

Rétablissement de la continuité écologique de l'Yonne à Château Chinon (Massif du Morvan)

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

¹ Université 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 ? A quel rythme et sous quelles conditions hydrauliques s'effectueront ces ajustements ? Les travaux de suivi ont montré une réponse rapide de la rivière la première année suivant l'arasement : 23 % des dépôts du réservoir, constitués de sédiments fins (≤ 2 mm), ont été érodés en l'espace de 9 mois et la charge caillouteuse en queue de retenue a aussi été très rapidement remise en mouvement et transportée à des vitesses élevées. Cette érosion a d'abord uniquement répondu à l'abaissement du niveau d'eau induit par l'arasement, avant d'être également soutenue par les épisodes de crues de l'hiver et du printemps ayant suivi la première phase, intervenue à l'été 2015. La seconde année post-arasement a en revanche été caractérisée par un fort ralentissement des processus érosifs et une stabilisation des conditions morphologiques et sédimentaires façonnées au cours de la première année.

Introduction

L'arasement du barrage de la Pierre Glissotte sur la haute Yonne a débuté en juillet 2015 pour restaurer la continuité écologique (sédimentaire et ichtyologique) du cours d'eau et rénover les installations hydroélectriques du propriétaire exploitant. Ce projet concerne l'un des rares exemples français d'effacement d'ouvrage supérieur à 3-4 m de hauteur. Afin de limiter les impacts de l'opération, la déconstruction du barrage se fait en deux étapes. La première, qui s'est déroulée durant l'été 2015, a consisté à supprimer les 3 m supérieurs de l'ouvrage. La seconde a débuté en octobre 2017, elle permettra l'ouverture de la partie inférieure de l'ouvrage sur les deux tiers de sa largeur. Les détails de cette opération sont décrits dans le précédent rapport d'activité traitant de ce thème (Gilet *et al.*, 2016) et dans une publication à paraître dans la revue *Géomorphologie : relief, processus, environnement* (Gilet *et al.*, accepté pour publication).

Dans ce rapport d'activité, nous retraçons l'historique des aménagements de l'Yonne et son bassin puis présentons la suite des suivis morphologiques et sédimentaires résultants de la première phase de l'arasement. Une attention particulière sera apportée à la mise en place du nouveau chenal dans l'ancienne retenue et à la remobilisation de la charge de fond.

1 Historiques des aménagements

La restauration écologique occupe aujourd'hui une place centrale dans la gestion des cours d'eau. Depuis la mise en œuvre de la Directive européenne sur l'eau et l'objectif affiché de bonne atteinte du bon état écologique, les organismes gestionnaires des rivières françaises planifient et mettent en œuvre des opérations visant à améliorer le fonctionnement biophysique des cours d'eau. Pour un certain nombre d'entre elles, des travaux parfois de grande ampleur peuvent être réalisés dans le lit du cours d'eau et ses abords immédiats. Pour corriger des siècles d'intervention, ces travaux consistent le plus souvent à refaçonner le lit et ses berges ou supprimer des aménagements devenus obsolètes.

Le terme de « restauration écologique » suggère que ces actions sur le cours d'eau visent à rendre à la rivière son bon état écologique passé, détérioré par une succession d'aménagements qui ont mis à mal le fonctionnement naturel de l'hydrosystème. De plus en plus de travaux contestent toutefois cette vision et inscrivent plutôt ces opérations de restauration dans un long continuum d'interventions (Dufour et Piegay, 2009 ; Gob *et al.*, 2014 ; Lespez et Germaine., 2016). La restauration n'en serait que l'ultime étape. A vocation écologique, cette nouvelle étape succéderait à une suite d'aménagements qui, au fil de siècle, ont répondu aux besoins et aux visions de la société (accès à la ressource, production économique, protection contre les risques naturel, etc.).

Pour correctement appréhender l'opération de restauration de la continuité écologique et sédimentaire actuellement en cours sur le site de la Pierre Glissotte, nous avons reconstitué l'historique des pratiques et usages en son bassin qui ont influencé le cours d'eau. Le massif du Morvan est un espace naturel de haute qualité dont les cours d'eau sont aujourd'hui généralement considérés comme en « bon état » écologique. Ils sont un des atouts majeurs pour le Parc Naturel Régional du Morvan et plusieurs d'entre eux font partie du Réseau de référence pérenne défini par la Directive cadre sur l'eau (DCE). L'Yonne a pourtant subi, depuis l'Antiquité, une succession d'aménagements qui ont fortement perturbé sa dynamique et transformé durablement les fonds de vallées. Son bassin versant a tout d'abord été exploité pour ses ressources minières par les Eduens (Celts) depuis la fin du 2^e avant notre ère jusqu'à la fin du 1^{er} siècle avant J-C, puis à partir de l'an mille jusqu'à l'époque romaine (Jouffroy-Bapicot *et al.*, 2008). Seize siècles plus tard, entre le milieu du 16^e siècle et le début du 20^e siècle, son régime hydrologique a été massivement modifié et son cours chenalisé pour le transport du bois par flottage (Poux *et al.*, 2011). Enfin, au début du 20^e siècle, le barrage hydroélectrique de la Pierre Glissotte a été installé pour alimenter les Usines Morvan (Figure 1).

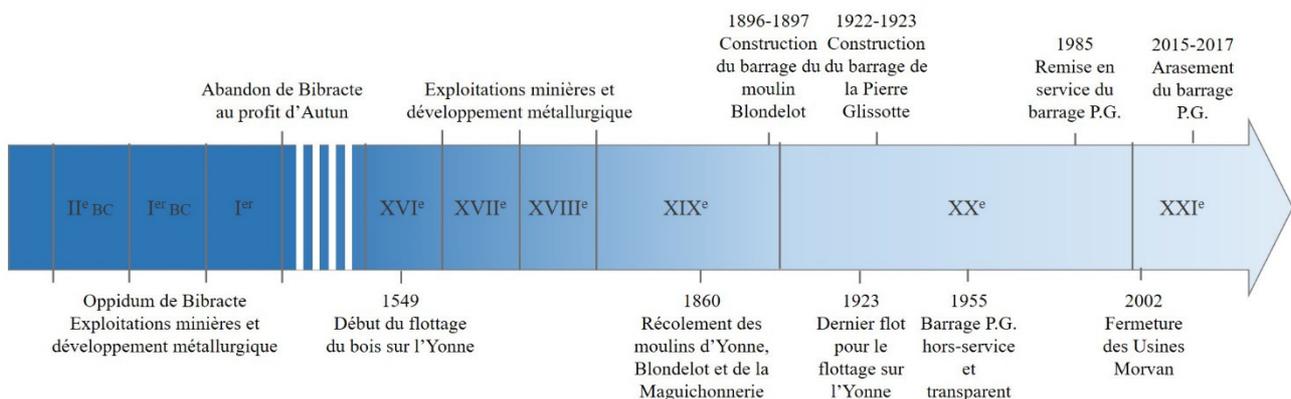


Figure 1 : Historique des aménagements du bassin et du lit de l'Yonne supérieure

L'oppidum maximum de Bibracte, ville gallo-romaine, capitale des Eduens, a été fondé à la fin du 2^e siècle avant notre ère. Il s'étendait sur plus de 200 ha à 850 m d'altitude au sommet du Mont Beuvray. Pendant plus de deux siècles, il fut le centre d'une activité artisanale, commerciale et politique intense (Jouffroy-Bapicot *et al.*, 2008). Des recherches récentes mettent en avant l'activité minière et métallurgique du site pour expliquer sa localisation et son essor. Le Morvan est en effet un horst cristallin dont le sous-sol fortement fracturé présente l'ensemble des métaux recherchés dans l'Antiquité (fer, cuivre, zinc, or, argent, plomb, étain) (Cauuet *et al.*, 2006). Dans une étude récente, couplant prospections archéologiques et analyses géochimiques des sols et alluvions des cours d'eau, Monna *et al.* (2014) ont pu formellement localiser une quinzaine de sites miniers et identifier au moins autant de sites potentiels dans le bassin amont de l'Yonne

(Figure 2). Les quelques datations (C14) disponibles sur certaines des anciennes minières et différents indices archéologiques montrent qu'elles ont été exploitées dans la seconde partie de l'âge du fer et le début de l'époque romaine mais également entre la seconde moitié du Moyen Age et le 19^e siècle.

Bien qu'à ce jour aucune étude n'a pu montrer l'impact de ces activités minières et métallurgiques sur les cours d'eau, on peut penser qu'elles ont perturbé de façon non négligeable le fonctionnement du cours amont de l'Yonne et de ses affluents. L'analyse palynologique et géochimique de séquences prélevées sur plusieurs tourbières du massif va dans ce sens et met en évidence une intense déforestation et la présence de micropolluants métalliques (en particulier le plomb) dans les sédiments (Cauuet *et al.*, 2006 ; Monna *et al.*, 2004, Jouffroy-Bapicot, 2010, Jouffroy-Bapicot *et al.*, 2013, Monna *et al.*, 2014).

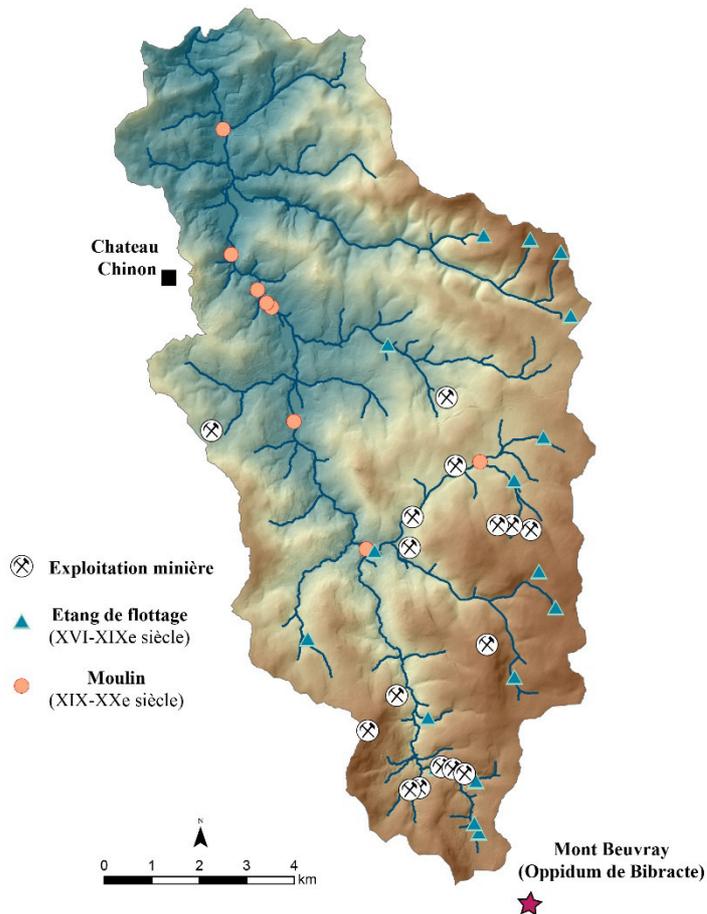


Figure 2 : Carte des aménagements du bassin et du lit de l'Yonne depuis l'Antiquité. Sources Poux *et al.* (2011) les étangs de flottage et Monna *et al.* (2014) pour les exploitations minières (seules les exploitations minières formellement identifiées par prospection archéologique sont figurées).

étang. Ils ont été établis sur de petits cours d'eau, dans les têtes de bassin, afin de pouvoir propager la courue dans la totalité du réseau aval. Ils sont généralement situés en pleine forêt et à des altitudes parfois élevées. Poux *et al.* (2011) ont calculé la superficie de la plupart des étangs. Ils sont de taille modeste ; leur superficie moyenne dans le haut-bassin de l'Yonne est de 1,08 ha. En outre, la moitié des étangs a une superficie inférieure à 0,6 ha et un quart seulement à une superficie supérieure à 1 ha. La hauteur des digues varie entre 2,6 m et 6,5 m.

Les conséquences des modifications du régime hydrologique sur la morphologie des cours d'eau sont étudiées depuis quelques années (Poux *et al.*, 2011 ; Gob *et al.*, 2016). Ces lâchers réguliers ont engendré un accroissement drastique du transport solide, qui s'est traduit par une incision des lits qui semble généralisée dans les têtes 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

L'industrie du flottage du bois a débuté dans la seconde moitié du 16^e siècle avec l'augmentation des besoins en bois de la ville de Paris. Les rivières du Morvan ont, à cette époque et sur plusieurs siècles, subi des aménagements conséquents pour permettre la dévalaison des bûches de bois. Du fait de la petite taille de ces cours d'eau, de nombreux petits étangs ont dû être créés dans les têtes de bassin (Figure 2). Ces retenues étaient ouvertes régulièrement pour augmenter le débit de la rivière et ainsi permettre l'acheminement du bois vers la vallée principale (Bravard, 1999 ; Rezé 2002 ; Benoit et Berthier, 2005 ; Benoit *et al.* 2002) (Figure 3b. et c.). La construction de nombreux étangs remonte au Moyen Age, bien avant le début du flottage à bûches perdues. La plupart ont toutefois été réaménagés ou restaurés au moment où le flottage en Haut-Morvan a pris de l'ampleur, c'est-à-dire au milieu du 18^e siècle. Seuls 11 étangs ont été construits de toutes pièces entre 1743 et 1880 (Rezé, 2002). En 1784, les autorités ont ordonné la construction sur l'Yonne de 9 étangs et le rehaussement de la digue

de 7 autres. On peut estimer qu'à la fin du 19^e siècle, l'aménagement du haut-bassin de l'Yonne aux fins du flottage du bois était à son apogée. A cette époque, tous les affluents de l'Yonne en amont de Clamecy possèdent au minimum un

haut bassin vers la moyenne vallée. Cette dernière a mené à un exhaussement des lits parfois supérieur à un mètre et, par réaction des populations, à la mise en place de levées de débordement de part et d'autre du chenal actuel. Ainsi, l'Yonne s'écoule aujourd'hui dans un lit perché de plusieurs dizaines de centimètres au-dessus de la plaine alluviale et presque partout chenalisé par un alignement de gros blocs le long de berges (Figure 3 a. et d.).

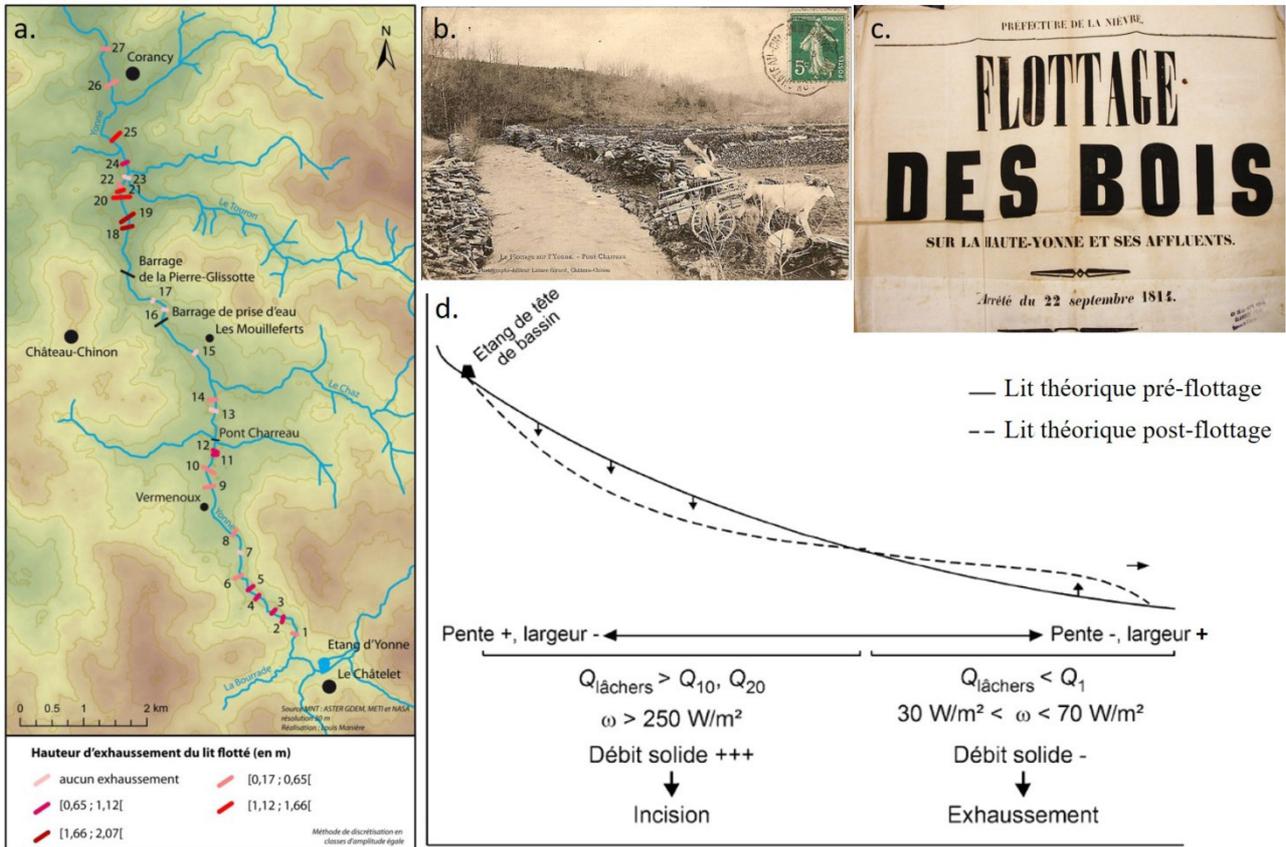


Figure 3 : Le flottage du bois sur l'Yonne. a. hauteur d'exhaussement du lit flotté (Manière, 2012) ; b. le petit flot sur l'Yonne à Pont Charraux (carte postale ancienne non datée) ; c. affichage préfectoral annonçant les dates des flots (1814) (AD58-3S6892) ; d. évolution du profil théorique de l'Yonne amont et ses affluents suite à trois siècles de flottage (Poux et al., 2011).

Durant cette période, comme partout ailleurs en France, le bassin supérieur de l'Yonne a également vu un certain nombre de moulins s'implanter le long de son cours principal. Leur nombre est toutefois limité. Si en 1860, le Morvan comptait 5 à 6 moulins par communes (Touche, 2017), on ne compte sur le cadastre napoléonien que 8 moulins sur les 20 kilomètres du cours en amont du barrage de Pannecière (Figure 2 et 4b.). Sur le secteur de la Pierre Glissotte, 3 moulins étaient implantés à la fin du 19^e siècle : la Margaichonnerie, le Moulin d'Yonne et le Moulin Blondelot. La date de leur construction n'est pas connue mais l'on sait qu'elle est antérieure à 1738 puisqu'ils figurent sur la carte du *Cours de la Seine et des rivières et ruisseaux commerçants qui y affluent* dressée par l'Abbé Delagrive (Figure 4a.). Entre 1857 et 1860, la commune de Château-Chinon a établi un rapport de récolement afin de régulariser la situation de ces moulins et fixer les côtes des retenues.

Jusqu'aux années vingt, ces moulins devaient cohabiter avec le flottage et étaient notamment tenus de ne pas entraver la dévalaison des bûches lors des flots. Pour ce faire, leur seuils étaient constitués d'aiguilles démontables (Figure 4d.) et leur bief devait être obstrué afin d'empêcher que les bûches ne se perdent et n'endommagent les installations hydrauliques. Lorsque la houille a remplacé le bois comme source d'énergie, les rivières du Morvan ont été réorientées vers la production d'électricité. L'usine hydroélectrique du Moulin Blondelot est construite un peu moins d'un kilomètre en aval de l'ancien moulin par la ville de Château-Chinon en 1896-1897 ; deux turbines y sont installées. Ensuite, lorsque le flottage est définitivement abandonné sur l'Yonne en 1923, c'est le barrage de la Pierre Glissotte qui est construit pour alimenter en électricité les Usines Morvan spécialisées dans la fabrication de pièces en caoutchouc.

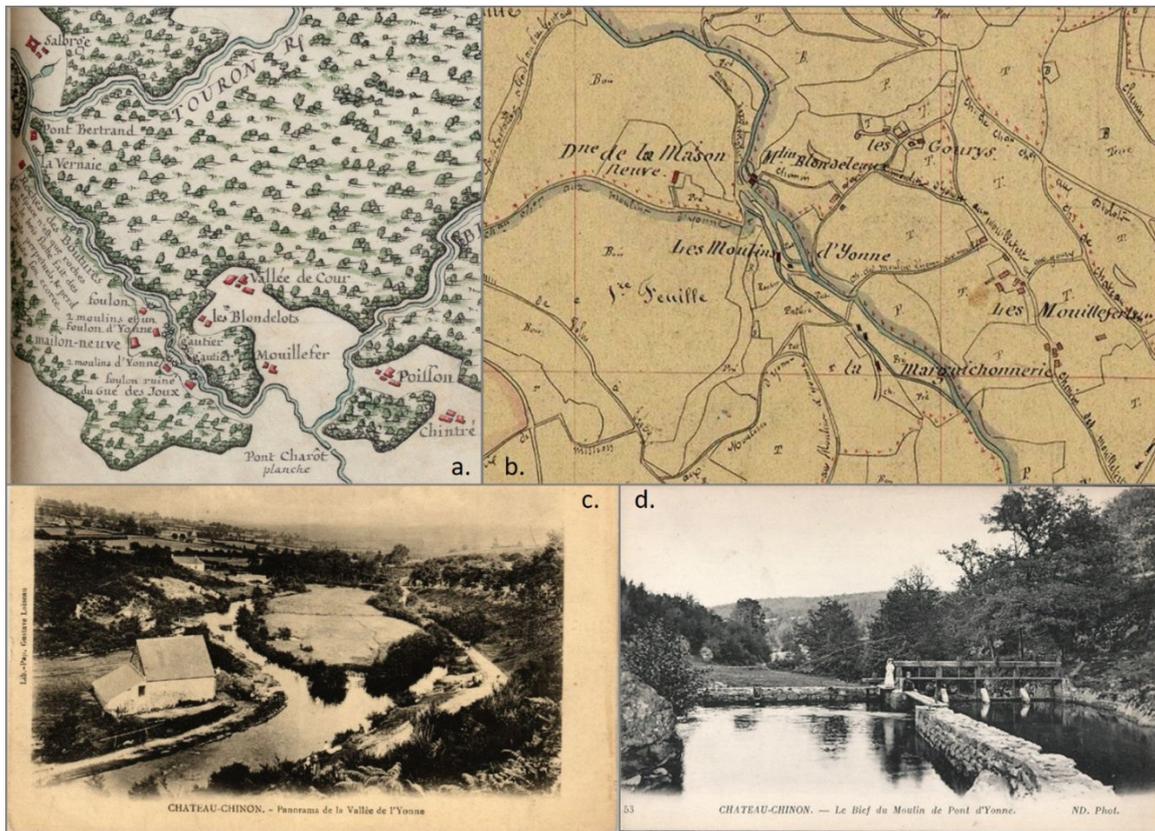


Figure 4 : Les moulins sur l'Yonne à proximité de Château Chinon. A. carte du « Cours de la Seine et des rivières et ruisseaux commerçants qui y affluent », Abbé Delagrive (1857) ; b. cadastre napoléonien (AD58 en ligne) ; c. Moulin Blondelot (carte postale ancienne non datée) ; d. bief du Moulin du Pont d'Yonne (carte postale ancienne non datée).

La centrale du Moulin Blondelot a fonctionné durant tout le 20^e siècle et a été rénovée entre 1993 et 1997 pour y remplacer l'une des turbines et doter le barrage 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). La production associée au barrage de la Pierre Glissotte a été plus chaotique. L'usine 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 m³/s mais elle n'était équipée que pour produire 150 kW.

Le barrage du Moulin Blondelot a eu un impact relativement limité sur la continuité 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. Seul un petit seuil bétonné de 1,2 m de hauteur sur lequel viennent se fermer la vanne et le clapet a toutefois pu arrêter une partie du transport sédimentaire. Son impact sur l'hydrologie est par contre beaucoup plus important. 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) vers une conduite forcée qui précipitait 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. A l'inverse, si l'impact du barrage de la Pierre Glissotte sur l'hydrologie de l'Yonne est très faible, nous avons montré dans le précédent rapport d'activité (Gilet *et al.*, 2016) que son impact sur la continuité sédimentaire est bien plus important puisque, depuis les années 1990, il a arrêté la quasi-totalité de la charge solide.

Nous ne disposons malheureusement pas de profils topographiques en long ou en travers datant d'avant la construction du barrage et qui pourraient servir de points de repère pour retracer l'ajustement du lit après les travaux d'arasement. Plusieurs documents d'archives permettent toutefois de rendre compte des formes du lit que l'on pouvait rencontrer à la Pierre Glissotte jusqu'au début du 20^e siècle. Ces deux barrages ont été installés respectivement à l'entrée et à la sortie d'un tronçon de l'Yonne dans lequel la vallée y est très étroite

et la pente particulièrement forte (0,035 m/m). Les ingénieurs de l'époque ont choisi de construire le barrage de la Pierre Glissotte dans un secteur où la roche mère affleurerait dans le fond du lit créant une succession de petites chutes (Figures 5 et 6). Sur sa carte *Cours de la Seine et des rivières et ruisseaux commerçans qui y affluent* de l'Abbé Delagrive l'endroit est nommé « Rocher de Bouture » et décrit selon les termes suivants : « cet endroit n'est que roche où le bois flotté fait des sauts perpétuels et perd toute son écorce » (Figure 4a.). En 1860, dans son guide intitulé *Saint-Honoré-les-Bains, eaux sulfureuses arsénicales, guide pittoresque et médical*, A. Comoy recommande la visite du site : « Le trajet de la cascade au moulin Blondelot présente quelques difficultés : il faut, à certains moments, entrer en sous bois, suivre une chaussée fréquentée seulement par les flotteurs, traverser quelques mouilles ; mais vous serez largement dédommagé de vos fatigues par les beautés de cette gorge sauvage et profonde, bordée de montagnes boisées de 600 mètres et de rochers abrupts, au fond de laquelle roule avec fureur un véritable torrent fournissant des rapides et de belles chutes dont la plus gracieuse est la Pierre-Glissotte.



Figure 5 : l'Yonne à la Pierre Glissotte (carte postale ancienne non datée).

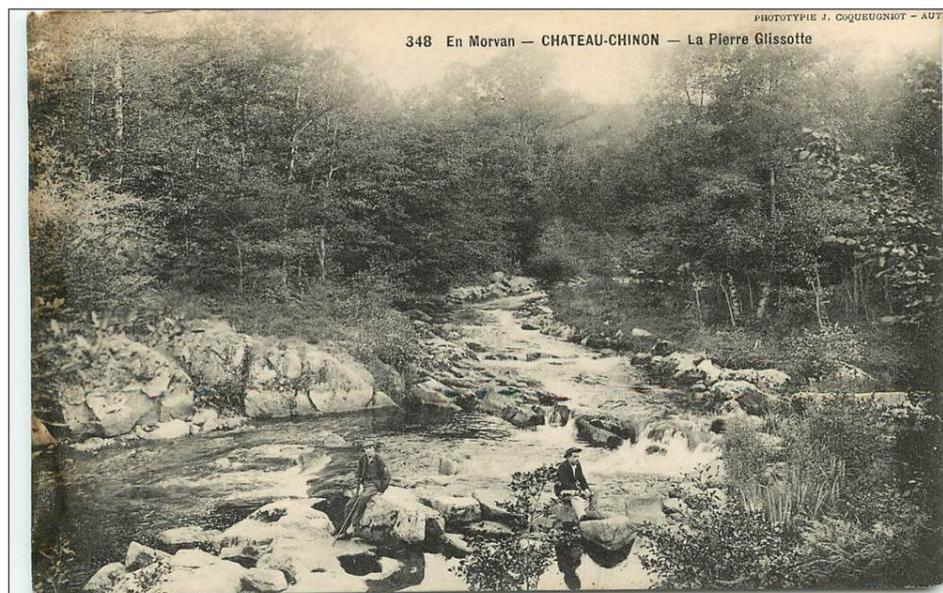


Figure 6 : L'Yonne à la Pierre Glissotte (carte postale ancienne non datée).

2 Réajustements hydromorphologiques au sein de l'ancienne retenue

2.1 Méthode

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 quatre sites de suivi suivant la méthode développée pour la granulométrie de surface par Wolman (1954) (Figure 7). L'objectif était de disposer de particules représentatives de la charge de fond occupant le lit.

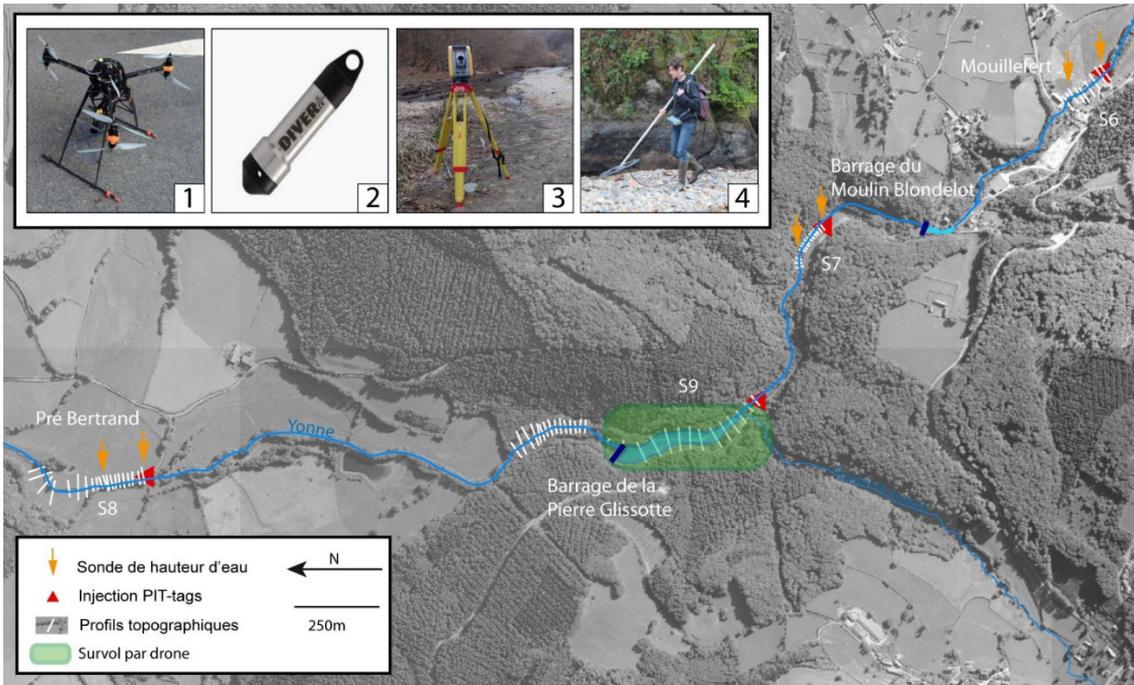


Figure 7 : Localisation des sites d'étude et des instruments de mesure utilisés : 1. drone hexacoptère ; 2. sonde de pression Diver ; 3. station totale Trimble S6 ; 4. antenne de détection des PIT tags .

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 :

- 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 D_{50} 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. 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, puis une nouvelle fois sur chaque site au cours du printemps 2017. Les débits de mise en mouvement de la charge de fond ont pu être approchés et la capacité de transport des différents sites étudiée.

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 à partir d'une série de profils en travers pour permettre une caractérisation fine de la géométrie du chenal, essentielle à la compréhension des résultats du charriage. Sur le site S9 le profil en long et 17 profils en travers ont été levés sur 400 m de tronçon en aval du barrage de Pierre Glissotte en juillet et novembre 2014. 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. 7 profils en travers ont de nouveau été levés en mars 2017 dans l'ancienne retenue, au même emplacement qu'une partie de ceux réalisés en mars 2016 afin de comparer l'évolution du chenal. Dans la même optique comparative, 16 profils ont été réalisés en aval du barrage en juillet 2017 en reprenant la localisation de ceux levés en 2014.

Afin d'évaluer les volumes mis en jeu lors de la première phase d'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 (avril 2016) avec un drone hexacoptère. Au total 9 vols ont permis de couvrir l'ensemble du site et d'obtenir 750 photographies avec une résolution de 0.86 cm/pixel à 50 m 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 (SfM). Cette 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. 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. Lorsque ce n'était pas le cas, l'algorithme Canupo (Brodu *et 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 via le calcul de l'erreur-type (RMSE) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

dans laquelle n est l'effectif, y_i la valeur réelle (x, y ou z), \hat{y}_i la valeur mesurée (x, y ou z). Sur les 17 points de contrôle mesurés, l'erreur-type est en moyenne de 1 cm en z et de 1,5 cm en plan.

2.2 Evolution morphologique sur la 1^{ère} année post-arasement (juillet 2015 et août 2016)

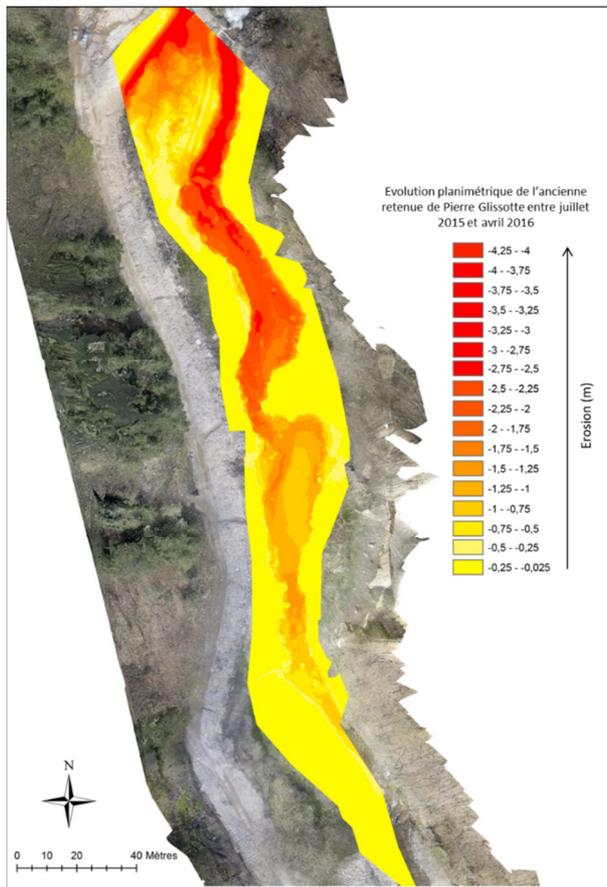


Figure 8 : Carte de l'évolution planimétrique dans l'ancienne retenue entre juillet 2015 (avant 1^{ère} phase d'arasement) et avril 2016 (9 mois après début des travaux)

Les différentes méthodes de suivi déployées dans l'ancienne retenue (traçage RFID, levés topographiques, photogrammétrie, etc.) ont montré une réponse très rapide de la rivière au cours des mois ayant suivi la première phase d'arasement. Les levés topographiques et le survol du site par drone en mars-avril 2016 ont permis d'estimer le volume de sédiments érodés dans l'ancien réservoir à 9600 m³, soit 23% du total de sédiments accumulés (42000 m³). 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.

Un chenal s'est très rapidement formé dans les sédiments meubles qui comblaient la retenue. La Figure 8 donne à voir la formation en cours de ce nouveau chenal de l'Yonne en avril 2016, 9 mois après le début des travaux. Il est d'autant plus marqué que l'on se rapproche du barrage avec une incision maximale de 4.25 m sur les derniers 80 mètres de l'ancienne retenue. La diminution des volumes érodés vers l'amont rend bien compte du processus d'érosion régressive qui s'est mis en place dès l'étape de vidange de la retenue (Figure 9).

Grâce à des visites fréquentes sur le terrain et aux photographies fournies par un appareil fixe installé sur le site (4 photographies par jour), il a été possible d'identifier les premières étapes de réajustement hydromorphologique post-arasement. Elles sont proches de celles décrites par Doyle et al. (2003) et Evans (2007) dans leur modèle d'évolution du chenal : A) situation avant travaux ; B) abaissement du niveau d'eau et différenciation entre le nouveau lit et le chenal de vidange ; C) incision ; D) incision et élargissement. Sur l'Yonne, après le façonnement rapide d'un nouveau chenal et une phase d'incision, un processus d'élargissement du chenal a accompagné l'incision. C'est d'abord à travers une déstabilisation et un effondrement des berges (par glissement notamment) que s'est opéré l'élargissement du nouveau lit. Par la suite, l'élargissement s'est poursuivi jusqu'à l'été 2016, cette fois principalement par érosion latérale et sapement. Au cours de cette première année post-arasement, l'activité érosive a été un peu plus soutenue durant les 2-3 premiers mois ayant suivi le début des travaux et tend à ralentir à partir de l'automne 2015 et ce malgré l'occurrence de plusieurs crues au printemps et hiver 2015-2016 (Figure 10).



Figure 9 : Rupture de pente (« knickpoint ») indiquant le front d'érosion régressive remontant vers l'amont (photographie prise le 28/07/2015, 8 jours après le début de la vidange)

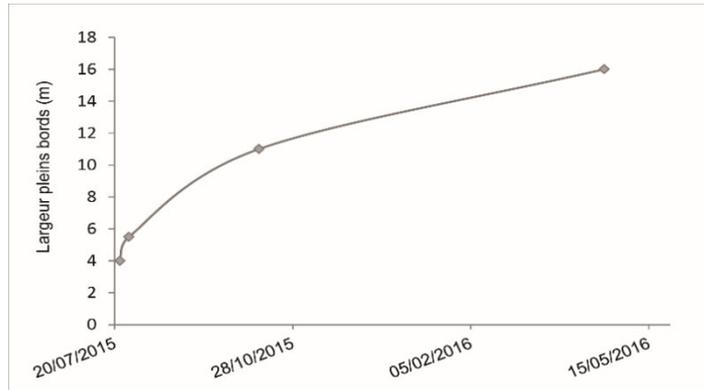


Figure 10 : Evolution de la largeur à pleins bords du chenal créé au sein de l'ancienne retenue de Pierre Glissotte.

Parmi les mutations morphologiques enregistrées dans l'ancienne retenue, nous avons aussi pu relever une rapide augmentation de la taille du substrat (D_{50}) du chenal en formation (Figure 11). Alors que la retenue était essentiellement composée de sables et de vase (à l'exception du banc amont, en queue de retenue, où des cailloux étaient visibles en surface), on observe dès février 2016 un retour à un D_{50} caillouteux sur les trois bancs d'échantillonnage (entre 36 et 38 mm). Le D_{50} a ensuite continué à augmenter durant le printemps et l'été suivant, avec en août 2016 des valeurs atteignant 54 mm sur le banc amont et 42 mm sur le banc intermédiaire. Ce renouvellement du substrat reflète une reprise du transit sédimentaire depuis l'amont, avec notamment l'érosion des dépôts accumulés en queue de retenue et réinjectés dans le système. Le tri granulométrique qui commence à apparaître entre les bancs en août 2016, pour le D_{50} comme le D_{90} , peut être considéré comme indicateur d'une diminution de la capacité de transport de la rivière de l'amont vers l'aval de l'ancienne retenue (notamment à cause de la diminution de la pente).

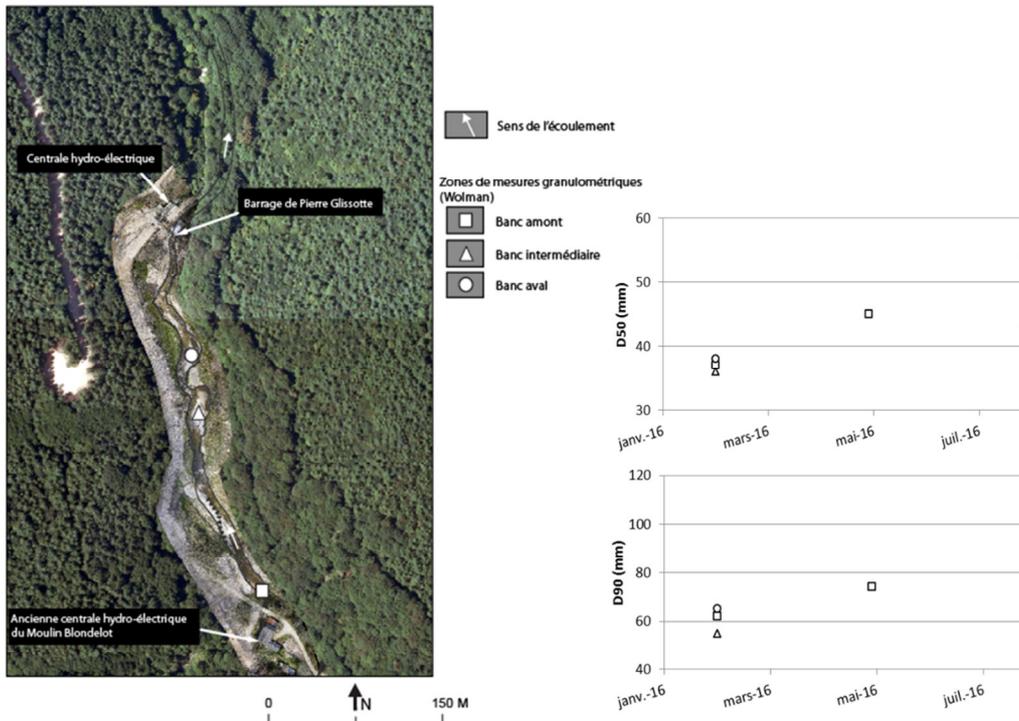


Figure 11 : Evolution du D_{50} et du D_{90} dans l'ancienne retenue (3 bancs d'échantillonnage)

Cinq relevés de déplacements des traceurs ont été effectués entre septembre 2015 et juin 2016 dans l'ancienne retenue (S9). La Figure 12 renseigne la chronologie des relevés PIT tag par rapport à la chronique hydrologique. Les débits sont ceux calculés au site S7 à partir des hauteurs d'eau enregistrées par les sondes Diver équipant le site (Figure 7). Le site S7 est localisé quelques centaines de mètres en amont de S9, et entre S7 et S9, aucun affluent important ne vient modifier l'hydrologie. Du début de la vidange de la retenue (20/07/15) jusqu'à la mi-mars 2016, aucune dérivation du débit depuis le barrage du Moulin Blondelot n'est intervenue (travaux de prolongement de la conduite forcée).

Nos résultats montrent une rapide réactivation de la charge de fond au sein du nouveau chenal durant la première année de suivi. En juin 2016, plusieurs dizaines de traceurs avaient déjà parcouru plus de 100 m et au moins 13 d'entre eux avaient alors dépassé le barrage (Figure 13A), témoignant ainsi du rétablissement en cours de la continuité sédimentaire. On voit à la Figure 13B que les distance et vitesse moyennes des traceurs mobiles sont importantes (114,6 mètres soit 125 m/an). Elles sont supérieures à celles obtenues sur les autres sites de suivi installés sur l'Yonne. Il est à noter qu'elles sous-estiment probablement la réalité puisque tout indique qu'au moins une partie des traceurs non-retrouvés après les deux premiers relevés ont dépassé la retenue, la dynamique érosive au sein de la retenue étant encore dominante jusqu'à l'été 2016. D'ailleurs, si l'on ne considère que les traceurs mobiles retrouvés en juin 2016, on obtient déjà des valeurs un peu supérieures : distance moyenne de 122,6 mètres, soit une vitesse équivalente à 133,7 m/an.

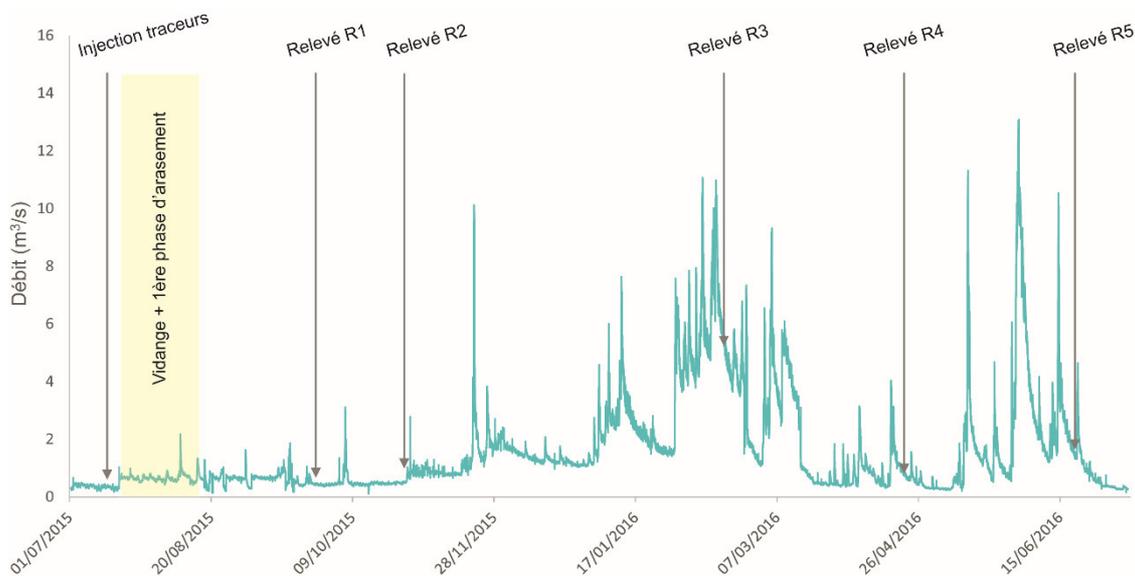


Figure 12 : Hydrogramme et chronologie des relevés PIT tag dans l'ancienne retenue de Pierre Glissotte (site S9) ; juillet 2015-juin 2016. 1. Débit calculé par courbe de tarage.

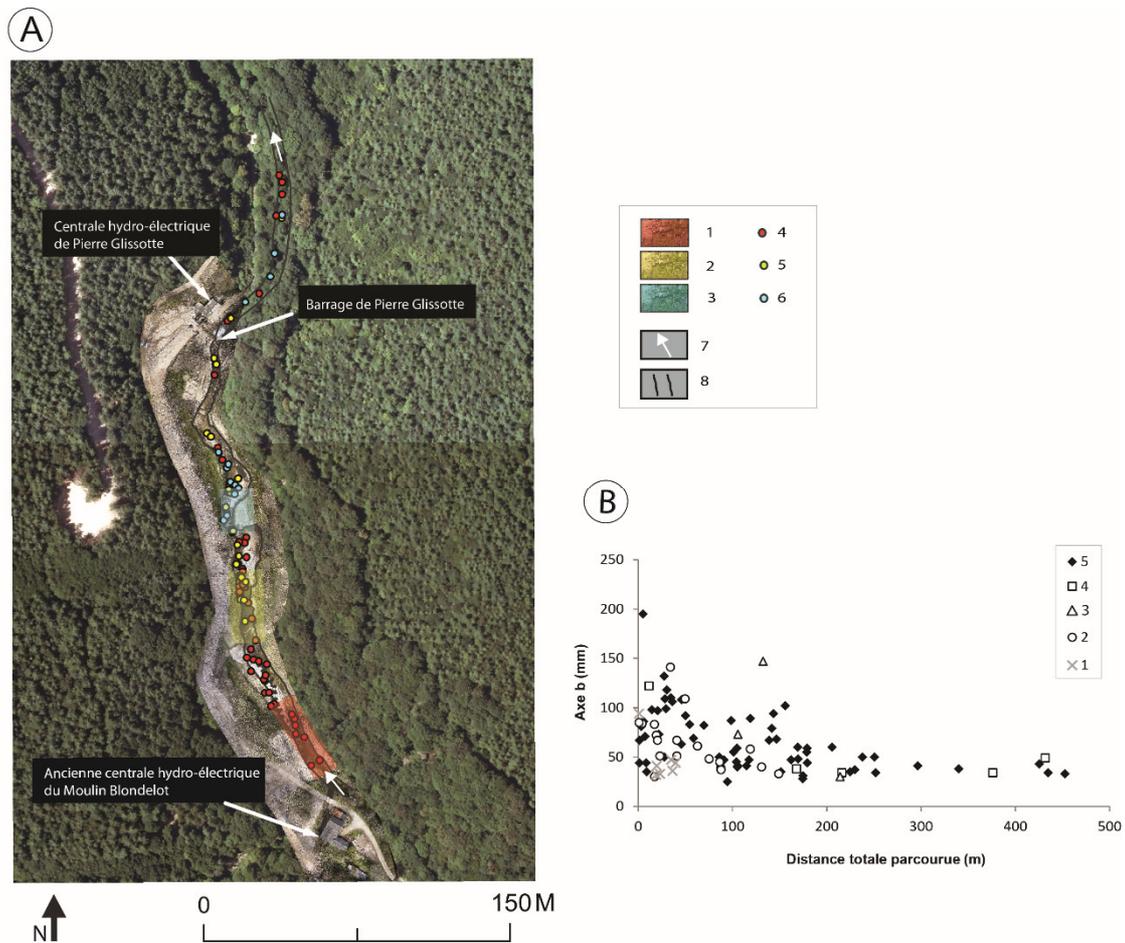


Figure 13 : Etat du transport minimum des traceurs à travers l'ancienne retenue de Pierre Glissotte (S9) au 20/06/2016. A. dernière position connue des traceurs au 20/06/2016. 1. Zone d'injection n°1 ; 2. Zone d'injection n°2 ; 3. Zone d'injection n°3 ; 4. Traceurs zone n°1 ; 5. Traceurs zone n°2 ; 6. Traceurs zone n°3 ; 7. Sens de l'écoulement ; 8. Délimitations latérales du lit à pleins bords ; B. distance cumulée parcourue par les traceurs d'après leur dernière position connue (dernière détection en date). 1. Septembre 2015 ; 2. Octobre 2015 ; 3. Février 2016 ; 4. Avril 2016 ; 5. Juin 2016.

La Figure 14 précise ces résultats et montre les distances parcourues par les traceurs entre plusieurs relevés effectués entre juillet 2015 et juin 2016. On y voit que les déplacements les plus importants sont enregistrés lors des premiers mois qui ont suivi le début des travaux (R1: 138,1 m/an; R2: 347 m/an) et ce malgré des conditions hydrologiques défavorables (pas de crue remarquable) (Figure 12). Cela confirme l'intense activité morphologique des mois qui ont suivi le début des travaux, résultant de l'instabilité créée par l'abaissement du niveau d'eau et l'effacement de la partie supérieure de l'ouvrage. Le relevé de février 2016 présente des vitesses encore élevées (R3 : 326 m/an) mais avec des traceurs qui, cette fois, ont subi le passage de plusieurs crues (Figure 12). Ce n'est qu'à partir du printemps 2016 que les vitesses commencent à se « normaliser » (si l'on compare aux autres sites de suivi sur l'Yonne) et les déplacements à devenir davantage dépendant des épisodes hydrologiques. Cela rappelle fortement le relai des variables de contrôle décrit par Pizzuto (2002) et Pearson et al. (2011) en contexte post-arasement, avec le passage d'un *process-driven systems* à un *event-driven systems*. Néanmoins ce type de fonctionnement avait jusqu'ici été associé à des sédiments fins (\leq sables). Nos résultats montrent qu'il peut aussi concerner une charge plus grossière.

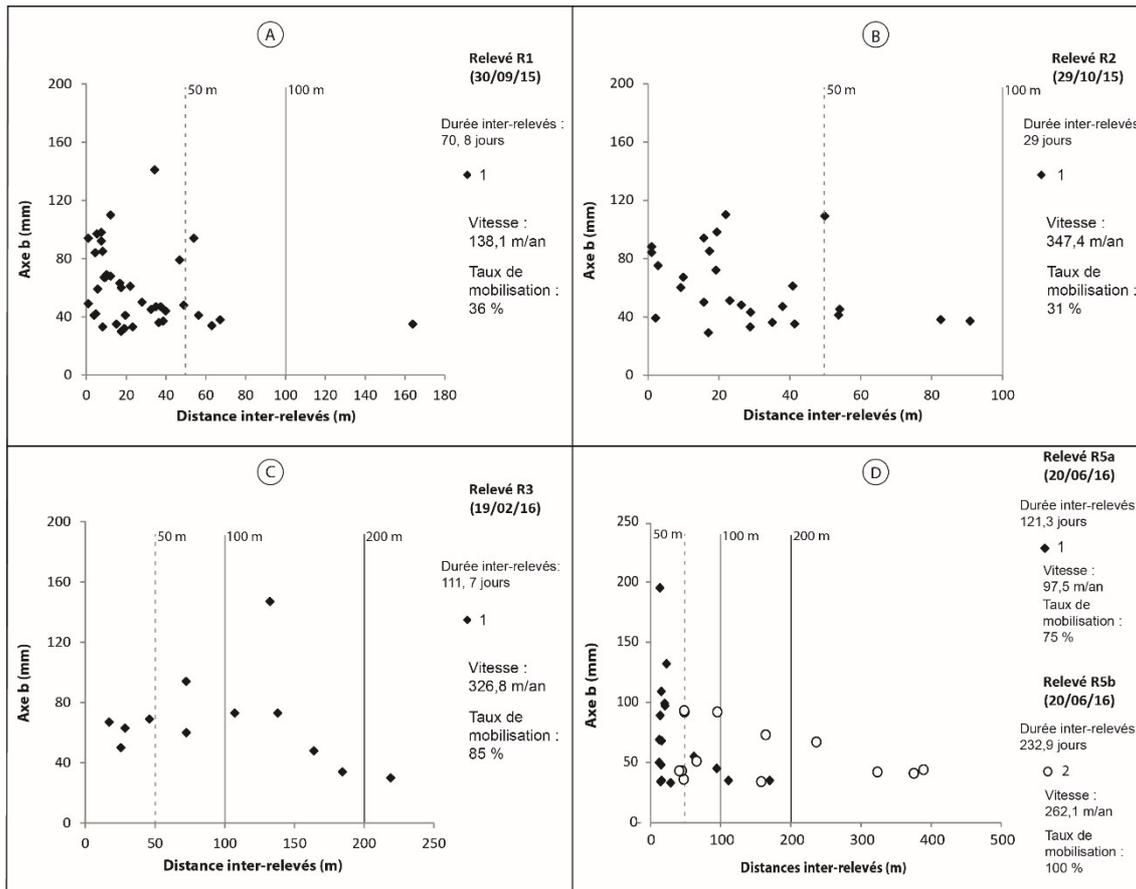


Figure 14 : Figure 14. Distances inter-relevés parcourues par les traceurs mobilisés dans l'ancienne retenue de Pierre Glissotte (S9). A. distance parcourue par les traceurs mobilisés entre la réinjection (18/07/15) et le premier relevé R1 (30/09/15). 1. Traceur mobilisé entre la date d'injection et R1 ; B. distance parcourue par les traceurs mobilisés entre le premier relevé R1 (30/09/15) et le second relevé R2 (29/10/15). 1. Traceurs mobilisé entre R1 et R2 ; C. distance parcourue par les traceurs mobilisés entre le second relevé R2 (30/09/15) et le troisième relevé R3 (19/02/16). 1. Traceur mobilisé entre R2 et R3 ; D. distance parcourue par les traceurs mobilisés entre le troisième relevé R3 (19/02/16) – à défaut le second R2 (29/10/15) - et le cinquième relevé (20/06/16). 1. Traceur mobilisé entre R3 et R5 ; 2. Traceur mobilisé entre R2 et R5 mais non retrouvé au troisième relevé R3.

Ce relai dans les variables de contrôle et la diminution des distances parcourues entre février et juin 2016, malgré le passage de plusieurs crues (Figure 12) témoigne d'un probable début de stabilisation des conditions morphologiques (pente, retour à un D50 caillouteux) susceptible de fixer davantage le substrat du lit. Par ailleurs, outre la possible atteinte d'un profil d'équilibre temporaire (avant la seconde phase d'arasement), le stabilisation verticale et latérale du lit a aussi pu être favorisée par la présence de plusieurs secteurs à blocs pluri-décimétriques et à affleurements de roche mère (Figure 15). Ces points durs limitent en effet l'incision et dans une moindre mesure l'érosion latérale. Leur rôle « stabilisant » en contexte post-arasement a déjà été souligné par plusieurs auteurs (Pearson et al., 2011 ; Major et al., 2012 ; Wilcox et al., 2014 ; Gartner et al., 2015 ; Warrick et al., 2015 ; Ibisate et al., 2016).



Figure 15 : Points durs mis à jour par l'incision dans le lit de l'Yonne occupant l'ancienne retenue de la Pierre Glissotte

2.3 Evolution morphologique sur la 2^e année post-arasement (septembre 2016 et juin 2017)

Un nouveau survol de l'ancienne retenue par drone, effectué en mars 2017, a permis d'évaluer les dynamiques sédimentaires intervenues lors de la seconde année post-arasement. Comme le laissaient présager certaines observations réalisées au début de l'été 2016 (ralentissement du transport, mise en place d'un tri granulométrique, apparition de points durs, etc.), la période septembre 2016-août 2017 a été moins dynamique sur le plan géomorphologique (Figure 16). En effet, le calcul des volumes érodés, 600 m³ entre avril 2016 et mars 2017 contre 9600 m³ entre juillet 2015 et avril 2016, confirme ce retour à une géométrie et morphologie plus stable. Cette seconde période a même vu la formation et/ou la stabilisation de certains dépôts (170 m³ de dépôts calculés entre avril 2016 et mars 2017). En août 2016, une végétation herbacée avait d'ailleurs déjà colonisé les dépôts de l'ancien réservoir non mobilisés jusqu'alors, ainsi que les berges du nouveau chenal. Une végétalisation plus timide commençait également à s'installer sur des dépôts caillouteux et sableux stabilisés au sein du nouveau chenal. Cette végétalisation des dépôts initiaux (sableux et vaseux), comme des dépôts accumulés (sableux et surtout caillouteux) après la première phase s'est maintenue durant l'hiver 2016-2017 et s'est poursuivie à partir du printemps 2017, comme l'illustre les photographies de la Figure 17.

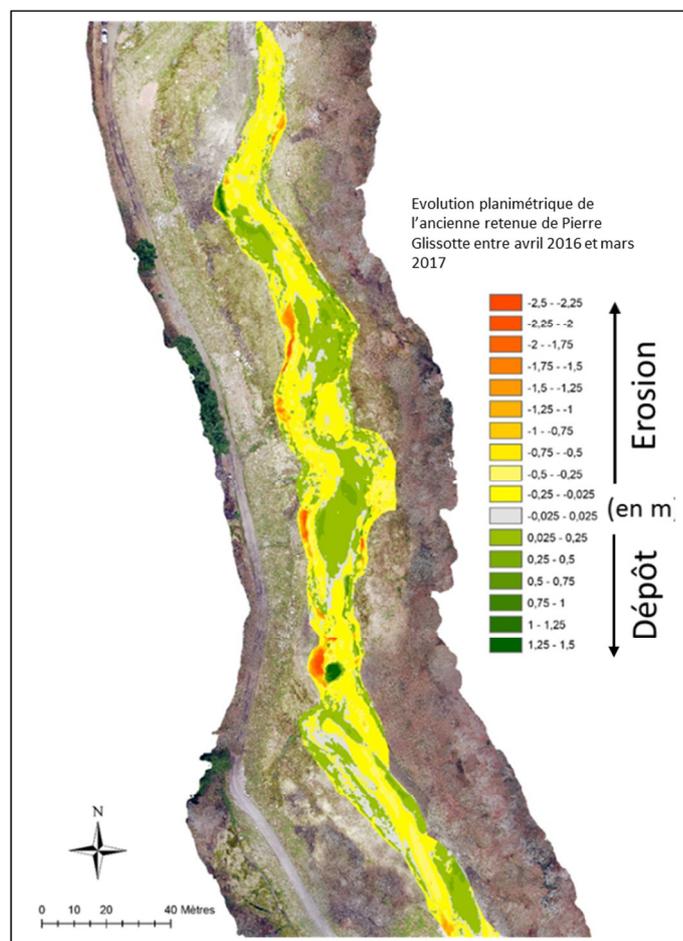


Figure 16 : Evolution planimétrique de l'ancienne retenue entre avril 2016 et mars 2017



Figure 17 : Exemple de formation et stabilisation d'un banc caillouteux entre janvier 2016 et octobre 2017

L'exemple de ce banc (Figure 17) est également intéressant car il rappelle le modèle d'évolution du chenal proposé par Evans (2007) dans lequel certains bancs, après accumulation, se stabilisent puis sont colonisés par la végétation (*back-fill terraces*). A Pierre Glissotte, comme sur le réservoir de l'Ivex étudié par Evans (2007), ces dépôts situés à proximité d'un pied berge font souvent face à une berge « non-protégée » soumise au sapement et encline à l'érosion ou/et l'effondrement. Il faut également ajouter qu'à Pierre Glissotte, à l'aval de ces dépôts caillouteux ou sablo-caillouteux (A), peuvent se trouver des dépôts (B) composés de sables et de sédiments plus fins, effondrés de la berge et désormais en cours de stabilisation. En octobre 2017, les bancs caillouteux pouvaient atteindre entre 30 cm et 85 cm d'épaisseur. Pour ces valeurs respectives, la hauteur maximale entre le sommet du banc et le fond du lit a alors été mesurée à 50 cm et 125 cm.

Sur cette seconde année de suivi on note également un changement de tendance dans l'évolution du D_{50} des bancs présents dans l'ancienne retenue (Figure 18). Sur les trois bancs échantillonnés (Figure 11), on assiste à une diminution de 4 à 6 mm du D_{50} entre août 2016 et mars 2017. Cela traduit la diminution de la capacité de transport de l'Yonne la seconde année de suivi du fait de la réduction de la pente et de l'augmentation de la largeur. Ainsi l'augmentation du D_{90} résulte du départ des sédiments caillouteux moyens et fins, ne laissant sur place que les plus gros éléments.

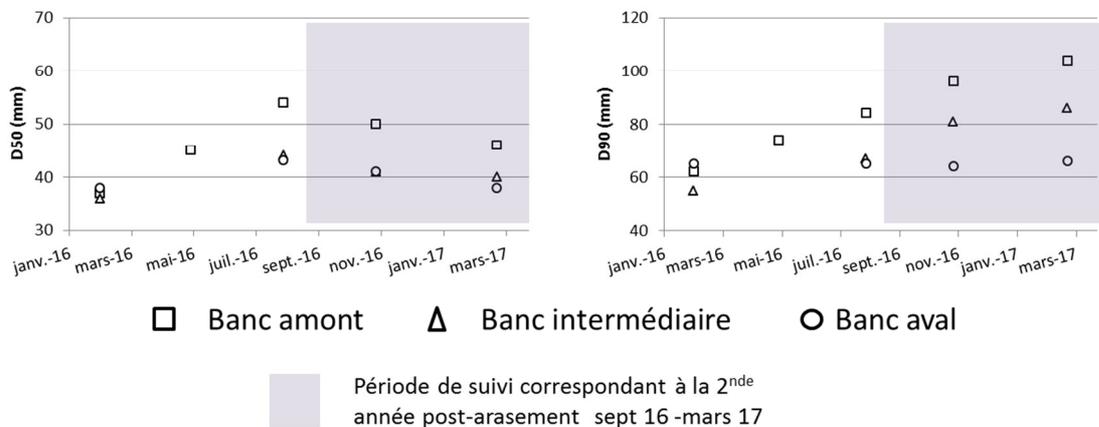


Figure 18 : Evolution du D_{50} et du D_{90} au sein de l'ancienne retenue (3 bancs d'échantillonnage)

Un relevé de la position des traceurs a été réalisé en février 2017, soit 8 mois après le dernier relevé effectué en juin 2016 (Figure 19). Entre les deux, un épisode de crue important s'est déroulé le 22 novembre 2016, avec un pic de débit de 10,8 m³/s (soit 0.67 Q_{2ans}). Malgré cela, le taux de mobilisation et la distance moyenne parcourue, respectivement 6 % et 16,2 m (soit une vitesse de 24 m/an) sont faibles. La distance moyenne étant notamment rehaussée par un seul traceur qui a parcouru une distance 15 fois plus longue que celle des 3 autres traceurs mobiles (Figure 20). Une hydrologie moins favorable peut être évoquée pour expliquer cette faible mobilisation des particules marquées. Durant l'hiver et le printemps 2016, les épisodes de crues qui ont précédé les relevés (Figure 12) ont atteint des débits proches de celui de novembre 2016 mais ont en revanche duré plus longtemps (multiples pics). En outre, il s'agit cette-fois d'une année de fonctionnement continu de la conduite forcée. En contexte d'hydrologie « naturelle » déjà limitée, cette dérivation du débit ne peut qu'accentuer le ralentissement de l'activité érosive dans la retenue.

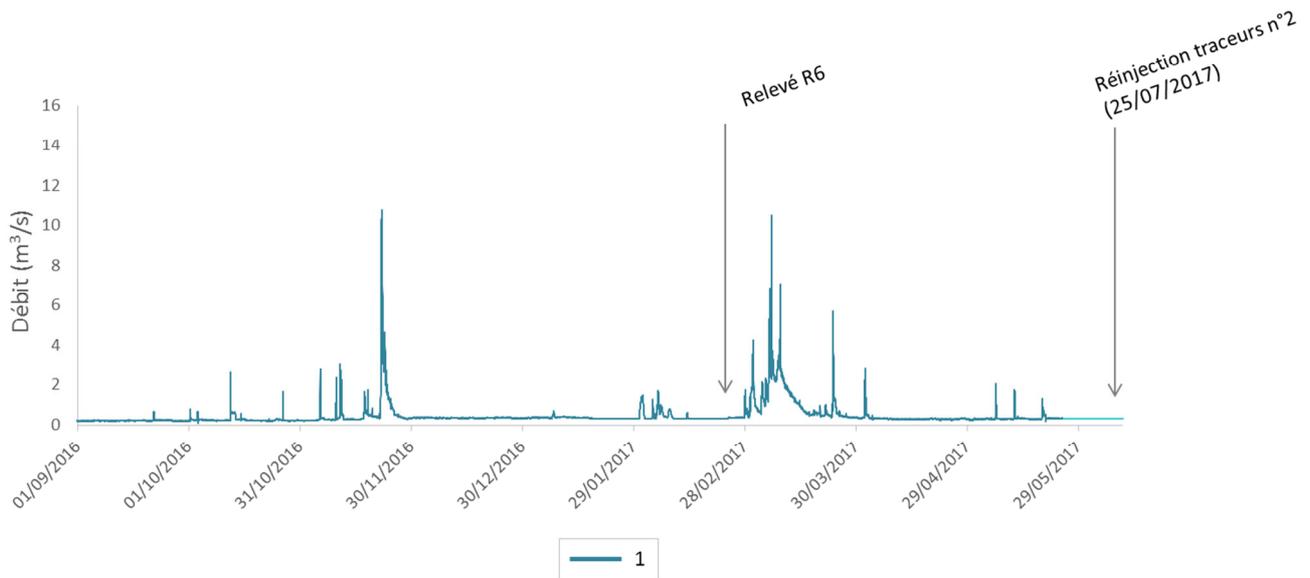


Figure 19 : Hydrogramme et chronologie des relevés PIT tag dans l'ancienne retenue de Pierre Glissotte (site S9) ; sept 16-juin 2017. 1. Débit calculé par courbe de tarage.

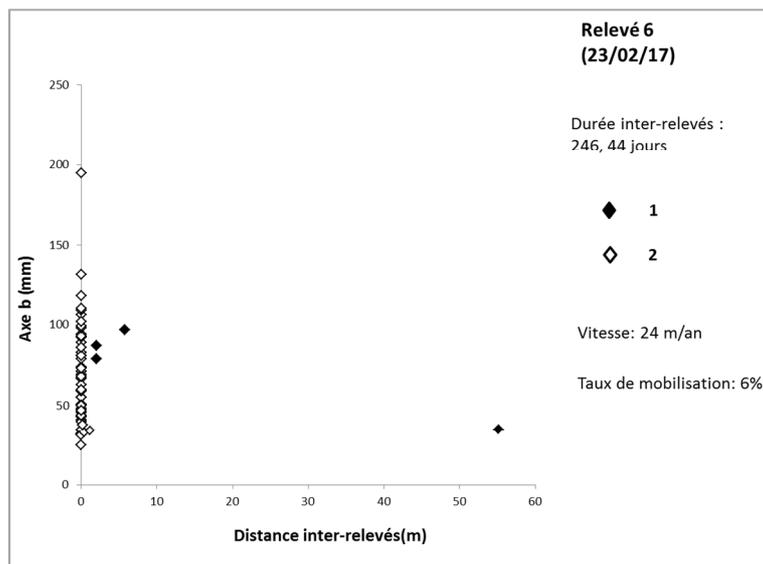


Figure 20 : Distance parcourue par les traceurs mobilisés entre le cinquième relevé R5 (20/06/16) et le sixième relevé R6 (23/02/17). 1. Traceur mobilisé entre le 20/06/16 et 23/02/17 ; 2. Traceur n'ayant pas été déplacé entre le 20/06/16 et le 23/02/17.

La figure 21 montre que la faiblesse du transport enregistré en cette seconde année post-arasement semble spécifique au site de Pierre Glissotte, avec des distances qui deviennent bien inférieures aux valeurs enregistrées sur les autres sites (tableau de droite), quand elles reflétaient l'année précédente (tableau de gauche) le dynamisme géomorphologique intense d'un site en pleine transition. Ce changement marqué de dynamiques, associé au fait qu'un seul relevé ait été réalisé, empêche de bien appréhender les conditions critiques de mise en mouvement (points d'interrogation dans le tableau de droite).

Site	Dist moy (m)	Dist max (m)	Vitesse moy (m/an)	D _i max mobilisé (mm)	Q _{cr} (m ³ /s)	Q _{cr} /Q ₂ ans
Mouillefert (S6)	61	115	40,6	148	7,4	0,50
TCC (S7)	157,9	601,9	92,9	175	6,3	0,40
Ancienne retenue (S9)	114,6	452,8	133,7	147	3,1	0,19
Pré Bertrand (S8)	77,7	291	51,8	122	7,9	0,46

Site	Dist moy (m)	Dist max (m)	Vitesse moy (m/an)	D _i max mobilisé (mm)	Q _{cr} (m ³ /s)	Q _{cr} /Q ₂ ans
Mouillefert (S6)	48,14	149	55,7	130	7,4	0,50
TCC (S7)	60	250	75,5	114	6,3	0,40
Ancienne retenue (S9)	16,2	55	24	97	?	?
Pré Bertrand (S8)	56,6	101,3	59,6	121	7,9	0,46

Figure 21 : Comparatifs des résultats de suivi du transport obtenus sur les différents sites d'études installés sur l'Yonne. Période octobre 2014 – juillet 2016 (gauche); période mai 2016 - avril 2017 (droite).

Les comparaisons temporelles et spatiales du transport observé à Pierre Glissotte, avec les autres sites de suivi, confirment une nouvelle fois la stabilisation du lit qui accompagne la perte de capacité de transport de la rivière durant cette seconde année. La faiblesse du transport semble même devenir à son tour une spécificité du site. La pente, bien plus faible dans l'ancienne retenue par rapport au linéaire environnant, et l'érosion demeurent contrôlées par plusieurs biais : les 4 mètres restant de l'ouvrage ; les points durs granitiques apparus dans le nouveau lit de la rivière. Il faut également mentionner la présence d'un important merlon de protection sur une dizaine de mètres de longueur dans la concavité d'un méandre en rive gauche. Ce merlon, installé pour protéger la nouvelle conduite forcée, empêche la rivière de retrouver son lit pré-barrage dans les 60 derniers mètres précédant le barrage. Il devrait néanmoins être reconnecté au lit actuel lors de la seconde phase d'arasement débutant en octobre 2017.

3 Conclusion

Le suivi hydromorphologique effectué suite à la première phase d'arasement a mis en évidence la vitesse et les modalités du réajustement morphologique intervenu au sein de l'ancienne retenue de Pierre Glissotte. Le recoupement des données acquises par les diverses méthodes déployées (levés topographiques, photogrammétrie SFM, traçage RFID, mesures granulométriques, etc.) a permis de comprendre les dynamiques à l'œuvre tandis que les singularités géomorphologiques associées à un contexte de post-arasement ont pu être mieux saisies à travers la comparaison avec les 3 autres sites de suivi installés sur l'Yonne, au fonctionnement plus « classique ».

D'abord provoquée par l'abaissement de la ligne d'eau à la sortie de la retenue, l'érosion intense du réservoir, dès les premières semaines, en débit de base, a également réactivé la charge caillouteuse présente en queue de retenue. Les vitesses de charriage élevées enregistrées au cours des 3 premiers mois de suivi illustrent davantage l'instabilité morphologique d'un site en transition plutôt que la capacité de transport réelle de l'Yonne. Les crues de l'hiver 2015-2016 et du printemps 2016 ont à leur tour contribué à l'érosion des dépôts du réservoir en s'additionnant à ce contexte d'instabilité morpho-sédimentaire. Les diverses étapes identifiées du réajustement s'inscrivent aisément dans les modèles d'évolution proposés par Doyle *et al.* (2003) et Evans (2007). La vitesse d'érosion élevée des dépôts de la retenue (23% du réservoir en 9 mois) apparaît en revanche plus originale au vu des caractéristiques de l'opération (arasement séquencé) et de celles du réservoir (sédiments sablo-vaseux). Le ralentissement de la dynamique érosive au cours de la seconde année post-arasement s'explique par une hydrologie moins favorable mais surtout par la stabilisation « naturelle » (points durs dans le lit de la rivière, réduction de la pente, largeurs pleins bords plus importante) ou contrainte (structure restante du barrage, dérivation du débit, merlon d'enrochement) de la morphologie façonnée durant la première année.

L'intensité des réajustements observés dans l'ancienne retenue fait qu'à la veille de la seconde phase d'arasement, il demeure malgré tout difficile de prévoir quelle sera la réaction de la rivière. En effet, en dépit d'un abaissement identique (moins 3 mètres) à celui opéré lors de la première phase, les conditions sont désormais bien différentes de celles qui existaient avant la première phase : substrat désormais caillouteux, végétalisation en cours des dépôts anciens ou récents non remobilisés, blocs et affleurements de roche-mère occupant le nouveau lit en plusieurs secteurs, dérivation du débit opérationnelle etc. La poursuite du suivi après la seconde phase apparaît donc d'autant plus intéressante que les paramètres physiques « pré-arasement » du site ont évolué. De plus, outre l'intérêt de comprendre les effets d'une opération d'arasement dans sa totalité, et en intégrant donc les sous-évolutions de forme et de processus observées, il est aussi important d'étendre le suivi sur une certaine durée afin de pouvoir étudier les impacts à plus long-terme d'une opération de ce type, sur le site même, mais aussi sur le linéaire environnant (ex : extension vers l'amont de l'érosion régressive ? conséquences en aval du rétablissement de la continuité sédimentaire ?).

En complément de ces questions sur les processus géomorphologiques immédiats ou à venir, essentielles dans l'étude de toute opération de la restauration écologique d'un hydrosystème, ce projet d'effacement, dernière intervention anthropique lourde en date sur la rivière, invite également à regarder en arrière en vue de retracer la trajectoire de l'Yonne supérieure et de son bassin versant à plus long terme. L'ancienneté et la diversité des influences anthropiques potentielles et avérées sur la rivière (exploitations minières, moulinage, flottage du bois, hydroélectricité, etc.) ne peuvent qu'alimenter le questionnement entamé ces dernières années sur le sens de la restauration écologique d'un hydrosystème. Cette reconstitution de la trajectoire de l'Yonne permet qui plus est de mieux appréhender les significations, enjeux et les complexités de l'opération d'arasement actuel (intégration des changements affectant les variables de contrôle de la dynamique fluviale dans le temps et l'espace, des influences héritées sur les formes et processus fluviaux actuels, etc.).

Bibliographie

Benoit P. et Berthier K. (2005). Les aménagements hydrauliques liés au flottage du bois : leur impact sur le milieu fluvial XVIe- XVIIe siècles. *Forêt et transports modernes*, IHMC-CNRS, Cahier d'études, 15, 41-55.

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.

Brodu N. et Lague D. (2012). 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 121-134.

Cauuet B, Tamas C-B, Guillaumet J-P, Petit C. et Monna F. (2006). Les exploitations minières en pays éduen. *Dossiers d'Archéologie*, n° 316, 20-25.

Delagrive J. (1738). *Cours de la Seine et des rivières et ruisseaux commercans qui y affluent*. BNF, Cartes et plans, GE CC – 1389 (RES).

- 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.
- Dufour S. et Piégay H. (2009). From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: Forget natural references and focus on human benefits. *River Research and Applications* 25, 568-581.
- Evans J.E. (2007). Sediment impacts of the 1994 failure of IVEX Dam (Chagrin River, NE Ohio): A test of channel evolution models. *Journal of Great Lakes Research* 33(sp2), 90-102. DOI: 10.3394/0380-1330(2007)33[90:SIOTFO]2.0.CO;2
- Gartner J.D., Magilligan F.J., Renshaw C.E. (2015). Predicting the type, location and magnitude of geomorphic responses to dam removal: role of hydrologic and geomorphic constraints. *Geomorphology*, 251, 20-30. DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.02.023
- Gilet L., Gob F., Virmoux C., Touche J., Harrache S., Gautier E., Moës M. (2016). Suivi de l'évolution morphologique et sédimentaire de l'Yonne suite à la première phase du démantèlement du barrage de Pierre Glissotte (Massif du Morvan, France). Rapport Piren., 24p.
- Gilet L., Gob F., Virmoux C., Touche J., Harrache S., Gautier E., Moës M., Thommeret N., Jacob-Rousseau N. (2017). Suivi de l'évolution morphologique et sédimentaire de l'Yonne suite à la première phase du démantèlement du barrage de Pierre Glissotte (Massif du Morvan, France). *Géomorphologie*, accepté pour publication.
- Gob F., Bilodeau C., Thommeret N., Belliard J., Albert M-B., Tamisier V., Baudoin J-M. et Kreutzenberger K. (2014). Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (CARHYCE) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 20 - n° 1, pp. 57-72. DOI : 10.4000/geomorphologie.10497
- Gob F., Gautier E., Virmoux C., Grancher D., Tamisier V., Widyaputra Primanda K., Wibowo S-B., Sarrazin C. Belizal E., Ville A., et Lavigne F. (2016). River responses to the 2010 major eruption of the Merapi volcano, central Java, Indonesia. *Geomorphology*. 273. 244-257. 10.1016/j.geomorph.2016.08.025.
- Ibáñez A., Ollero A., Ballarín D., Horacio J., Mora D., Mesanza A., Ferrer-Boix C., Acín V., Granado D., et Martín-Vide J.-P. (2016). Geomorphic monitoring and response to two dam removals: rivers Urumea and Leitzaran (Basque Country, Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 41, 2239–2255. DOI: 10.1002/esp.4023
- Jouffroy-Bapicot I. (2010). Évolution de la végétation du massif du Morvan (Bourgogne, France) depuis la dernière glaciation à partir de l'analyse pollinique. Variations climatiques et impacts des activités anthropiques. Thèse de doctorat d'archéologie, Université de Franche-Comté, 373 p + ann.
- Jouffroy-Bapicot I., Petit C., Monna F. et Richard H. (2008). Evolution de la végétation du massif du Morvan : résultats des premières analyses polliniques et mise en évidence de l'impact des activités paléométallurgiques. In : D. Sirugue (éd.) *Séminaire "Forêt du Morvan"*. Centre Archéologique Européen du Mont-Beuvray, Glux-en-Glenne (58), septembre 2004.
- Jouffroy-Bapicot I., Vannièr B., Monna F., Gauthier E., Richard H. et Petit C. (2013). 7000 years of vegetation history and land-use changes in the Morvan Mountains (France) : A regional synthesis. *The Holocene*, 23(12):1888-1902, DOI : 10.1177/0959683613508161.
- Lespez L., Germaine M-A et Barraud R. (2016). L'évaluation par les services écosystémiques des rivières ordinaires est-elle durable ? *Vertigo*, Hors série 25, 1-22.
- Major J.J., O'Connor J.E., Podolak C.J., Keith M.K., Grant G.E., Spicer K.R., Pittman S., Bragg H.M., Wallick J.R., Tanner D.Q., Rhode A., et Wilcock P.R. (2012). *Geomorphic response of the Sandy River, Oregon, to removal of Marmot Dam*. US. Geological Survey, Professional Paper 1792.
- Manière L. (2012). Evolutions géomorphologique de l'Yonne dans le Morvan consécutive à l'industrie du flottage du bois dans le Morvan (XVI^e-XIX^e siècle). Géographie, mémoire de master 1, Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 117 p.

- Monna F., Petit C., Guillaumet J.-P., Jouffroy-Bapicot I., Blanchot C., Dominik J., Losno R., Richard H., et Lévêque J., et Château C. (2004). History and Environmental Impact of Mining Activity in Celtic Aeduan Territory Recorded in a Peat Bog (Morvan, France). *Environmental Science and Technology*, vol 38(3), 665-673.
- Monna F., Camizuli E., Nedjai R., Cattin F., Petit C., Guillaumet J.-P., Jouffroy-Bapicot I., Bohard B., Château C., et Alibert P. (2014). Tracking archaeological and historical mines using mineral prospectivity mapping. *Journal of Archaeological Science*. 49, 57-69.
- Pearson A.J., Snyder N.P., et Collins M.J. (2011). Rates and processes of channel response to dam removal with a sand-filled impoundment. *Water Resources Research*, 47 (8), W08504. DOI:10.1029/2010WR009733.
- 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.
- Reillé. (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.
- Touche J. (2017). Suivi de l'arasement du barrage de la Pierre-Glissotte à partir d'images UAV (unmanned aerial vehicle). Géographie, mémoire de master 2, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 84p.
- Warrick J.A., Bountry J.A., East A.E., Magirl C.S., Randle T.J., Gelfenbauma G., Ritchie A.C., Pess G.R., Leung V., Duda J.J. (2015). Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Source-to-sink sediment budget and synthesis. *Geomorphology*, 246, 729-750. DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.01.010.
- 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.
- Wilcox A.C, O'Connor J.E, Major J.J. (2014). Rapid reservoir erosion, hyperconcentrated flow, and downstream deposition triggered by breaching of 38-m-tall Condit Dam, White Salmon River, Washington. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 119 (6), 1376–1394. DOI:10.1002/2013JF003073.
- Wolman G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions of American Geophysical Union*, 35 (6), 951-956.