site, cette analyse basée sur un seul prélèvement doit être considérée avec précaution.

Une étude de suivi de ces travaux est menée par le cabinet Reilé. Elle s'intéresse principalement à l'impact écologique des aménagements opérés grâce à des mesures hydrobiologiques (IBGN), de la chimie des eaux, ou de la turbidité (MES). Notre étude du charriage et des ajustements morphologiques mesurés suite aux aménagements vient compléter la caractérisation des impacts de l'arasement.

4 Méthodes

4.1 Suivi du transport de la charge de fond

Pour étudier les conséquences de la présence et de l'arasement du barrage de la Pierre-Glissotte du point de vue du transport grossier, un suivi individuel du mouvement des particules a été mis en place à l'aide de la technologie RFID (Radio Frequency Identification). Nous avons équipé de PIT tag (Passive Integrated Transponder) des particules prélevées aléatoirement sur plusieurs sites de suivi suivant la méthode développée pour la granulométrie de surface par Wolman (1954). L'objectif était de disposer de particules représentatives de la charge de fond occupant le lit.

Les sites de suivi ont été sélectionnés afin d'étudier au mieux les impacts de l'arasement et également de façon à représenter la diversité des situations hydrologiques existantes (Figure 4):

- Un site « non-influencé » à l'amont du complexe hydroélectrique (S6), dans le hameau des Mouilleferts. Sur ce tronçon, l'Yonne a une pente de 0,009 m/m et une largeur moyenne de 9,5 m. La granulométrie de surface est dominée par les cailloux et galets, avec un D₅₀ de 77 mm. Le tronçon est partiellement enroché sur chaque berge.
- Un site entre le barrage du moulin Blondelot et celui de la Pierre-Glissotte (S7). Il est situé dans le tronçon court-circuité du complexe et fortement influencé hydrologiquement. La pente y est importante (0,022 m/m) mais la largeur modeste (7 m). La granulométrie de surface est la plus

grossière de l'ensemble de nos sites ($D_{50} = 108$ mm) et le lit est occupé par de nombreux gros blocs (axe $b > 300$ mm). Quelques enrochements sont visibles sur l'une des deux berges en début de site.

- Un site dans ce qui constituait la retenue de la Pierre-Glissotte (S9). Les particules marquées ont essentiellement été injectées en queue de retenue et leur progression est suivie au sein du chenal en formation dans les anciens dépôts.
- Un site aval situé à un peu plus d'un kilomètre du barrage de la Pierre-Glissotte (S8). Sur ce site dit de Pré Bertrand, l'Yonne dispose d'une pente de 0,007 m/m pour une largeur moyenne de 8,5 m. Le D_{50} du site est de 83,5 mm et, sur les 70 premiers mètres du tronçon de suivi, on trouve de nombreux gros blocs dans le lit et sur les berges.

Les sites S6, S7 et S8 sont équipés de 100 traceurs : les 50 premiers injectés en octobre 2014 et les 50 autres en novembre 2015. Ils sont également équipés de sondes de pression de type Diver (Schlumberger) qui enregistrent la hauteur d'eau toutes les 15 minutes. Ces hauteurs ont été transformées en débit grâce à la station hydrométrique de Corancy située quelques kilomètres en aval (Figure 1). Dans l'ancienne retenue, le site S9 a été équipé de 200 traceurs en juillet 2015, juste avant le début de la vidange du lac. 70 nouveaux traceurs ont été réinjectés fin août 2016. Les déplacements des particules ont été relevés quatre (S6, S7, S8) et cinq fois (S9) entre leur injection et août 2016. Les débits de mise en mouvement de la charge de fond ont pu être approchés et la capacité de transport des différents sites étudiée.

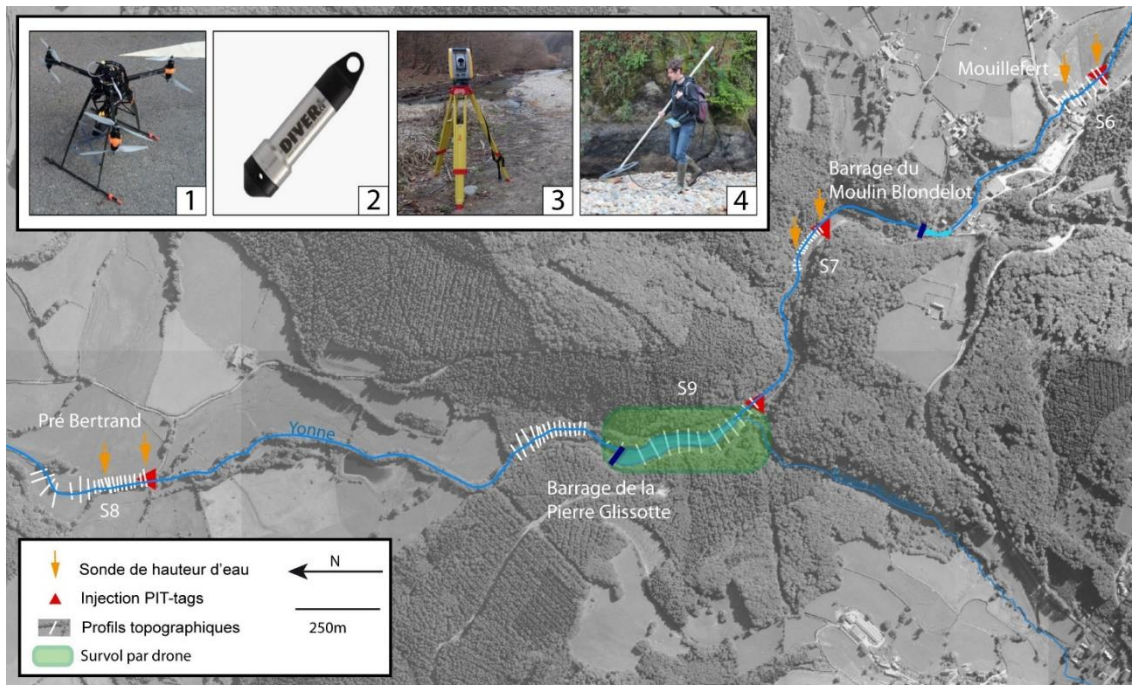


Figure 4 : Localisation des sites d'étude et des instruments de mesure utilisés : 1. drone hexacopter, 2. sonde de pression Diver, 3. station totale Trimble S6, 4. antenne de détection des PIT tags

4.2 Caractérisation morphologique du lit de l'Yonne

4.2.1 Levés topographiques à la station totale

La morphologie de chaque site de suivi du charriage a été caractérisée à l'aide d'une station totale de marque Trimble S6. Sur les sites 6,7 et 8, le profil en long et la géométrie en travers ont été mesurés avant les travaux d'arasement. De nouvelles campagnes seront effectuées entre les phases 1 et 2 de l'arasement et après la phase 2. Ainsi, en plus d'être essentielles à la compréhension des résultats du charriage, ces mesures permettront d'évaluer les ajustements morphologiques opérés par l'Yonne suite à l'arasement. Le site S9 a lui aussi fait l'objet de levés topographiques avant arasement. Le profil en long et 17 profils en travers ont ainsi été levés sur 400 mètres de tronçon en aval du barrage de la Pierre-Glissotte. Quelques mois après la réouverture partielle du barrage (mars 2016), 13 profils en travers ont été relevés dans l'ancienne retenue pour étudier la formation du nouveau chenal et quantifier la remobilisation des sédiments.

4.2.2 Reconstruction 3D du barrage de la Pierre-Glissotte par photogrammétrie *Structure from Motion* (SfM)

Afin d'évaluer les volumes mis en jeu lors de l'arasement du barrage et préciser nos relevés topographiques à la station totale, une reconstruction 3D de l'ensemble de la retenue a également été réalisée à partir de photographies aériennes prises par drone. Cette reconstruction nous permet d'établir le volume de sédiments présents dans la retenue avant le début de l'arasement, et le volume de sédiments mis en mouvement entre le début de l'arasement (juillet-août 2015) et la première campagne de photographies par drone (avril 2016). L'acquisition prochaine de nouvelles photographies permettra un suivi fin de l'évolution de l'Yonne dans ce secteur et des volumes de sédiments considérés.

L'acquisition des photographies a été effectuée les 19 et 20 avril 2016 avec un drone hexacoptère du Laboratoire de Géographie Physique de Meudon. Au total 9 vols ont permis de couvrir l'ensemble du site et d'obtenir 750 photographies avec une résolution de 0.86cm/pixel à 50m de hauteur. 17 cibles ont préalablement été disposées au sol et relevées à la station totale. Elles ont permis de géoréférencer le modèle 3D obtenu et d'évaluer la précision de la reconstruction.

La reconstruction est basée sur la méthode de photogrammétrie *Structure from Motion*. Cette nouvelle méthode, à la différence de la photogrammétrie classique, permet de s'affranchir de la connaissance a priori de la position de la caméra dans l'espace, rendant l'acquisition beaucoup plus aisée (Westoby *et al.*, 2012). Le logiciel Photoscan a été utilisé pour le traitement des photographies. Il permet d'obtenir un nuage de points en 3D (16 millions de points conservés après décimation du nuage de points) duquel est extrait un modèle numérique de surface (MNS) à très haute résolution (5cm) et une orthophotographie haute résolution. À la différence de la méthode Lidar, la méthode SfM ne permet pas de s'affranchir de la végétation, on ne peut donc pas parler de Modèle Numérique de Terrain (MNT). En avril 2016, à l'exception de très petites zones localisées principalement sur ses marges, la retenue avait été très peu recolonisée par la végétation. Les MNT et MNS étaient donc très proches. Lorsque ce n'était pas le cas, l'algorithme Canupo, développé par Brodinet *al.* (2012), a été utilisé pour filtrer les secteurs en question (arbres de grande taille notamment). Une fois ces résultats obtenus les cibles ont servi de points de contrôle pour évaluer la qualité de la reconstruction. Sur les 17 points de contrôle mesurés, l'erreur-type est en moyenne de 1cm en z et de 1.5cm en plan (Tableau 1).

Tableau 1 : Erreur type entre le MNS obtenu à partir de photographies aériennes et 17 points de contrôle mesuré à la station totale

17 points de contrôle	Erreur moyenne (cm)	Erreur-type (cm)	Erreur absolue moyenne (cm)
x	0.14	1.58	1.21
y	-0.24	1.37	1.01
z	0.44	1.04	0.77

4.2.3 Comparaison avec le profil de 1933

Afin d'évaluer l'évolution verticale de la rivière depuis la mise en service du barrage, nos relevés topographiques réalisés à la station totale et par photogrammétrie ont été comparés à un profil longitudinal de 1933. Ce profil a été levé par le Service du Nivellement Général de France pour le Service des Grandes Forces Hydraulique du Ministère de l'Agriculture. Ce profil fait partie d'un ensemble de levés réalisés au début du siècle dernier sur l'ensemble des grands cours d'eau français et n'est en conséquence pas très précis. Ils ont été réalisés à l'aide d'un tachéomètre d'environ 10 cm de précision et avec une densité de 4 points par kilomètre (Liébault *et al.*, 2013). Le barrage du Moulin Blondelot et de la Pierre-Glissotte ainsi que plusieurs ponts sont représentés sur le profil ancien et ont permis de caler le relevé de 1933 avec les nôtres. Le système de référence des altitudes ayant changé en 1969, les altitudes du profil des Grandes Forces Hydrauliques ont dû être corrigées à l'aide des tables de conversion de l'IGN pour les transposer dans le système actuel. Une erreur a également été calculée pour le profil ancien. Celle-ci correspond à la racine carrée de la somme quadratique de l'erreur associée à la précision de mesure (0,1m), de l'erreur associée à la localisation des points (20 m multiplié par la pente moyenne de l'Yonne) et de l'erreur associée à la hauteur d'eau au moment de la prise de mesure (0.3 m). Cette dernière composante du calcul d'erreur résulte du fait que le profil de 1933 renseigne la cote de l'eau alors que nos relevés renseignent la cote du fond du lit (Liébault *et*

al., 2013). Nous pouvons toutefois considérer que cette erreur est minime car la hauteur d'eau de l'Yonne est faible en période d'étiage (époque de l'année à laquelle les relevés de 1933 ont été effectués).

5 Résultats

5.1 Le transport sédimentaire autour des barrages de la Société Hydrotechnique de la Pierre-Glissotte

La comparaison des hydrogrammes entre le site de suivi amont (Mouillefert, S6) et celui en aval (Pré Bertrand, S8) du complexe hydroélectrique montre l'influence nulle du barrage de Pierre-Glissotte en termes d'hydrologie – en dehors des 54 m court-circuités par le canal de fuite de l'usine en aval immédiat de l'ouvrage (Figure 5). Malgré la défection des deux vannes de fond, le comblement sédimentaire de la retenue contraignait à une quasi-transparence liquide de l'ouvrage lors des épisodes de crue, le débit s'évacuant par le déversoir situé en rive droite du barrage. Ces conditions hydrologiques comparables en amont et aval des aménagements participent de l'homogénéité – relative - des résultats de suivi du charriage entre les deux sites.

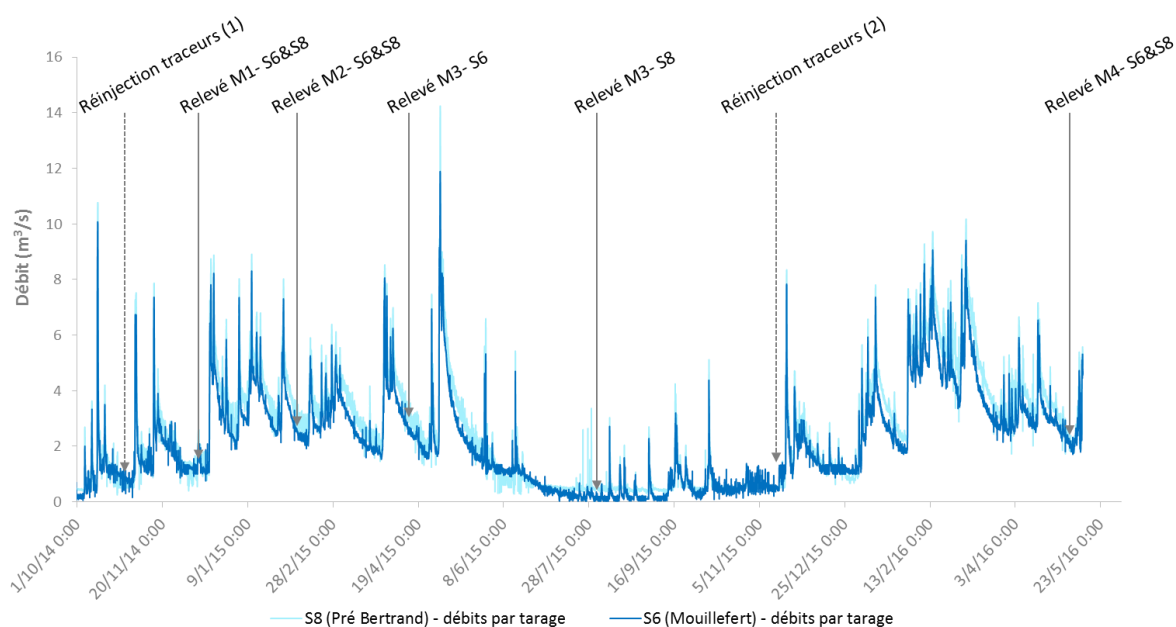


Figure 5: Hydrogramme et chronologie des relevés PIT tags sur les sites en amont (S6) et en aval (S8) du complexe de la Pierre-Glissotte

En dépit de quelques différences morphologiques (pente, largeur, profondeur pleins bords, D_{50} , etc.) influant sur la puissance de l'Yonne, un transport actif de la charge de fond a été mesuré en amont comme en aval. Les résultats cumulés, présentés ci-dessous (Tableau 2), aboutissent à un transport moyen de 44,8 m/an sur le site amont (S6) et 57,1 m/an sur le site aval (S8). En revanche, c'est sur le site amont qu'une compétence légèrement supérieure de l'Yonne a été observée. La puissance spécifique minimum requise pour la mise en mouvement des traceurs a été calculée à $65,9 \text{ W/m}^2$ à Mouillefert (S6) et $59,4 \text{ W/m}^2$ à Pré Bertrand (S8). Les débits nécessaires à l'atteinte d'une telle puissance – respectivement $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $7,86 \text{ m}^3/\text{s}$ – se sont produits durant l'équivalent de 2,5 jours à S6 et 3,2 jours à S8 au cours de l'année hydrologique 2014-2015. Ces conditions critiques pourraient toutefois être revues à la baisse – et à la hausse en termes de fréquence - si nous parvenons à réaliser d'autres relevés PIT tags à la suite de crues inférieures aux débits mentionnés.

Tableau 2 : Tableau comparatif du transport observé (valeurs absolues) sur les différents sites de suivi

Site de suivi	Distance moy (m)	Distance max (m)	Dimax mobilisé (mm)	$Q_{cr}(m^3/s)^*$	$\omega_{cr}(W/m^2)$	Q_{cr}/Q_{2ans}	Période
Mouillefert (S6)	61	115	148	7,5	65,9	0,59	Nov 14- mai 16
TCC (S7)	157,9	601,9	175	8,84	278,5	0,66	Nov 14-août 16
Ancienne retenue (S9)	114,6	452,8	147	3,1	29,7	0,21	Juil 15-juin 15
Pré Bertrand (S8)	77,7	291	122	7,86	59,4	0,50	Nov 14- mai 16

*Les valeurs de débits sont des valeurs critiques maximales et seront probablement revues à la baisse dans le futur. Elles correspondent au pic de crue le plus faible après lequel un relevé PIT tag a été effectué et une mobilisation des traceurs détectée.

Les résultats présentés dans ce tableau indiquent un charriage plus intense en aval (S8), mais ils doivent être fortement nuancés. En effet, les modalités de prospection ont beaucoup différencié suivant le site. Au-delà des 120 premiers mètres, le site amont est plus difficilement prospectable que le site aval à conditions hydrologiques égales. La pente s'accroît à l'aval d'un pont routier étroit et un substrat peu confortable s'est installé (« dallage » et blocs glissants) sur les 60 mètres suivants. Ces conditions de prospections « altèrent » les résultats du suivi PIT tag (aucun traceur retrouvé au-delà de 120 m), et cela va augmentant à mesure que le temps passe puisque les particules se dirigent vers cette zone moins favorable à la détection. En outre, quelques traceurs semblent « bloqués » temporairement à l'amont du pont routier évoqué. Les deux graphiques ci-dessous (Figure 6) tendent à montrer que les résultats sous-estiment les distances au site S6.

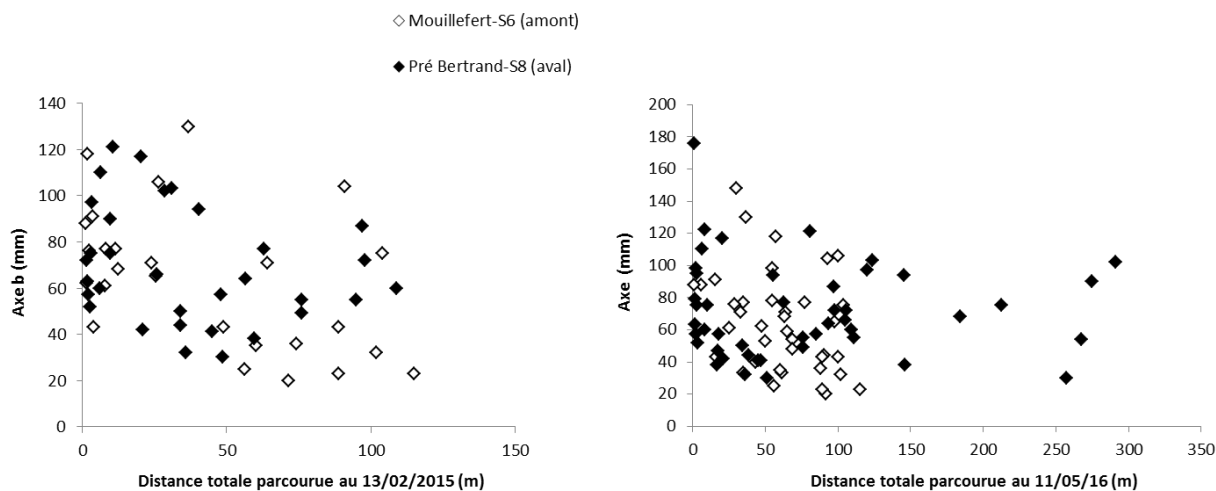


Figure 6 : Distances cumulées à Mouillefert (S6) et Pré Bertrand (S8) selon la dernière position connue, environ 3 mois (à gauche) et 16 mois (à droite) après la réinjection des traceurs

La figure montre que la différence de distance entre S6 et S8 se dessine avec le temps. Si 16 mois après leur réinjection, des traceurs de Pré Bertrand (S8) sont retrouvés sur un linéaire bien plus important qu'à l'amont (graphique de droite), les distances totales parcourues quelques mois seulement après la réinjection sont beaucoup plus homogènes (graphique de gauche). Or des crues de débits bien supérieures aux débits de mobilisation se sont produites après février 2015 et les puissances déduites sont quelque peu supérieures sur le site amont. Il ne semble ainsi pas falloir expliquer les différences de mobilité à « moyen terme » par

l'incapacité de la rivière à charrier les traceurs, mais avant tout par l'intervention de paramètres locaux de ralentissement de la charge (structure de pont) et les modalités de prospection (étendue, accessibilité, etc.).

Par ailleurs, il est aussi intéressant d'analyser les résultats mesurés sur le site aval (S8) de Pré Bertrand. Il est intéressant de noter que si de grandes distances sont relevées (36% des traceurs ont parcouru plus de 100 m), un certain nombre de traceurs n'ont pas ou peu bougé au 11/05/16 (14% à moins de 10 m). La présence par endroit de gros blocs dans le lit de la rivière pourrait éventuellement expliquer la difficile mise en mouvement de certains traceurs, de taille bien moindre (masquage). Une partie de ces gros blocs pourrait provenir des enrochements qui structurent le lit sur 70 mètres. Ces enrochements peuvent également jouer à l'inverse un rôle favorisant la mobilité des sédiments et les longues distances relevées. En effet, combinés à l'incision de la rivière depuis les années 30 (voir Figure 11), ces enrochements ont empêché l'érosion latérale et permis l'augmentation de la profondeur plein bord, accroissant ainsi la force tractrice du cours d'eau.

Bien que la comparaison entre S6 et S8 présente certaines limites, le taux de transport annuel dégagé sur chacun des deux sites témoigne dans tous les cas d'un charriage dynamique autour du complexe hydroélectrique de la Pierre-Glissotte, ce qui rend d'autant plus intéressante et préoccupante la question de la continuité sédimentaire à travers ces aménagements.

5.2 Les conséquences morpho-sédimentaires des aménagements hydro-électriques

5.2.1 Le TCC du Moulin Blondelot

Étant donné la taille et la configuration du Moulin Blondelot, on peut penser qu'il n'a jamais complètement interrompu le transit sédimentaire. Par contre, la déviation d'une partie du débit vers la centrale a pu jouer un rôle plus important. En crue, le débit transitant par le TCC peut en effet être amputé de $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce qui, rapporté à la taille du bassin, correspond à près de 20 % de la crue biennale à la station de Corancy. Afin d'évaluer l'impact de la prise d'eau, nous avons comparé les débits mesurés dans le TCC grâce à nos sondes Diver aux débits mesurés à la station de Corancy (Figure 7). Pour permettre cette comparaison, ces derniers ont été transformés en fonction de la taille du bassin versant au Moulin Blondelot (Bravard et Petit, 1997).

Entre la mi-juillet 2015 et le début du mois de mars 2016, le canal de dérivation a été déconnecté du barrage du Moulin Blondelot. La totalité du débit passait donc dans le TCC. Lorsque qu'on compare cette période avec celle qui précède et celle qui suit, on voit tout de suite l'influence qu'à la prise d'eau sur les écoulements. La comparaison des pics de crue doit toutefois être considérée avec précaution, car la station hydrométrique de référence (Corancy) ne présente pas toujours une proportionnalité cohérente entre les débits extrapolés et les hauteurs d'eau enregistrées sur le site du TCC. Par exemple, sur les deux hydrogrammes présentés ci-dessous, le débit de crue enregistré à Corancy le 29 janvier 2015 est excessif, même extrapolé par taille de bassin versant (en bleu), par rapport à celui déduit depuis les hauteurs d'eau (en rouge). À l'inverse, on observe parfois des débits calculés par tarage anormalement supérieurs à ceux extrapolés, à l'image de la crue du 20 novembre 2015. Ces anomalies s'expliquent par l'apport d'un affluent, le Touron (bassin versant de 17 km^2), qui se jette dans l'Yonne juste à l'aval de site du Pré Bertrand. Bien que le Touron soit non jaugé, tout laisse à croire qu'il n'a pas toujours un fonctionnement hydrologique identique ou du moins synchrone avec celui de l'Yonne. Ainsi des hauts débits enregistrés à la station de Corancy peuvent essentiellement venir du Touron, et ainsi ne pas se manifester sur l'Yonne en amont de la confluence. Inversement, des hauteurs d'eau importantes sur l'Yonne peuvent ne pas être associées à un débit fort sur le Tauron. Dans ce dernier cas de figure, il est envisageable d'extrapoler le débit enregistré à Corancy sans intégrer la taille de bassin du Touron. Mais cela implique de considérer que l'apport du Touron est nul alors qu'il est peut-être seulement un peu en dessous de la proportionnalité par rapport au débit de l'Yonne. L'opération contraire est encore plus compliquée. Face à ces incertitudes, il a été pris soin de construire des courbes de tarage avec des débits extrapolés de référence dont la cohérence avec les hauteurs d'eau enregistrées sur le site de suivi a été vérifiée.

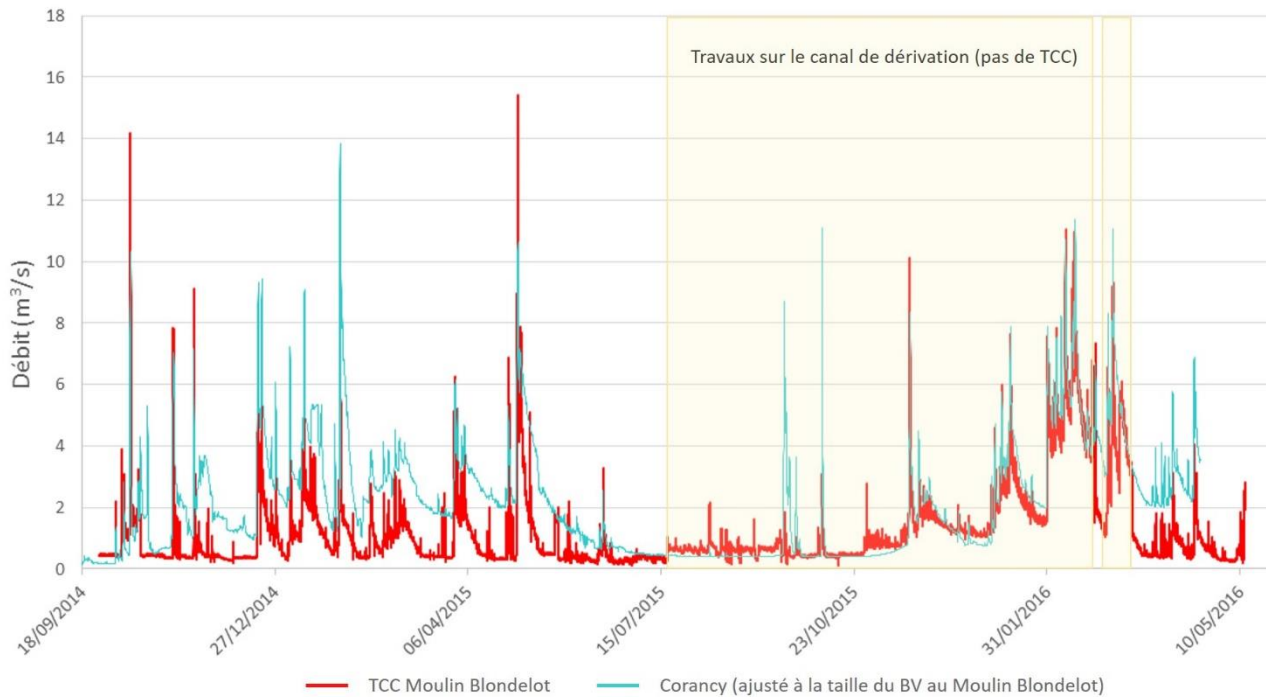


Figure 7 : Évolution du débit de l'Yonne dans le TCC selon les sondes de hauteur d'eau du site de suivi S8 et selon la station de Corancy

Bien que les pentes soient fortes, l'influence hydrologique de la dérivation au barrage du moulin Blondelot n'est pas négligeable et semble susceptible de ralentir le transport sédimentaire dans le TCC. La puissance à plein bord y est de 305 W/m^2 pour un D_{50} de 108 mm et un D_{90} de 347 mm. La rugosité créée par la présence de gros blocs et d'affleurements de roche-mère dans ce tronçon encaissé ne semble pas exercer une influence trop importante sur le transport. Très peu de traceurs ont été retrouvés bloqués derrière un gros élément, et l'on n'observe pas de pavage qui aurait pu se mettre en place autour de ces gros blocs. Ce constat peut notamment s'expliquer par la quantité importante de particules de taille intermédiaire (entre 8 et 150 mm) dans la couche de surface, qui réduit les possibilités de fixation du lit par les blocs. Les résultats de suivi du transport (Figure 8) confirment d'ailleurs qu'il semble bien y avoir une fourniture sédimentaire conséquente depuis l'amont, soutenant l'idée que le barrage du Moulin Blondelot présente un impact limité sur la continuité. En effet, l'intensité du charriage observée implique qu'il existe un renouvellement suffisant du stock sédimentaire pour qu'il n'y ait pas de déficit en charge moyenne. Entre novembre 2014 (réinjection le 30/10/2014) et juillet 2016, nous avons mesuré un déplacement moyen de 157,9 m ($94,74 \text{ m/an}$). Or il est très probable que ce chiffre soit largement sous-estimé. Beaucoup de traceurs n'ont pas été retrouvés après août 2015 et nous disposons donc d'une distance qui, en réalité, n'a été parcourue que sur 9 mois seulement (novembre 14-août 15) pour la majorité des traceurs. En outre, sur ce site où les conditions hydrauliques de prospection sont souvent favorables et les possibilités d'enfouissement des traceurs faibles, il est fort probable qu'ils n'aient pas été détectés car ils auraient rapidement dépassé l'étendue de la zone de prospection. En juillet 2016, un relevé effectué sur une distance plus longue que lors des précédentes campagnes a en effet permis de retrouver des traceurs ayant parcouru plusieurs centaines de mètres. D'autres ont même été retrouvés en juin 2016 dans l'ancienne retenue de la Pierre-Glissotte (site S9) plus de 500 m en aval du site de suivi du TCC (S8).

Le débit minimal de mise en mouvement sur ce site est de $8,84 \text{ m}^3/\text{s}$, pour une puissance critique de $278,5 \text{ W/m}^2$, mais celui-ci ne peut être considéré comme débit critique réel. Il paraît à la fois trop élevé ($0,66 Q_{2\text{ans}}$) et trop peu fréquent - atteint ou dépassé l'équivalent d'un peu plus de 2 jours entiers entre novembre 2014 et juillet 2016 (Tableau 2). Des relevés PIT tags devront être réalisés après de plus petites crues que celles suivies jusqu'à présent, afin de se rapprocher des véritables conditions critiques de mise en mouvement.

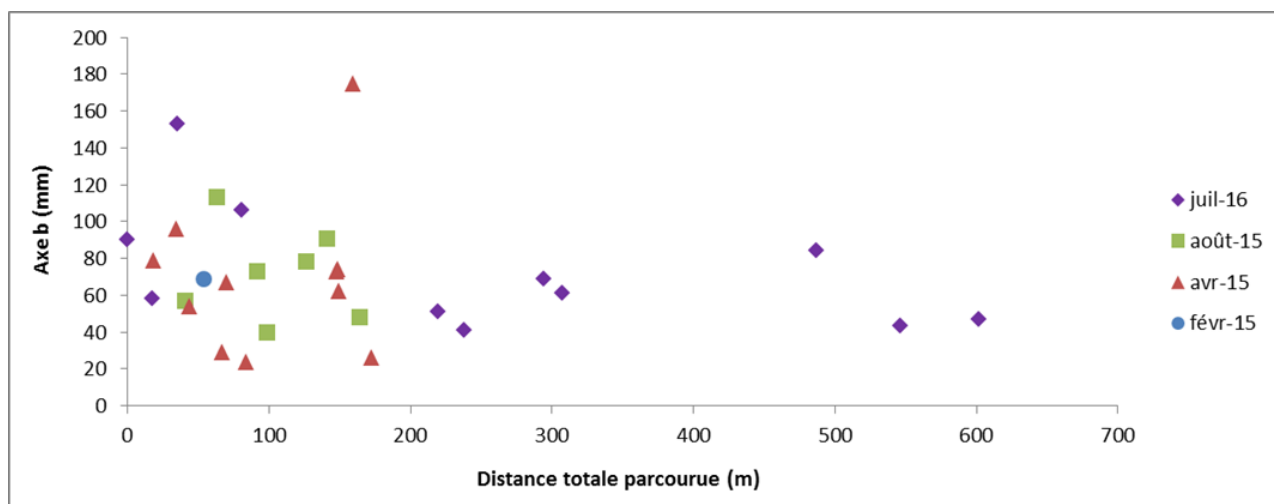


Figure 8 : Distance cumulée des traceurs dans le TCC (site 7), entre novembre 2014 et juillet 2016, d'après leur dernière position connue

La dérivation du débit depuis le barrage du moulin Blondelot, si elle n'empêche pas l'existence d'un charriage dynamique, semble toutefois bel et bien ralentir le transport. C'est ce que tend à démontrer la comparaison des résultats des suivis PIT tag par période (Tableau 3). En effet, la vitesse moyennede déplacement des particules au cours des 9 mois précédents le début des travaux d'arasement du barrage (dérivation fonctionnelle) est de 114,5 m/an. Alors que la vitesse moyenne s'élève à 190,4 m/an sur la période août 2015 – juillet 2016. Durant environ 7 des 11 mois de cette seconde période, le débit n'était pas dérivé, notamment durant les hauts débits de l'automne et de l'hiver.

Tableau 3 : Tableau comparatif du transport grossier mesuré dans le TCC selon la fréquence de fonctionnement de la dérivation depuis le barrage du Moulin Blondelot

Période	Distance moy (m)	Distance max (m)	Di_max mobilisé (mm)
Nov 14-Août 15 (9 mois) <i>Dérivation fonctionnelle jusqu'au 20 juillet 2015</i>	85,9	186	175
Août 15 - Juillet 16 (11 mois) <i>Dérivation non-fonctionnelle de août 2015 à juillet 2016</i>	173,5	486	153

Du 1er novembre au 8 août 2015, le débit critique de $8,84 \text{ m}^3/\text{s}$ a été atteint ou dépassé environ 10h30, tandis que du 9 août 2015 et 7 juillet 2016, cette durée « morphogène » est de 46h30. Même si l'on ne se cantonne plus uniquement à la période de suivi des traceurs – réinjecté le 31/10/2014 – et que l'on fait démarrer la première période le 26 septembre 2014 (début de fonctionnement des sondes de hauteur d'eau), les conditions critiques restent plus rarement atteintes (18h45 environ) que lors de la période sans dérivation. L'étude des pics de crues permet d'affiner ces résultats : les débits égalant ou dépassant $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (soit 1,13.Qcr) se sont produits environ 9h45 pour la première période (15h15 avec octobre), contre 12 h15 pour la seconde. De plus, les pics les plus importants de la période avec dérivation ($8,85 \text{ m}^3/\text{s}$; $9,10 \text{ m}^3/\text{s}$; $15,42 \text{ m}^3/\text{s}$) ont atteint des valeurs relativement proches de ceux de la seconde période ($10,5 \text{ m}^3/\text{s}$; $10,8 \text{ m}^3/\text{s}$; $11 \text{ m}^3/\text{s}$). Ceci indique que les différences de taux de transport entre les deux périodes se produiraient principalement autour des conditions légèrement supérieures aux conditions critiques. Ces débits situés entre $8,84 \text{ m}^3/\text{s}$ et $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ont eu lieu environ 45 minutes durant la première partie de l'étude (3h si l'on intègre le mois d'octobre 2014) alors qu'ils se sont produits durant 34h sur la seconde période. Afin d'évaluer l'impact de la dérivation, on peut également considérer la durée cumulée des débits compris entre $6,54 \text{ m}^3/\text{s}$ et $8,84 \text{ m}^3/\text{s}$, autrement dit les débits qui sans la dérivation du moulin Blondelot ($2,3 \text{ m}^3/\text{s}$) auraient été morphogènes ($> 8,84 \text{ m}^3/\text{s}$). Cette durée atteint 50h30 durant la première période. Si l'on considère ces débits naturalisés, on totalise une durée de 61h de débits morphogènes durant la première période contre 63h durant la seconde. On voit donc que cette dérivation du débit joue un rôle important sur le transport en

supprimant les petits débits morphogènes qui jouent un rôle non négligeable dans le déplacement de la charge de fond.

5.1.2 Le comblement de la retenue du barrage de la Pierre-Glissotte

Le barrage était en cours de comblement depuis une vingtaine d'années au moment où ont commencé les travaux d'arasement. Suite à la première phase du démantèlement du barrage, un chenal s'est rapidement créé en incisant les dépôts de l'ancienne retenue. Les coupes ainsi dégagées ont permis de caractériser la nature des sédiments piégés dans le réservoir. Quatre principaux types de dépôt ont pu être identifiés (Figure 9) : (A.) en queue de retenue, principalement des alluvions très grossières (galet, gravier et sable grossier) ; (B.) sur une épaisseur croissante d'amont vers l'aval, des niveaux de sable fin à grossier ($D_{50} = 175 \mu\text{m}$) entrecroisés avec des dépôts (C.) beaucoup plus fins ($D_{50} = 21 \mu\text{m}$) et très riches en matière organique (feuille, brindille) ; (D.) sous ces dépôts, des sédiments plus fins encore ($D_{50} = 14 \mu\text{m}$) et très compacts.

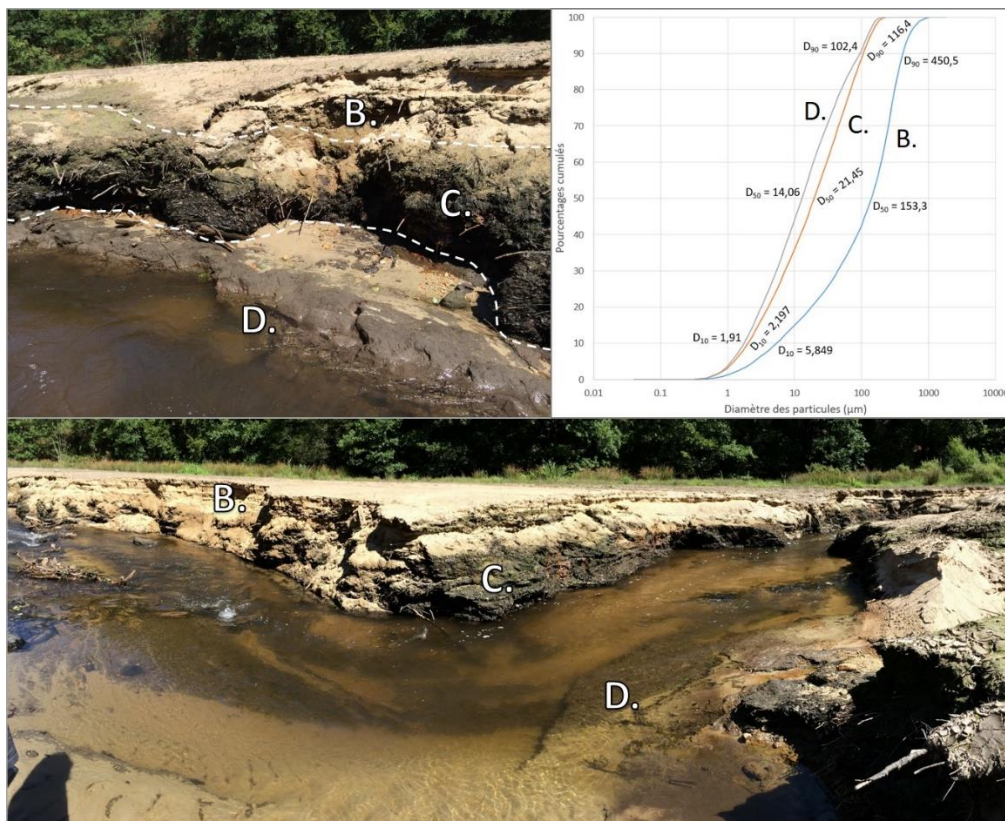


Figure 9 : Composition granulométrique du remplissage de la retenue du barrage de la Pierre-Glissotte

Les dépôts B. et C. sont entrecroisés et se sont manifestement déposés en alternance. Ils reposent sur le niveau D. à la surface duquel on trouve de nombreuses souches d'arbres coupés à leur base. Ces dernières indiquent que ce niveau correspond au toit des dépôts mis en place lors de la première phase de fonctionnement du barrage (1927-1955). Entre 1955 et 1985, l'ancienne retenue s'est en effet entièrement reboisée et les arbres ont dû être coupés lors de la remise en eau de la retenue. Le Modèle Numérique de Surface réalisé à l'aide du drone a été utilisé pour relever l'altitude de ce dépôt, de même que l'altitude du toit du remplissage sédimentaire de la seconde phase de fonctionnement du barrage (1985-2015). L'épaisseur ainsi obtenue, rapportée à la surface du lac, a alors permis de calculer que, depuis 1985, 18600 m³ de sédiment et de matière organique ont été piégés dans la retenue. Parmi ce volume de sédiment, il a été estimé qu'une quarantaine de pourcents du remplissage correspondaient au sable (B.) et le reste aux matériaux de décantation très riche en matière organique (C.). La teneur en MO de ces derniers a été mesurée par perte au feu. Elle est supérieure à 25 % du poids de l'échantillon. Dans le reste de l'analyse, ces dépôts C. ne seront pas considérés comme appartenant à la charge de fond et seront donc soustraits du volume total piégé dans la retenue.

La charge de fond piégée dans la retenue provient bien sûr de l'Yonne mais également du Ruisseau des Abattoirs qui se jette juste à l'aval du canal de décharge de la centrale du Moulin Blondelot(Figure 2). Ce dernier a un bassin versant de 0,8 km² et une pente moyenne de 0,12 m/m. Il présente toutes les caractéristiques d'un déséquilibre hydromorphologique très actif. Son lit s'est fortement incisé dans la couverture superficielle du versant (colluvions grossières et arène granitique d'altération) pour former une ravine qui peut atteindre 4,6 m de profondeur et 11,5 m de largeur (Figure10). Ce ravinement est très marqué dans les 650 premiers mètres du cours (en moyenne 6,5 m de largeur et 2 m de profondeur) puis se réduit progressivement jusqu'à la confluence avec l'Yonne (3,7 m et 0,86 m de largeur et profondeur moyenne). Ce déséquilibre est la conséquence des rejets d'eau pluviale de la ville de Château Chinon. Une partie du réseau pluvial collectif de la ville se déverse en effet directement dans le ruisseau des Abattoirs en trois points localisés dans la partie supérieure du bassin. D'après les photographies aériennes, le ravinement apparaît dans le courant des années 1990 et serait la conséquence de plusieurs aménagements de la ville (création d'un lycée agricole et d'un lotissement au début de la décennie puis d'un parking et de plusieurs lotissements au début des années 2000). Bien que l'échelle des photographies aériennes ne permette pas d'analyse fine de l'évolution de la ravine, on voit clairement que le ruisseau est à peine visible sur les photos jusqu'en 1993 et que les cicatrices d'érosion n'apparaissent que sur la photo suivante, en 1997. La ravine est très visible sur les photographies de 1998, 2002 et 2007.

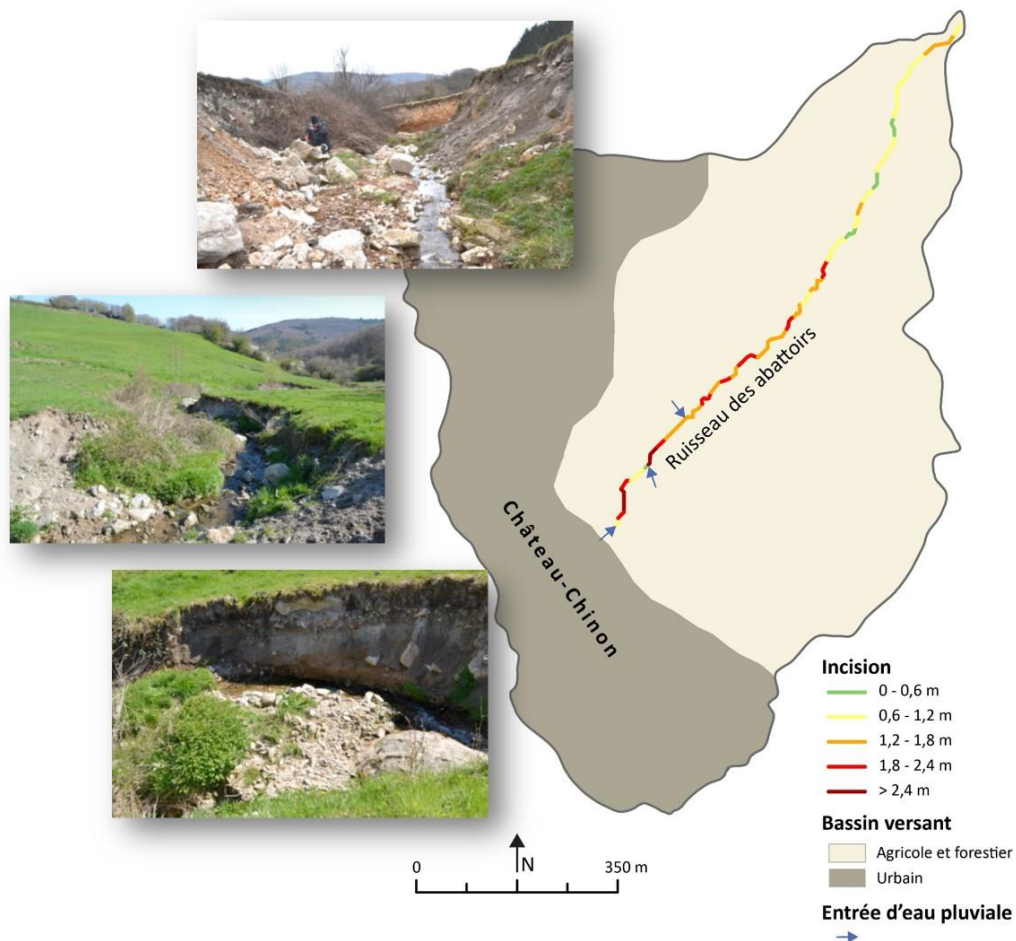


Figure 10 : Ravinement du ruisseau des Abattoirs en contrebas de la ville de Château-Chinon

44 profils en travers ont été réalisés au télémètre laser le long du ruisseau et ont permis d'estimer le volume érodé dans la ravine. Sur les 1200 m que compte le cours d'eau entre Château Chinon et sa confluence avec l'Yonne, l'analyse des profils indique que 7700 m³ de sédiment ont été évacués vers le réservoir de la Pierre-Glissotte. Une partie de ce volume (2050 m³) a été mécaniquement retirée du réservoir et stockée sur le versant. Depuis la seconde moitié des années 1990, c'est donc 5650 m³ de sédiment provenant du Ruisseau des Abattoirs qui ont contribué au comblement de la retenue. Cette valeur surestime probablement légèrement le volume effectivement érodé puisqu'elle ne tient pas compte du volume du chenal existant avant le début de l'incision de la rivière suite à l'augmentation des entrées d'eau de pluie en provenance de Arasement du barrage de la Pierre-Glissotte

l'agglomération de Château-Chinon.

5.2.3 Les conséquences de la retenue de la Pierre-Glissotte sur l'évolution du profil en long

Le barrage de la Pierre-Glissotte a fonctionné en plusieurs temps. De 1923-27 jusqu'en 1955 puis de 1985 à 2002, les vannes de fond étaient fonctionnelles (au moins pour l'une d'entre-elles). Une partie de la charge pouvait donc transiter à travers la retenue. Entre 1955 et 1985, suite à l'incendie de la centrale, le barrage était transparent et le fond de vallée s'est entièrement reboisé. Depuis 2002 jusqu'au début des travaux en juillet 2015, seule la charge en suspension pouvait franchir la retenue lors des événements de crue, la totalité de la charge de fond était piégée.

La figure 11 présente l'évolution verticale du profil longitudinal de la rivière depuis le barrage du Moulin Blondelot jusqu'au lieu-dit de Pré Bertrand. Si l'on décompose le profil, on constate tout d'abord un atterrissement de 300 m de long qui s'est déposé en queue de retenue. Il est composé de charge grossière provenant du TCC du Moulin Blondelot et dépasse par endroit 1 m d'épaisseur. À l'aval immédiat de la retenue de la Pierre-Glissotte, les profils en long de 1933 et 2015 sont confondus, la rivière ne semble avoir subi aucune évolution apparente. Cette partie du profil correspond au tronçon qui était court-circuité jusqu'à l'installation de la nouvelle centrale au pied du barrage en 1985. Les crues y étaient donc moins puissantes, empêchant probablement l'ajustement morphologique du lit.

La principale conséquence de l'interruption du transit sédimentaire se manifeste quelques centaines de mètres plus en aval. Sur près de 2 km à partir de la fin de l'ancien TCC de Pierre-Glissotte, l'Yonne s'est en effet fortement incisée. Le lit se trouve en moyenne 120 cm plus bas qu'en 1933 et, par endroit, plus de 180 cm. La hauteur de berge est passée d'une moyenne de 0,9 m à plus de 2 m. Nous ne disposons pas de relevé topographique du lit entre les points kilométriques 1,5 et 2,5 (Figure 11) mais nos observations de terrain ont montré que le lit de la rivière avait des caractéristiques en tout point semblables à celles du lit de l'Yonne en aval du PK 2,5 où l'incision a été mesurée à la station totale. Les profils du lit et des berges ont dès lors été prolongés vers l'amont en conservant la pente moyenne mesurée à l'aval (traits en pointillés sur la Figure 11).

Dans la retenue, le niveau de comblement relevé par photogrammétrie a été figuré ainsi que le toit de la sédimentation de 1955. Le calcul du volume de la partie supérieure du remplissage a été décrit plus haut, il est de 18600 m³. De la même manière, l'utilisation des profils en long historiques a permis de reconstituer le volume de sédiment stocké entre 1923 et 1950. En recalant ces profils topographiques historiques dans le référentiel topographique actuel, nous avons calculé le volume de sédiments entre le profil théorique pré-barrage et le profil de plaine alluviale installée à partir des années 1950. On obtient ainsi un volume de 24 000 m³. Ce dernier est sans doute surestimé car à sa construction le barrage a été installé sur un seuil rocheux que nous ne pouvons pas localiser avec précision.

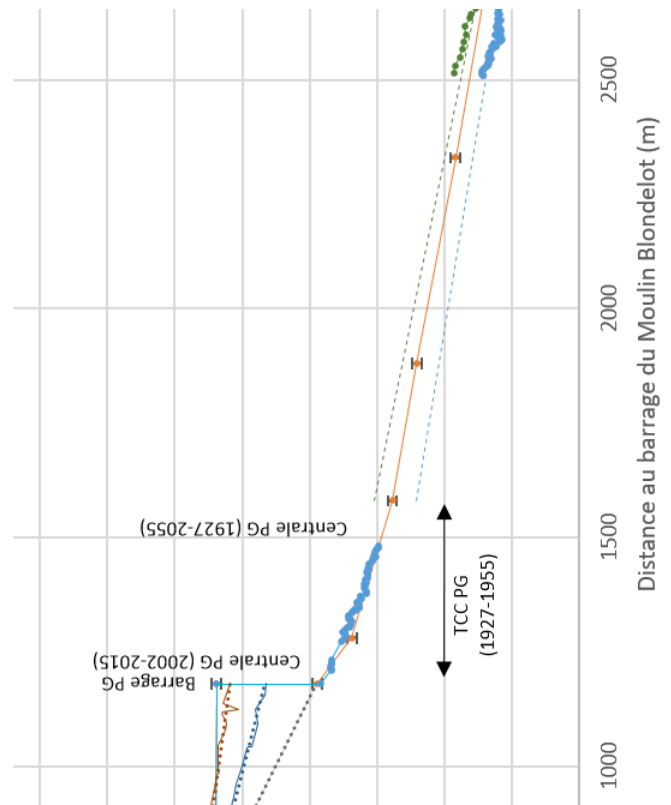


Figure 11 :Évolution du profil en long de l'Yonne depuis 1933

5.3L'ouverture du barrage et ses conséquences immédiates

La première phase des travaux a débuté en juillet-août 2015 par la vidange de la retenue puis la déconstruction des 3 m supérieurs du barrage. L'idée du maître d'ouvrage était d'opérer les travaux en deux phases pour laisser sécher les sédiments et ainsi réduire au maximum la réinjection des sédiments vers l'aval. Malheureusement, les choses ne sont pas déroulées comme prévues et durant les premiers jours de la vidange un volume important de sédiments non stabilisés a été remobilisé entraînant une augmentation importante du taux de MES en aval du barrage et provoquant une mortalité importante dans la pisciculture de Corancy. Le lit de la rivière a été par endroit couvert par plusieurs dizaines de centimètres de matériaux fins qui ont engendré une perte importante de biodiversité (colmatage des sites de reproductions des salmonidés et réduction de l'accès à la nourriture pour les poissons). Une analyse de l'eau et des sédiments réalisée par les services de l'état n'a révélé aucune pollution.

À la suite de cet incident, un arrêté préfectoral daté du 8 août 2015 a modifié le calendrier des travaux pour accélérer le déroulement de la première phase : suppression de la période de séchage des sédiments ; ouverture d'un pertuis en rive droite (sur les 3 m supérieurs du barrage) pour évacuer le plus rapidement possible un maximum des matériaux mobilisables de l'ancienne retenue et déconstruction de la partie supérieure du barrage. L'arrêté a également imposé la construction d'un bassin de décantation temporaire à l'aval du barrage et d'un merlon dans l'ancienne retenue pour limiter l'érosion des sédiments les plus fins accumulés à proximité du barrage.

Ce nouveau calendrier a engendré une évolution très rapide de l'ancienne retenue (Figure 12). Un chenal s'est tout de suite formé puis s'est progressivement incisé jusqu'à atteindre le niveau plus compact de remplissage de 1927-1955 (niveau D. sur la figure 9). Le lit s'est alors progressivement élargi par érosion latérale : 11,5 m de largeur moyenne le 01/10/15 et 16 m le 20/04/16. Au début de l'année 2016, une large zone composée uniquement de matériaux fins riches en matière organique située au centre de la retenue s'est affaissée et a été en partie évacuée par la rivière. Ce glissement a été favorisé par une teneur en eau toujours très importante dans les sédiments plusieurs mois après la vidange.



Figure 12 :Évolution du chenal en formation dans l’ancienne retenue de la Pierre-Glissotte (vue du barrage vers l’amont)

Nous avons calculé le volume de sédiment évacué lors de ces premiers mois de travaux à partir du MNS réalisé en avril 2016 (Figure 13). Ne disposant pas de la topographie de la retenue juste avant la vidange, le chenal nouvellement ouvert a été virtuellement « comblé » et le volume que représente ce comblement a été calculé. Pour ce faire, la pente de la vallée a été annulée en utilisant la pente moyenne du fond du chenal. Une fois le MNS sans pente obtenu, un plan dont l’altitude correspond à celle du niveau plein bord a été créé (Thommeret *et al.*, 2016). En soustrayant le plan à plein bord du MNS sans pente, le volume de sédiment évacué entre juillet 2015 et avril 2016 a été estimé. Il est de 9600 m³ soit un peu plus de 50% du remplissage depuis 1985.

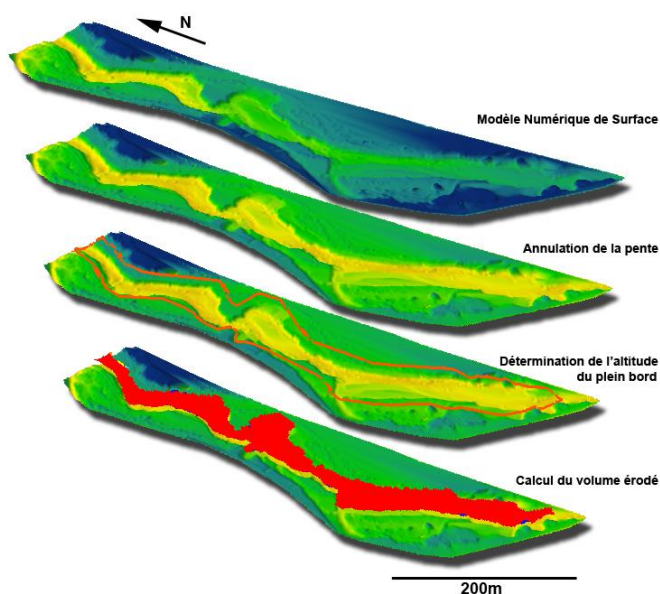


Figure 13 : Calcul de volume de sédiment érodé entre juillet 2015 et mai 2016 à partir d’un modèle numérique de surface réalisé à l’aide photographies aériennes prises depuis un drone

5.4 La remise de la charge de fond au sein de la retenue

Cinq relevés de déplacements des traceurs ont été effectués entre septembre 2015 et juin 2016 sur le site S9. Le graphique ci-dessous (Figure 14) donne à voir la chronologie des relevés par rapport aux valeurs de débits Arasement du barrage de la Pierre-Glissotte

estimés à hauteur de ce site 9. Jusqu’au 12 mai 2016, ces débits sont ceux calculés au site S7 à partir des hauteurs d’eau enregistrées par les sondes Diver équipant le site. Le site S7 est localisé quelques centaines de mètres en amont, et entre S7 et S9, aucun affluent important ne vient modifier l’hydrologie. Du 12 mai 2016 au 30 juin 2016, les valeurs de hauteurs d’eau de S7 n’étant pas disponibles, nous avons estimé les débits au site de la Pierre-Glissotte directement à partir des débits mesurés à la station hydrométrique de Corancy située quelques kilomètres en aval. La formule d’extrapolation déjà évoquée plus haut est celle présentée par Bravard et Petit (1997), utilisant la taille de bassin versant. Pour les débits obtenus supérieurs à 2,6 m³/s nous avons soustrait 2,3 m³/s, correspondant au débit maximum dérivé depuis le Moulin-Blondelot. Les valeurs de débit mentionnées dans ce chapitre doivent être considérées avec précaution. Aux incertitudes liées à l’extrapolation des débits depuis la station hydrométrique de Corancy s’additionnent en effet les approximations associées au retrait du débit dérivé.

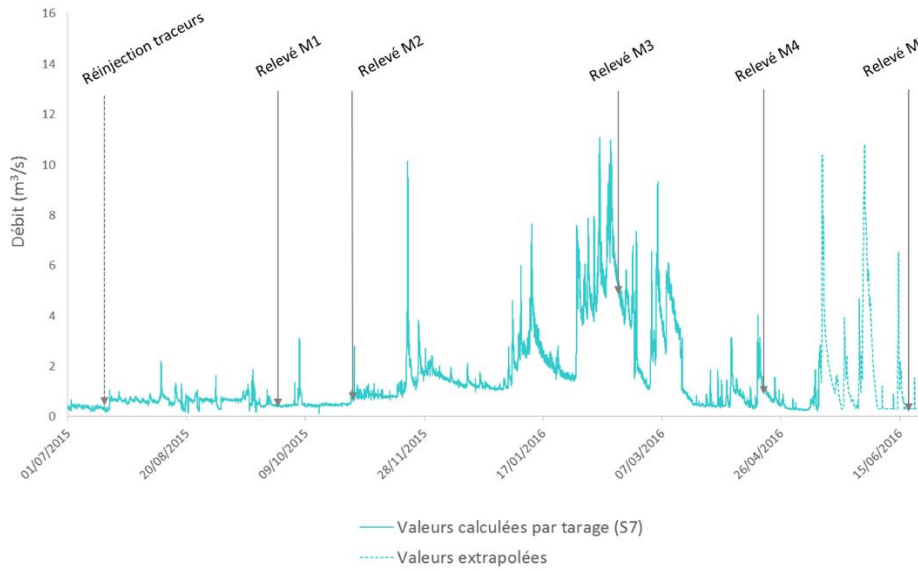


Figure 14 : Hydrogramme et chronologie des relevés PIT tag dans l’ancienne retenue de la Pierre-Glissotte (S9)

Comme l’indique la Figure 15, nous avons été en mesure de réaliser des relevés à la suite de pics de crue d’intensités diverses. Deux relevés des déplacements des traceurs ont rapidement été effectués suite à la première phase d’arasement, l’un fin septembre et l’autre fin octobre 2015, soit respectivement 2 et 3 mois après la vidange du réservoir. Le graphique ci-dessous présente les distances parcourues avant chacun de ces relevés, soit les distances parcourues entre le 18/07/15, date de la première réinjection, et le 30/09/15 (M1) et les distances parcourues entre le 30/09/15 et le 29/10/15 (M2).

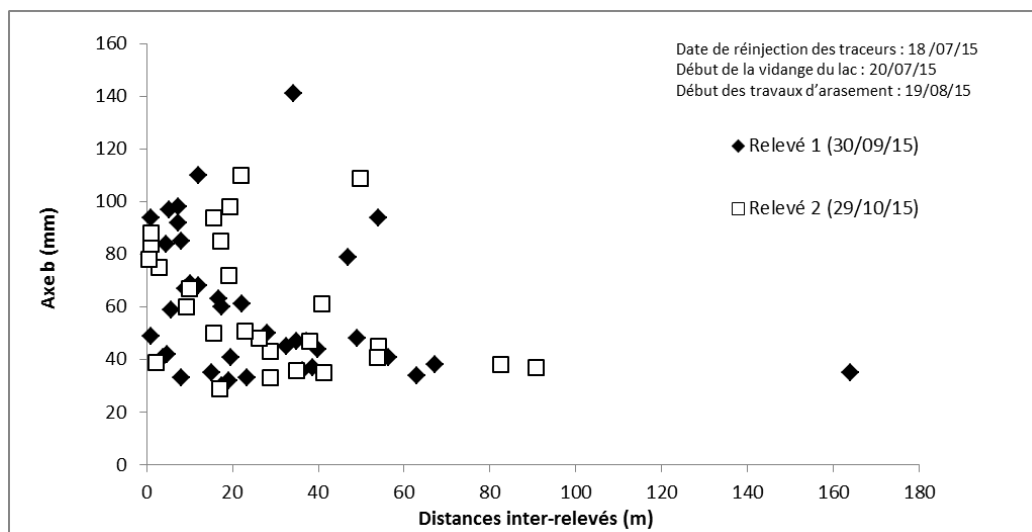


Figure 15 : Distances inter-relevés parcourues par les traceurs dans l’ancienne retenue de la Pierre-Glissotte (S9)

La Figure 15 témoigne de la réactivation très rapide du transit sédimentaire à la suite la première phase d'arasement. Chacun des deux relevés exposés a été précédé d'une seule crue, d'une durée et d'une intensité relativement faible : si l'on se réfère la valeur de la crue biennale, la première a atteint un débit maximal équivalent à $0,11Q^{2ans}$ et la seconde $0,17Q^{2ans}$. Associés aux mesures morphométriques du lit réalisées lors des campagnes topographiques, ces débits confèrent à la rivière une puissance respective de 20,8 et 29,7 W/m². Il ne peut s'agir ici que d'estimations car la largeur du lit en formation évolue très rapidement. La largeur moyenne du lit utilisée pour calculer la puissance est celle mesurée le 1^{er} octobre 2015 sur quelques sections en travers ; la valeur de pente utilisée est celle mesurée en avril 2016 (levés par drone), mais elle devait être un peu plus élevée en septembre/octobre 2015, le processus d'érosion régressive depuis le barrage n'étant encore qu'à ses débuts. Malgré ces incertitudes, les résultats des deux premiers relevés restent surprenant par rapport à la valeur des pics de crue évoqués ci-dessus. En effet, les distances moyennes (M1: 26,8 m ; M2: 27,8 m) et maximales (M1: 163,9 m; M2: 90,8 m) ainsi que la compétence de l'Yonne se sont avérées importantes (M1_{dimax}: 141 mm ; M2_{dimax}: 110 mm). Le départ important de sédiments malgré de faibles débits pourrait s'expliquer pour le premier relevé par le fait que les traceurs n'aient pas été insérés dans une couche de fraction granulométrique similaire au moment de leur réinjection. En effet, au cours des premiers mois, les traceurs ont évolué dans un lit composé de charge plus fine, des sables majoritairement. Les traceurs ont pu dès lors bénéficier de l'effet de protrusion qui aurait facilité leur mobilité. Ce n'est qu'au bout de quelques mois que le lit est redevenu caillouteux. Bien que le D₅₀ du lit de l'Yonne dans la retenue continue à augmenter (37 mm en février 2016, 54 mm en août 2016), il est resté inférieur à la taille moyenne des traceurs (52 mm) jusqu'en mai 2016 (45 mm). En outre, cet environnement alluvial caillouteux est lui-même très mobile. Ces sédiments tout comme les traceurs, récemment injectés, sont ainsi peu imbriqués et très disponibles pour un éventuel charriage. Enfin, la morphodynamique de l'Yonne suivant la phase 1 de l'arasement du barrage contribue très sûrement à expliquer les grandes distances des traceurs : l'incision rapide du lit remontant vers l'amont a mené à une augmentation de la pente et à une destabilisation du lit toutes deux favorables à une mobilisation et un transport actifs des sédiments.

Les conditions géomorphologiques décrites ci-dessus ont bien sûr dû influencer le charriage au-delà du premier relevé (M1). Toutefois, l'argument doit être nuancé car l'analyse du premier relevé montre que les traceurs réinjectés dans la partie amont de la queue de retenue, où la couche de surface demeurait caillouteuse, ont eux aussi été majoritairement mobilisés dès la première crue. Aussi, en vue d'améliorer la pertinence de nos conditions critiques, nous avons considéré comme valeur de débit critique celle du pic de la crue ayant précédé le second relevé, soit 3,11 m³/s. Entre le premier juillet 2015 et le premier juillet 2016, l'Yonne a atteint cette valeur environ 13 % du temps, autrement dit la mise en mouvement des traceurs a été susceptible de se produire au moins 47,4 jours/an.

Aujourd'hui l'ancienne retenue fait partie du TCC puisque le canal d'amenée a été allongé jusqu'à la nouvelle centrale. Il convient donc de considérer la saison hydrologique septembre 2014- septembre 2015, durant laquelle la dérivation du Moulin Blondelot a fonctionné normalement jusqu'au 20 juillet 2015. Le nombre de jours/an au cours desquels le débit critique est atteint ou dépassé n'est alors plus que de 11,5. Si la morphologie du lit n'évolue pas durant la seconde phase de l'arasement du barrage et les mois qui suivront, c'est cette fréquence de mobilisation qui devra être considérée.

La Figure 16 fournit une idée de la distance parcourue par les traceurs depuis leur injection. Il est à noter que les distances réellement parcourues puissent être légèrement supérieures pour une partie des traceurs qui n'ont pas été retrouvés au dernier relevé de juin 2016. Il est par exemple assez probable que des traceurs détectés la dernière fois en octobre 2015 et ayant jusqu'alors parcouru plus de 100 mètres, aient continué à avancer lors des crues hivernales et printanières. Une partie des traceurs disparus ont toutefois pu être enfouis dans la masse sédimentaire remobilisée suite à l'ouverture du barrage. En effet, dans ce contexte d'évacuation massive de sédiments fins occupant l'ancienne retenue et de fourniture importante depuis l'amont en éléments grossiers, des traceurs peuvent facilement être temporairement bloqués et non détectés sous plusieurs dizaines de centimètres d'alluvions.

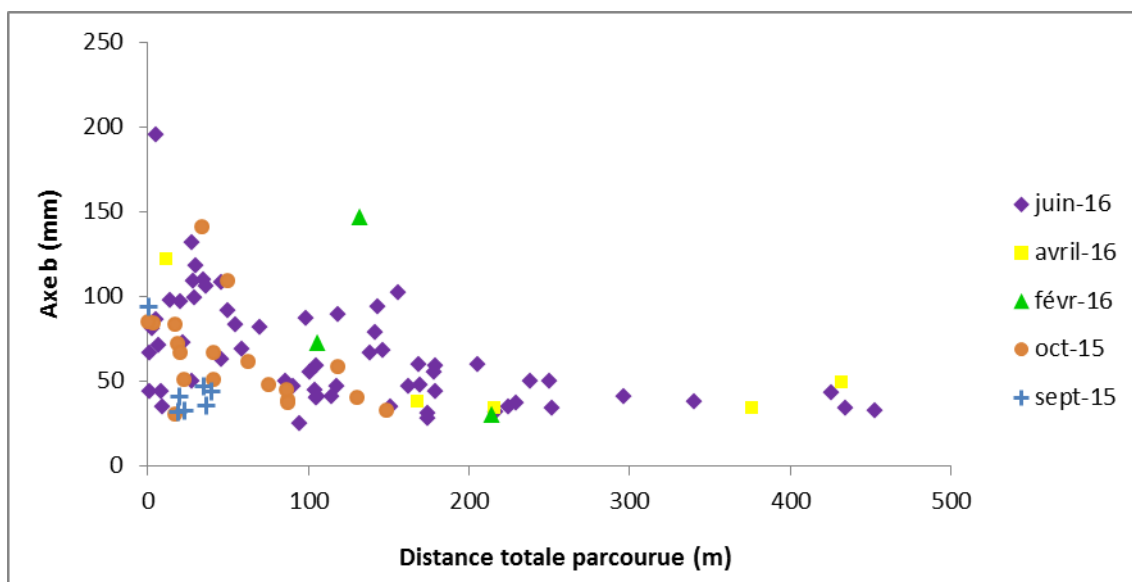


Figure 16 : Distance cumulée parcourue par les traceurs (site S9) d'après les dernières positions connues

Si l'on considère uniquement la distance totale parcourue – c'est-à-dire depuis le point de réinjection (18/07/2015) – des traceurs mobiles retrouvés en juin 2016, 11 mois après leur réinjection, on obtient une moyenne de déplacement de 122,6 m, soit une vitesse de 133,7 m/an. En considérant la distance totale parcourue par l'ensemble des traceurs mobiles, y compris ceux dont la dernière position connue date de relevés antérieurs à juin, on obtient une distance moyenne parcourue de 114,6 m, soit 125 m/an. Ces chiffres reflétant un transport très actif sont en accord avec l'importance des ajustements morphologiques verticaux et latéraux opérés par l'Yonne depuis la phase 1 de l'arasement. Il est en outre possible d'affirmer que la continuité sédimentaire de la charge de fond est en cours de rétablissement puisqu'en juin 2016 au moins 14 traceurs avaient passé l'ancien barrage.

Par ailleurs, on observe facilement la mise en place d'un tri granulométrique à mesure que les distances de transport augmentent, tri qui commençait tout juste à apparaître après les deux premiers relevés (Figure 15). Ce tri granulométrique semble également se dessiner avec le temps au sein de la charge de fond occupant le chenal en formation dans l'ancienne retenue.

5.5 Le débit solide de l'Yonne

A partir de l'estimation des volumes de sédiment déposés et érodés, le débit solide de l'Yonne a été calculé de deux façons différentes. D'une part à partir des volumes piégés en amont et dans la retenue :

1. L'exhaussement du lit de la partie terminale du TCC du moulin Blondelot correspond au piégeage de la fraction grossière de la charge de fond suite à la réduction de la pente du lit lorsque celui-ci entre dans la retenue. La comparaison des profils de 1933 et 2015 indique que ce dépôt a un volume de 2300 m³. Nous considérons qu'il s'est formé entre 1985 et 2015 (30 ans). La remobilisation de la charge grossière depuis juillet 2015 suggère en effet que les galets déposés lors de la première phase de fonctionnement du barrage (1927-1955) ont plus que probablement été entièrement évacués entre 1955 et 1985, lorsque le barrage était transparent.
2. Le remplissage de la retenue de la Pierre-Glissotte correspond à un volume total de 18600 m³ qui se serait mis en place depuis la remise en service du barrage. D'après le témoignage du gestionnaire, les chasses destinées à désenvaser la retenue ont été exceptionnelles depuis 1985 et ont complètement cessé en 2002 lorsque la vanne de fond a été endommagée. Nous considérerons donc que le barrage a entièrement arrêté la charge de fond et que depuis 30 ans, seule la charge fine a pu franchir le barrage. 60 % du volume sédimenté correspondent à de la matière organique et des dépôts de décantation (matière en suspension) : cette part du volume total ne fait donc pas partie de la charge de fond de la

rivière et doit être retirée de notre calcul. Il faut également soustraire les 5650 m³ provenant du ruisseau des Abattoirs. Au final nous considérons que seul 1790 m³ des 18600 m³ du comblement ont été apportés par l'Yonne depuis 1985.

D'autre part, le débit solide de l'Yonne a été estimé à partir des volumes érodés en aval du barrage. En effet, le fonctionnement au fil de l'eau de barrage ne modifie pas l'hydrologie de la rivière. L'incision se produit donc pour compenser le déficit sédimentaire et on peut considérer que le volume érodé correspond au volume qui aurait dû transiter dans le tronçon considéré s'il n'y avait pas de barrage. La comparaison des profils en long de 1933 et 1985 indique que l'incision est manifeste sur 1800 m. Elle a une hauteur moyenne de 120 cm dans un lit d'une largeur moyenne de 8,5 m. 18630 m³ de charge grossière (galets, graviers et sables grossiers) ont été évacués depuis la mise en service du barrage.

Tableau 3 : Tableau comparatif du transport grossier mesuré dans le TCC selon la fréquence de fonctionnement de la dérivation depuis le barrage du Moulin Blondelot

Localisation	Matériaux	Période de fonctionnement	Durée (ans)	Volume (m ³)	Volume/an (m ³ /an) – Poids/an (t/an)	Débit solide spécifique (t/km ² /an)
Queue de retenue	Galets	1985-2015	30	2300	77-123	1,6
Retenue	Sable	1985-2015	30	1790	60-96	1,2
Queue de retenue + retenue	Galet + sable	1985-2015			137-219	2,8
Incision Yonne	Galet + sable	1927-1955 puis 1985-2015	58	18360	317-507	6,5

La première méthode de calcul basé sur le piégeage dans la retenue fourni un débit solide spécifique de 2,8 t/km²/an alors que le débit estimé à partir de l'incision est de 6,5 t/km²/an. Étant donné les incertitudes associées à ces deux méthodes de calcul, on peut penser que le débit doit se situer entre ces deux valeurs. Ces valeurs sont tout à fait comparables à ce qui a été observé sur d'autres rivières caillouteuses de France et de Belgique. Elles confirment toutefois ce que les marquages ont déjà montré, l'Yonne amont est une rivière plutôt dynamique avec un transport sédimentaire grossier particulièrement importante pour le bassin versant de la Seine.

6 Conclusion

Ces différentes observations constituent les premiers résultats du suivi de l'arasement du barrage de la Pierre-Glissotte. Nous avons montré qu'étant donné la configuration du site et le caractère dynamique de l'Yonne, l'évolution du milieu est très rapide et n'est pas sans poser de problèmes aux maîtres d'ouvrage. Ces observations seront complétées tout au long de la phase en cours du Piren au grès de l'avancée des travaux et des ajustements morphologiques. Le suivi de l'avancée de la charge de fond dans le barrage sera poursuivi et les paramètres de mise en mouvement de la charge de fond seront affinés. Nous réaliserons également à intervalle de temps régulier des relevés topographiques à la station totale et par drone afin de suivre l'évolution de la vidange de l'ancienne retenue et des réajustements du lit de l'Yonne à l'aval de l'ancien barrage.

7 Bibliographie

- Barraud R. (2011). Rivières du futur, *wildrivers ?VertigO*, Hors-série 10.
- Benoît P., Berthier K., Boët P. et Rezé C. (2002). Les aménagements hydrauliques liés au flottage du bois, leur impact sur le milieu fluvial 16^e-19^e siècles. Rapport PIREN Seine, 1-11.
- Bravard J-P. (1999). Le flottage du bois et le changement du paysage fluvial des montagnes françaises. *Médiévales*, 36, 53-61.
- Arasement du barrage de la Pierre-Glissotte

- Bravard J-P. et Petit F. (1997). Les cours d'eau, dynamique du système fluvial. A. Colin, Coll. U, Paris, 222p.
- Brodu N. et Lague D. (2012). 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scaledimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 121-134.
- Burroughs B.A., Hayes D., Klomp K., Hansen J. et Mistak, J. (2009). Effects of Stronach Dam removal on fluvial geomorphology in the Pine River, Michigan, United States. *Geomorphology*, 110, 96-107.
- Coudrec J-M. (1999). L'arasement du barrage de Maisons-Rouges (Indre-et-Loire) en 1998. *Norois*, 184 (4), 629-636.
- Derville I., Bonenfant M., Royet P., Lepetit D. et Jigorel A. (2001). Retour d'expérience du démantèlement du barrage de Kernansquillec. *Ingénieries*, 25, 13-27.
- Doyle M.W., Stanley E.H. et Harbor Jon M. (2003). Channel adjustments following two dam removals in Wisconsin. *Water Resources Research*, 39, 1, 1011.
- Germaine M-A. et Barraud R. (2013). Les rivières de l'ouest de la France sont-elles seulement des infrastructures naturelles ? Les modèles de gestion à l'épreuve de la directive-cadre sur l'eau. *Natures Sciences Sociétés*, 21(3), 373-384.
- Lecuna, S. (2015). Le nouveau Poutès : co-construire l'hydroélectricité durable. *Sciences Eaux & Territoires* 2, 17, 34-37.
- Lespez L. et Germain M-A. (2016). La rivière désaménagée ? Les paysages fluviaux et l'effacement des seuils et des barrages de l'Europe de l'ouest et de l'Amérique du Nord-est. In : Houbrecht G., Gob F., Hallot E. (Eds), *Dynamique fluviale, Hommage au Pr. François Petit*, *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 67, 223-254.
- Liébault F., Lallias-Tacon S., Cassel M. et Talaska N. (2013). Long profile responses of alpine braided rivers in SE France. *River research and applications*, 29, 1253-1266.
- Pizzuto, J. (2002). Effects of dam removal on river form and process. *Bioscience*, 52(8), 683-691.
- Poux A-S., Gob F. et Jacob-Rousseau N. (2011). Reconstitution des débits de crues artificielles destinées au flottage du bois dans le massif du Morvan (centre de la France, 16^e-19^e siècles) d'après les documents d'archive et la géomorphologie de terrain. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, 143-156.
- Reilé (2014). Autorisation : Projet de réhabilitation du site Microcentrale hydroélectrique de la Pierre-Glissotte Commune de CHÂTEAUCHINON (Campagne) – Rivière l'Yonne. Rapport, 337p.
- Rezé C. (2002). Les aménagements du réseau hydrographique du Morvan pour le flottage du bois. Archéologie, mémoire de maîtrise (2 volumes), Université Paris 1, Panthéon-Sorbonne, 61p.
- Thommeret N., Dunesme S., Gob F., Bilodeau C., Tamisier V., Virmoux C., Brunstein D., Kreuzenberger K., Raufaste S. et Gilet L. (2016). Adaptation du protocole Carhyce aux grands cours d'eau à partir de données LiDAR topo-bathymétrique. Acte des journées techniques sur les *Avancées, apports et perspectives de la télédétection pour la caractérisation physique des corridors fluviaux*. DEB et Onema, 10 juin 2016, Nanterre.
- Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J. et Reynolds J.M. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Wolman G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions of American Geophysical Union*, 35 (6), 951-956.