



**HAL**  
open science

# Reconstitution des débits des crues artificielles destinées au flottage du bois dans le massif du Morvan (centre de la France, XVI e -XIX e siècles) d'après les documents d'archive et la géomorphologie de terrain

Anne-Sophie Poux, Frédéric Gob, Nicolas Jacob-Rousseau

## ► To cite this version:

Anne-Sophie Poux, Frédéric Gob, Nicolas Jacob-Rousseau. Reconstitution des débits des crues artificielles destinées au flottage du bois dans le massif du Morvan (centre de la France, XVI e -XIX e siècles) d'après les documents d'archive et la géomorphologie de terrain. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2011, 17 (2), pp.143 - 156. 10.4000/geomorphologie.9351 . hal-01396105

**HAL Id: hal-01396105**

**<https://hal.science/hal-01396105>**

Submitted on 13 Nov 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Reconstitution des débits des crues artificielles destinées au flottage du bois dans le massif du Morvan (centre de la France, XVI<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècles) d'après les documents d'archive et la géomorphologie de terrain

## *Discharge reconstruction of artificial water releases for timber floating in the Morvan Massif (central France, 16th-19th centuries) from historical archives and geomorphological observations*

---

Anne-Sophie Poux\*, Frédéric Gob\*\*, Nicolas Jacob-Rousseau\*\*\*

### Résumé

Le flottage du bois dans le Morvan a fait l'objet de nombreuses études historiques ou économiques. Toutefois, la modification de l'écoulement pour le flottage à bûches perdues n'a jamais été véritablement étudiée d'un point de vue hydrologique. Pendant plus de deux siècles, des lâchers d'eau répétés ont été effectués à partir d'étangs artificiels afin de faciliter le transport des bûches dans les petits ruisseaux morvandiaux. Grâce aux données historiques existantes, le débit de ces lâchers a pu être évalué : il était compris entre 2 m<sup>3</sup>/s et 3 m<sup>3</sup>/s à l'aval immédiat des étangs, ce qui est considérable dans de petits ruisseaux dont le bassin-versant ne couvre que quelques kilomètres carrés. La comparaison de ces chiffres avec l'écoulement naturel des rivières étudiées fait apparaître une différenciation très nette entre les cours d'eau de tête de bassin, où les crues artificielles étaient exceptionnellement fortes, et l'Yonne amont, où les crues pour le flottage demeuraient dans la classe des événements ordinaires. Ces manipulations d'écoulements ont entraîné des perturbations disparates sur le milieu fluvial, les ruisseaux de tête de bassin ayant été les plus perturbés. Par ailleurs, l'estimation de la puissance spécifique critique dissipée à l'aval des barrages et les observations géomorphologiques montrent que la capacité de cisaillement des écoulements artificiels était très importante. On peut ainsi faire l'hypothèse que les lâchers d'eau destinés au flottage ont favorisé l'érosion des vallons et alimenté une vague sédimentaire.

**Mots clés :** flottage du bois, Morvan, débit, puissance spécifique, transport solide.

### Abstract

*Timber floating industry of the Morvan Massif (central France) has been studied through several historical and economical studies. Its hydrological and geomorphological aspects and consequences are however still relatively unknown. For more than two centuries, water releases were regularly created from small artificial reservoirs in order to ease the transportation of logs through the small tributaries towards the Yonne River. The aim of this study was to reconstruct discharges of these artificial floods from historical data. They show that discharges ranged between 2 m<sup>3</sup>/s and 3 m<sup>3</sup>/s immediately downstream the reservoirs. Such discharge may be considered as major flood when considering catchments of only few square kilometres. In the headwater stream the discharges of those artificial floods may therefore be considered as extreme events in comparison to the natural regime. Further downstream, on the main course of the Yonne River, 2-3 m<sup>3</sup>/s correspond to ordinary floods in natural regimes. This discrepancy between the very upper part of the course and the downstream part underwent a major difference in terms of geomorphological impacts. An estimation of the specific stream power of those artificial floods and geomorphologic field survey suggest that the small head water streams have been highly eroded propagating a sediment wave further downstream.*

**Key words:** timber floating, discharge, stream power, sediment transport.

---

\* CEMAGREF, UR HBAN – Parc de Tourvoie – BP 44 – 92163 Antony Cedex – France.

\*\* Université Panthéon-Sorbonne (Paris 1) – CNRS, UMR 8591 (Laboratoire de Géographie Physique) – 1, place Aristide Briand – 92195 Meudon Cedex – France (frederic.gob@univ-paris1.fr).

\*\*\* Université Lumière (Lyon 2) – CNRS, UMR 5133 (Archéorient) – 5, avenue Pierre Mendès-France – 69676 Bron Cedex – France (Nicolas.Jacob@univ-lyon2.fr).

## Abridged English version

Timber floating became a major industry in the Yonne basin between the 16<sup>th</sup> and 19<sup>th</sup> centuries due to the rapid growth of Paris and its increasing energy needs. The Yonne River is a tributary of the Seine River. Its source is located in the Morvan region, a granitic small massif in the south eastern part of the basin. Logs were transported by floating from the production area in the upper valley to Paris through the rivers Yonne and Seine. In order to ease log transport in the steep and narrow headwater streams, river channels were reshaped and artificial floods were regularly created from small reservoirs obstructing the very top of the valley (Guillien, 2001; Rezé, 2002; Benoit and Bertier, 2005; Guillien, 2007). The extent and the duration of the timber floating industry led to major geomorphological, hydrological and ecological perturbations to the fluvial hydrosystem. In order to study the impacts of this industry, we tried to reconstruct the artificial conditions of flow during the floating period using archives and field surveys.

The reservoirs were located and dated using archives and historical maps in order to evaluate the modifications to the hydrological regime (Gourdain 1732; Delagrive, 1738; Dupin, 1817; Grosbon, 1994; Benoit et al., 2002; Guillien, 2007). At the end of the 18<sup>th</sup> century, reservoirs were present on every little tributary of the upper valley. Their volumes were reconstructed based on the areas of the reservoirs and the heights of their dykes. From historical data, we know that it only took a couple of hours to empty the reservoirs and a couple of days to fill them. Over decades, between November and February, the reservoirs were emptied as often as possible (probably several times per week). Small steep and incised streams of no more than 5-m wide regularly experienced discharges of 2-3 m<sup>3</sup>/s on average. The energy associated with the discharges in these small streams is very high: stream powers range between 250 W/m<sup>2</sup> and 400 W/m<sup>2</sup>. In such conditions, the streams should have been able to transport pebbles and boulders of 15-35 cm in diameter and therefore induce very high sediment transport rates (Petit et al., 2005).

Further downstream, the channel of the main valley is narrower, the slopes are less steep, the valley is larger and there is a floodplain. In order to prevent the loss of logs on the floodplain, the artificial water releases were controlled in order to maintain the water level beneath the 'bankfull'. Artificial discharges were between 3 m<sup>3</sup>/s and 5 m<sup>3</sup>/s. This corresponds to an ordinary discharge with a stream power of 30-70 W/m<sup>2</sup>. Nowadays, this discharge is reached about 30 days/a but it was considerably more frequent during the floating period. Such floods should have been able to transport much smaller pebbles of 4-8 cm in diameter. Sediment transport rates were therefore much more limited in the main valley than upstream.

As a result of the timber floating industry, the hydrological regime of the Yonne River was heavily modified increasing the frequency of morphogenetic flood event. As a consequence, the upper part of the Yonne valley may have experienced a sedimentary wave descending from the headwater streams to the main valley. A couple of field observations show head-

water streams display incised morphologies and the present-day riverbeds are noticeably lower than what could be the riverbeds present prior to the timber-floating industry (further observations still have to confirm this hypothesis). Over decades, a very large volume of coarse material was carried downstream to the main valley. There, due to the lower energy of the flow, the sediment was deposited in the riverbed, preventing its incision and leading to aggradation.

## Introduction

Cet article analyse les effets du flottage du bois sur les milieux fluviaux du bassin de l'Yonne. Pendant plusieurs siècles, en effet, cette entreprise a induit de nombreuses transformations de l'hydrosystème fluvial car elle a affecté les écoulements, la forme du chenal et le transport sédimentaire. Malgré sa disparition, l'économie du flottage a laissé un héritage d'équipements, d'aménagements de berge et de formes fluviales qui constituent désormais des éléments de la structure des milieux aquatiques dans un bassin encore peu étudié sous cet angle. En combinant l'apport de sources documentaires et les observations géomorphologiques de terrain, nous avons cherché à mieux connaître les processus qui agissaient à l'époque du flottage. Le présent article propose ainsi d'aborder le système par l'amont, c'est-à-dire par la gestion des écoulements destinés à assurer des débits suffisants pour le transport du bois, puisqu'ils sont à l'origine des transformations de la dynamique des cours d'eau. Cela correspond logiquement aux têtes de bassin, là où étaient localisés les étangs artificiels qui assuraient des lâchers nécessaires au transport des bûches.

Partout en France avant la révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle, les rivières ont été utilisées pour le transport du bois : l'Aude, dès le XIII<sup>e</sup> siècle, la Durance, la Dordogne, la Sarre ou encore l'Ariège à partir du XVI<sup>e</sup> siècle (Bruley, 1995). Dans le Bassin parisien, depuis la fin du Moyen Age, la population de Paris n'a cessé de s'accroître et la demande en bois d'augmenter (Benoit et Berthier, 2005 ; Bourquin, 2006). Ainsi, au XVI<sup>e</sup> siècle, les forêts proches de Paris ne suffisaient plus – à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, un parisien consomme près d'une tonne de bois par an ; Berthier, 2007 – et les autorités parisiennes et royales s'intéressèrent au bassin de l'Yonne, trait d'union entre la capitale et les massifs forestiers du Morvan (Guillot-Chene, 1979). Le flottage du bois à bûches perdues et en trains se développa alors sur les rivières descendant de ce massif. La première pratique consiste simplement à déverser les bûches dans le cours d'eau, la seconde à constituer des radeaux qui sont guidées comme des embarcations. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, l'entreprise avait pris dans le bassin de l'Yonne des proportions inégalées ailleurs en France, au point que tous les autres usages de la rivière lui étaient subordonnés (Bruley, 1995).

Les conséquences sur les milieux aquatiques ont été perçues par les contemporains du flottage comme par les historiens qui en ont retracé les logiques économiques (Benoit et Berthier, 2005). Cependant, la mesure des phénomènes, la reconstitution des processus qui agissaient à l'époque du flottage comme la caractérisation de l'état actuel des rivières

n'ont pas encore été vraiment tentées. La question ne se pose pas seulement pour les rivières qui sont issues du massif du Morvan car en d'autres régions du globe, le flottage a pris parfois des proportions comparables. En Suède, il a été pratiqué à partir du XIX<sup>e</sup> siècle sur presque toutes les rivières du nord du pays et s'est poursuivi jusqu'aux années 1970. Au Canada, le flottage qui a été organisé dans le nord du pays à partir des années 1830 est progressivement en train de disparaître (Tremblay, 1991). Quelques analyses des impacts du flottage ont été faites à l'occasion de projets de réhabilitation des cours d'eau ayant subi de profondes modifications environnementales (Palm, 2007). Les conséquences de cette activité ont été de trois ordres : hydrologiques, géomorphologiques et écologiques. Comme dans le Morvan, les cours d'eau ont été aménagés par la construction d'étangs ou de canaux, par la suppression de bras secondaires ou la destruction de blocs rocheux dans les lits. La rectification et la canalisation des chenaux ont eu pour corollaires le rétrécissement de la longueur des rivières, l'augmentation de la pente et de la vitesse moyenne des écoulements dans le chenal principal. Au Canada et en Suède, deux études récentes sur le flottage toujours pratiqué ont analysé ces perturbations : à l'aval des barrages le contrôle de l'écoulement a comme conséquences de prolonger les étiages et d'occasionner des crues subites et brèves lors des lâchers (Tremblay, 1991 ; Palm, 2007). Les modalités et les effets du contrôle des écoulements ont été bien étudiés dans le cas des grands barrages construits pendant la période contemporaine (Graf, 1980 ; Marnézy, 1999). Pour les périodes anciennes les auteurs ont surtout décrit les incidences de l'exploitation énergétique ou industrielle de l'eau comme l'alimentation de papeteries, de moulins ou de filatures (Berger, 1998 ; Jacob, 2005 ; Météry, 2009). En revanche, il ne semble pas qu'on ait encore procédé à une reconstitution des rythmes et du volume des éclusées nécessaires au flottage.

Ces nouvelles conditions d'écoulement ont agi sur les dynamiques géomorphologiques : les fréquents lâchers d'eau ont déstabilisé les formes ou les dépôts alluviaux ou accentué l'érosion des berges. Dans le cas du Morvan, J.-P. Bravard (1999) signale l'érosion de la base des versants argileux et l'augmentation de la charge transportée en suspension pendant les lâchers d'eau, P. Benoit et K. Berthier (2005) évoquent également une forte modification des conditions d'érosion et de transport des alluvions du fait de la canalisation des cours d'eau et de l'élimination de la ripisylve. S'il y a encore peu de publications sur les cours d'eau flottés, les effets de l'exploitation intensive des ressources naturelles ont été davantage étudiés, en particulier dans les secteurs d'extraction minière. Des géographes ont mis en évidence des métamorphoses anthropiques des cours d'eau consécutives au rejet des stériles miniers et ont présenté des estimations de la durée de ces effets qui peut atteindre plusieurs décennies (James, 1989, 1994), ce qui incite à des comparaisons.

Enfin, du point de vue écologique, les conséquences nombreuses sont souvent bien décrites par les auteurs (Nilsson *et al.*, 2005 ; Palm, 2007). La principale est la simplification de l'écosystème et le déséquilibre de la chaîne alimentaire. Les changements hydrologiques et géomorphologiques précé-

demment cités ont pour effet de réduire la densité et la diversité des organismes aquatiques, la qualité et la quantité des habitats, de détruire des zones de frai et d'élevage de poisson par colmatage ou obstruction, d'entraver la bonne circulation des poissons dans la bande active et d'empêcher la reproduction des espèces. Mais il existe aussi des impacts sur la végétation. La ripisylve était détruite afin d'empêcher la formation d'embâcles, ce qui a éliminé certains écotones riverains des cours d'eau. La chenalisation des lits a également entravé les interactions entre les cours d'eau et les versants. Certaines plantes aquatiques ont disparu avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement (Nilsson *et al.*, 2005). Un autre élément souvent mentionné est la modification du substrat du fond du lit par l'accumulation de bois et d'écorces (Tremblay, 1991 ; Nilsson *et al.*, 2005).

Au total, un vaste champ de recherche sur le flottage est ouvert dans une perspective d'histoire environnementale. L'hypothèse de départ est que la modification des écoulements naturels a affecté le transport sédimentaire et les formes fluviales. Comme des processus hydrogéomorphologiques très supérieurs à la compétence naturelle du cours d'eau ont agi pendant la période d'exploitation, on peut envisager que leurs effets ont persisté longtemps après la fin du flottage et que la structure des milieux actuels leur est en partie imputable. La perturbation de l'écoulement apparaît alors comme le problème crucial d'une analyse des impacts du flottage du bois sur le milieu. Mais comme cette pratique a cessé, notre étude a pour objectif de reconstituer les débits des lâchers d'eau de manière indirecte, à partir de sources historiques et d'observations de terrain. La première étape du travail a consisté à recenser les cours d'eau susceptibles d'avoir été aménagés et à rassembler les informations historiques disponibles sur les techniques utilisées pour le flottage. Les archives devaient également fournir des données sur le nombre d'étangs édifiés dans le bassin de l'Yonne, la date de leur mise en eau, leur volume, la fréquence et l'intensité des lâchers. À partir de ces informations complétées par quelques mesures de terrain, il semblait possible de reconstituer les perturbations de l'écoulement naturel pendant la période d'activité du flottage. Ainsi, grâce au calcul des puissances spécifiques associées aux lâchers, on a cherché à évaluer, en première approche, la fréquence de mise en mouvement du matériau constituant le fond des petits cours d'eau. Enfin, des observations de terrain ont permis de repérer et de mesurer les formes façonnées par ces processus. Nous présenterons dans un premier temps les caractéristiques des secteurs étudiés puis quelques éléments de l'histoire du flottage nécessaires à la compréhension des processus. Seront ensuite exposés la méthode que nous avons élaborée et les résultats suivis de leur discussion.

## **Le secteur d'étude : la haute-Yonne morvandelle, rivière aménagée pour le flottage**

*Le réseau hydrographique et l'hydrologie.* Le Morvan est une région montagnaise, forestière, au sous-sol granitique imperméable et au réseau hydrographique très développé

(Beaujeu-Garnier, 1951). Le sommet culminant, le Haut-Folin, se dresse à 901 m d'altitude sur la ligne de partage des eaux entre le bassin de la Loire et celui de la Seine (fig. 1). La région dispose de ressources qui ont intéressé les entrepreneurs en flottage de bois destiné à Paris. Les grands massifs forestiers paraissent exploités de manière encore extensive au XVI<sup>e</sup> siècle (Guillot-Chene, 1979) sans que l'on sache dans quelle mesure le flottage n'a pas suscité un repeuplement volontaire des versants dès l'Ancien Régime. Les essences dominantes comme le hêtre, le charme et le chêne sont propices au bois de chauffage. Le réseau hydrographique très dense du Morvan, situé en amont de Paris, permet de redescendre facilement les cours jusqu'à la capitale. L'Yonne et la Cure sont les deux principaux cours d'eau de cette région. Presque tous leurs affluents ont à un moment donné ou un autre été flottés pour approvisionner Paris en bois. Dans cet article, seuls seront présentés les résultats obtenus sur l'Yonne amont. Les hautes eaux de l'Yonne et de ses affluents se concentrent pendant les mois d'hiver du fait des fortes précipitations et les débits moyens restent élevés au printemps en raison de la fonte des neiges. Le minimum se situe au cœur de l'été pendant les mois d'août et de septembre. Toutefois, le régime de ces rivières est semi-naturel puisqu'un certain nombre d'étangs et de barrages modifient leur débit. Les crues sont fréquentes mais courtes et subites ; elles traduisent une réponse rapide des bassins aux précipitations (Moreau, 1953). Dans la partie amont des rivières morvandelles, l'écoulement prend un caractère torrentiel : les lits sont parfois profonds et étroits et les profils longitudinaux à pente forte (0,03-0,07 m/m) sont accidentés par des cascades ou des sauts. Par ailleurs, ces rivières charrient des alluvions grossières – le  $D_{50}$  varie de 33 mm à 68 mm et le  $D_{90}$  varie de 76 mm à 117 mm – qui par endroits, se déplacent autour de blocs décimétriques.

*Le flottage du bois dans le Morvan.* Plusieurs études d'histoire des techniques ont

permis de mieux comprendre la mise en place et le fonctionnement de l'industrie du flottage dans le bassin de l'Yonne. Dans le Morvan, la première expérience de flottage de grande ampleur eut lieu en 1546 (Chevrier, 2007) et le premier train de bois arriva à Paris un an plus tard. Le flottage commença sur l'Yonne, la Cure et la Seine dès 1549 mais pendant plusieurs décennies, ces arrivages de bois restèrent irréguliers aussi bien en nombre qu'en volume (Rezé, 2002). Au cours des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles, un ensemble d'aménagements indispensables au bon déroulement du flottage fut peu à peu constitué. Grâce à ceux-ci et à l'organisation efficace du commerce, les volumes de bois acheminés à Paris augmentèrent continuellement jusqu'à atteindre des sommets à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle quand les rivières auraient fourni plus d'un million de stères de bois à Paris (Guillot-Chene, 1979). Par la suite, la construction de lignes de chemin de fer et de canaux ont permis le transport de la houille sur de longues distances ; elle a progressivement remplacé le bois. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le volume de bois flotté n'atteignait ainsi plus que 5 000 stères/a (Guillot-Chene, 1979). Le flottage en train de bois prit fin en 1881 tandis que les derniers flots furent lâchés en 1923 sur la haute-Yonne et en 1927 sur la Cure (Guillien, 2001).

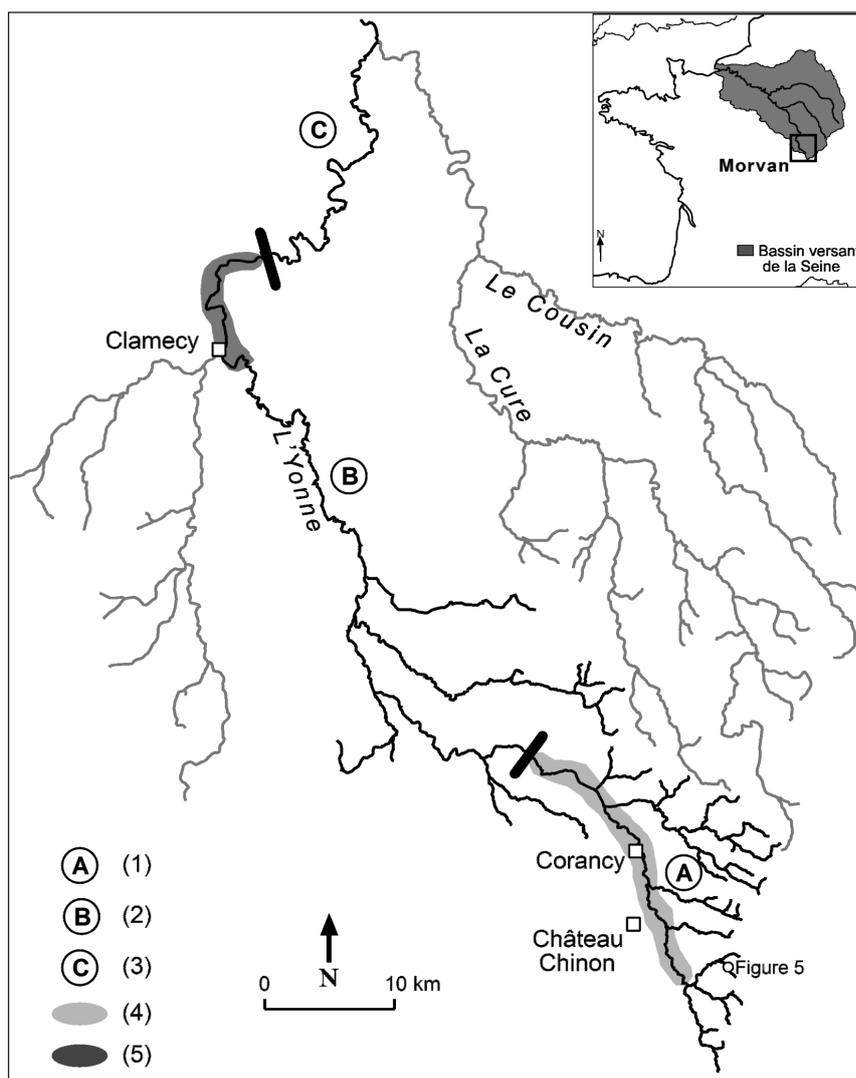


Fig. 1 – Localisation du bassin supérieur de l'Yonne et répartition longitudinale des principales activités du flottage le long du cours d'eau. 1 : secteur concerné par le petit flot ; 2 : secteur concerné par le grand flot ; 3 : secteur concerné par le flottage en train ; 4 : zone de stockage entre petit et grand flot ; 5 : zone de stockage pour assemblage en train.

Fig. 1 – Location of the upper basin of the Yonne River and distribution of timber floating activities along the valley. 1: area along which logs were transported in several small batches; 2: area along which logs were gathered in one large batch; 3: area along which logs were transported through assembled rafts; 4: storage area where logs were gathered together into a large batch; 5: area where logs rafts were built.

*Etapas du flottage et aménagement des chenaux.* Entre le 15 novembre et le 1<sup>er</sup> février, les bûches d'environ 1 m de longueur sont mises à l'eau sur les petits affluents de tête de bassin, à proximité des parcelles forestières d'où elles sont extraites. Après un transport par flottage jusqu'à 35 km des sources, elles sont retirées et stockées dans l'un des 22 ports de jetage situés sur le cours principal de l'Yonne (fig. 1). Cette première étape, appelée le petit flot, se déroule durant l'hiver afin de profiter de la période des hautes eaux. Des étangs permettent toutefois de renforcer artificiellement le débit grâce à des lâchers d'eau. Ces étangs, de taille modeste, sont remplis rapidement (2 j en moyenne) et « ouverts » fréquemment (plusieurs fois par semaine). Entre deux flots, les lits des ruisseaux sont vérifiés, les rochers, les broussailles, les roseaux ou encore les graviers apportés par le flot sont enlevés. La seconde étape, le grand flot, se déroule sur le cours principal de l'Yonne aux environs du 15 mars. Aux lâchers d'eau des étangs s'ajoute alors l'ouverture successive des pertuis situés sur le cours principal de la rivière. Une véritable « mer de bois » descend alors la rivière jusqu'aux ports d'aval (dans la basse vallée ; fig. 2). Une fois sorti de l'eau, le bois est trié puis empilé sur la berge. A la fin de l'été, le bois est prêt à être assemblé en trains et acheminé vers Paris, ce qui constitue la troisième et dernière étape du transport des bûches. L'aménagement des cours d'eau a été entrepris des sources jusqu'au cours moyen de l'Yonne et de ses affluents. L'étroitesse des lits, la faible profondeur de l'eau et la présence de nombreux blocs rocheux rendaient très difficile le flottage à bûches perdues, qui consiste à laisser dériver les bûches au fil de l'eau. De nombreuses rivières, des ruisseaux ou même de simples rus ont dès lors été rectifiés et canalisés afin de faciliter l'écoulement. Sur l'Yonne à Clamecy, la création de nouveaux bras a permis de multiplier les ports de flottage (Nicolas-Delabarre, 1996). Des allingres (petits arrêts construits en perches de bois) ont également été édifiés afin de retenir les bûches dans les ports. Ailleurs, des pertuis retenaient l'eau et facilitaient la des-

cente des trains de bois grâce à des éclusées (Chevrier, 2007). La coupe à blanc de la ripisylve devait également garantir les opérations de jetage, le flottage et la récupération des bûches. Mais dans ce système, l'aménagement décisif consista en un semis très dense d'étangs qui permettaient d'effectuer des lâchers d'eau (nommés « courues ») pour faciliter la descente des bûches (Boissière, 1993 ; Chevrier, 2007).

## Méthode pour une hydrogéomorphologie rétrospective

La démarche que nous avons mise au point se décompose en plusieurs étapes : la collecte d'informations sur les étangs (nombre, localisation, date d'édification, volumes retenus...), puis le calcul du débit des lâchers et leur comparaison avec les écoulements actuels, enfin, le calcul de l'énergie dissipée.

## Caractéristiques des étangs

Plusieurs documents ont permis de dénombrer, de localiser et de dater les étangs de la haute Yonne : deux listes d'étangs sont données dans les ouvrages de C. Grosbon (1994) et d'E. Guillien (2007) ainsi qu'une carte élaborée par P. Benoit *et al.* (2002). Des documents cartographiques anciens ont également été utilisés afin de contrôler la valeur des données : une carte extraite du rapport Gourdain de 1732, la carte publiée en 1738 par l'abbé Delagrive et la carte contenue dans le *Code du commerce des bois et charbons de bois* publié en 1817 par Dupin aîné (Dupin et Guillaume, 1817). Les étangs toujours en eau aujourd'hui ont pu être localisés grâce à la carte topographique actuelle. Les étangs asséchés ont été localisés de deux manières : pour certains, grâce à la mention de l'ancienne digue sur la carte ou la persistance d'un toponyme sans équivoque (*étang de...*), et pour quelques autres, grâce aux sources historiques qui indiquent le nom du ruisseau alimenté et la commune de localisation.

Le volume de chaque étang de l'Yonne est également fourni par les documents anciens : les *Annales des Ponts et Chaussées* et le *Code du commerce des bois* de 1876. Ces données étant parfois divergentes, les volumes ont également été recalculés à partir de la superficie des étangs mesurée sur le cadastre napoléonien (première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle) et des profondeurs maximales extraites des données des Ponts et Chaussées. La formule suivante a été employée :

$$V = 1/3 \cdot S \cdot P_{\max} \quad (1)$$

dans laquelle  $V$  = volume (en m<sup>3</sup>),  $S$  = superficie de l'étang (en m<sup>2</sup>) et  $P_{\max}$  = profondeur maximale (en m) ; le rapport 1/3, utilisé par les ingénieurs des Ponts et Chaussées pour leurs propres estimations au XIX<sup>e</sup> siècle, a été conservé.



Fig. 2 – Arrivée du grand flot à Clamecy (cliché P. Bertin, autorisation gracieuse de l'auteur).

Fig. 2 – 'Grand flot' on the Yonne River in Clamecy (P. Bertin, courtesy of the author).

Pour chaque étang, deux données de volume sont donc disponibles, l'une issue des sources et l'autre calculée à partir du cadastre. Par ailleurs, des mesures faites sur le site de trois anciens étangs ont permis de vérifier des sources historiques. Le contour des anciens plans d'eau a été cependant difficile à déterminer en raison de la densité de la végétation actuelle et ces mesures n'apportent pas de gain de précision décisif par rapport aux données extraites des archives. En revanche, il a été possible de vérifier la hauteur des digues sur ces trois sites. Celles-ci correspondent parfaitement aux données fournies par les archives, ce qui autorise à considérer les statistiques anciennes (volumes, profondeurs, etc.) comme fiables.

Enfin, le temps de vidange de l'étang est également fourni par les *Annales des Ponts et Chaussées*. Dans certains cas, plusieurs valeurs sont renseignées, ce qui se conçoit aisément puisque le temps de vidange pouvait varier en fonction du débit de base du cours d'eau qui alimente la retenue. Deux débits, un maximum et un minimum, pouvaient alors être calculés, donnant des valeurs encadrantes haute et basse pour notre reconstitution.

## Le calcul des débits des lâchers et des ondes de crue

Lors d'un lâcher, le débit total ( $Q_t$ ) du cours d'eau en aval du barrage correspond à la somme du débit du lâcher ( $Q_L$ ) et du débit de base du cours d'eau ( $Q_b$ ).  $Q_L$  peut-être facilement calculé à partir du volume de la retenue et du temps de vidange de celle-ci. Lorsque les barrages se situent dans les têtes de bassin et entravent complètement la vallée,  $Q_t = Q_L$  puisque le temps de vidange est fonction de  $Q_b$ . Lorsque la retenue n'entrave pas le cours d'eau principal et reste alimentée par un canal de dérivation,  $Q_b$  doit être considéré. En prenant comme postulat que, pour remplir rapidement la retenue, la quasi-totalité du débit est déviée vers le barrage,  $Q_b$  peut être approché grâce au temps nécessaire au remplissage de la retenue.

Compte tenu des données que nous avons acquises, quatre valeurs de débit sont donc disponibles (issues de deux volumes et deux temps de vidange) pour la plupart des étangs. Étant donné l'incertitude associée aux données historiques de superficie, de hauteur et de temps de vidange ou de remplissage, on ne doit naturellement considérer ces valeurs que comme des estimations du volume d'eau réellement déversé dans les cours d'eau. Actuellement, aucun des ruisseaux de tête de bassin n'est équipé de station de mesure de débit. Les débits caractéristiques de ces petits cours d'eau ont été estimés grâce à la station de Corancy, située sur le cours principal de l'Yonne. Les valeurs ont été calculées à partir du rapport des superficies des bassins versants selon la formule in J.-P. Bravard et F. Petit (2000) proposée par la DIREN Rhône-Alpes pour les bassins versants inférieurs à 2 000 km<sup>2</sup> :

$$q = Q(a/A)^{0,8} \quad (2)$$

où  $q$  = débit recherché (en m<sup>3</sup>/s),  $Q$  = débit à la station (en m<sup>3</sup>/s),  $A$  = superficie du bassin-versant à la station (en km<sup>2</sup>) et  $a$  = superficie du bassin-versant à l'amont du tronçon étu-

dié (en km<sup>2</sup>). Étant donné la distance à la station et la taille des bassins versants, cette méthode ne fournit qu'une estimation grossière de la valeur des débits mais permet toutefois de considérer le débit des lâchers par rapport au régime naturel.

Enfin, nous avons cherché à disposer d'une référence actuelle pour préciser les caractéristiques des écoulements anciens. Depuis plus d'une décennie, des lâchers d'eau sont effectués plusieurs fois par an à partir du lac des Settons pour la pratique de sports d'eau vive sur la Cure. Les hydrogrammes de lâchers actuels ont été examinés afin d'évaluer le transfert de l'onde de crue à l'aval des barrages aménagés pour le flottage. Sur 49 hydrogrammes disponibles, aucune atténuation n'est visible à 32 km en aval du lac, à la station de Marigny-l'Église (Poux, 2009). Le débit des lâchers se propage donc sans affaiblissement et on peut donc admettre que les crues artificielles engendrées pour le flottage avaient un débit constant sur toute la longueur des petits cours d'eau (en l'absence de confluence importante). Par conséquent, on supposera que le débit du lâcher additionné au débit de base correspond en tout point au débit de la crue artificielle.

La méthode suivie a donc permis de déterminer le débit du lâcher de chaque étang, de confronter ces valeurs à la gamme des écoulements des têtes de bassin et, enfin, de reconstituer grossièrement les conditions de propagation des lâchers vers l'aval. Dans ce dernier cas, il a été également possible de comparer les valeurs obtenues à celles de crues naturelles afin de mesurer le degré d'artificialisation des écoulements depuis les têtes de bassin jusqu'à la sortie du massif du Morvan.

## Calcul des puissances spécifiques pour estimer le transport solide

L'estimation de la puissance des flots a été tentée afin d'évaluer les effets des crues artificielles sur le milieu. La puissance spécifique est un bon moyen de quantifier la capacité de travail du cours d'eau. Contrairement à d'autres paramètres comme les forces tractrices, elle ne nécessite pas de connaître la hauteur d'eau. Il était donc possible de l'utiliser dans la mesure où nous avons procédé à l'estimation du débit des courues. L'équation (in Bravard et Petit, 2000) s'écrit de la manière suivante :

$$\omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S / w \quad (3)$$

dans laquelle  $\omega$  = puissance spécifique (en W/m<sup>2</sup>),  $\rho$  = masse volumique de l'eau (1 000 kg/m<sup>3</sup>),  $g$  = accélération de la gravité (9,8 m/s<sup>2</sup>),  $Q$  = débit du lâcher (en m<sup>3</sup>/s),  $S$  = pente moyenne de la ligne d'eau (en m/m) et  $w$  = largeur moyenne du chenal à pleins bords (en m). Depuis quelques années, la puissance spécifique est également utilisée pour déterminer les débits de mise en mouvement de la charge de fond et le transport solide (Petit *et al.*, 2005; Mao *et al.*, 2008). Des relations de ce type ont été proposées :

$$\omega_0 = a \cdot D_1^b \quad (4)$$

où  $\omega_0$  = puissance spécifique critique (en W/m<sup>2</sup>) nécessaire pour mobiliser une particule de diamètre donné ( $D_1$  en mm),  $a$  et  $b$  = coefficients de régression affectés aux différentes rivières. F. Petit *et al.* (2005) ont proposé diverses relations

établies empiriquement dans des cours d'Ardenne belge. Parmi ces rivières, la Hoëgne présente des caractéristiques morphologiques et sédimentologiques comparables avec celles de l'Yonne et de ses affluents (tab. 1). La Hoëgne possède un lit graveleux sur substratum imperméable, une pente marquée (0,02 m/m), un  $D_{50}$  supérieur à 200 mm dans le cours amont et inférieur à 70 mm dans le cours aval. Selon les travaux récents de R.I. Fergusson (2005), de L. Mao *et al.* (2008) et de F. Gob *et al.* (2010), la taille relative des particules qui composent le lit et la pente apparaissent comme les paramètres déterminants dans la connaissance du seuil de mise en mouvement de la charge de fond. C'est donc la relation suivante, mise au point sur la Hoëgne qui a été utilisée pour estimer la capacité de transport des rivières du Morvan :

$$\omega_0 = 0,194.D_1^{1,331} \quad (5)$$

À partir des données de débits reconstitués, il a été possible de calculer l'énergie correspondante ( $\omega$ ) et, grâce à l'équation 5, d'estimer la capacité de transport des crues artificielles.

	Surface du bassin-versant (en km <sup>2</sup> )	Pente (en m/m)	$D_{50}$ (en mm)
Yonne (amont)	<20	0,07	33*
Yonne (Château-Chinon)	106	0,012	68
Hoëgne	219	0,02	70 - 200

\* Granulométrie réalisée sur le Tauron 1 km à l'aval de l'étang des Grenouilles (n°12 in tab. 2).

Tab. 1 – Comparaison des caractéristiques de l'Yonne et de la Hoëgne.

Tab. 1 – Comparison of the characteristics of the rivers Yonne and Hoëgne.

ge 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 XVIII<sup>e</sup> 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 XIX<sup>e</sup> siècle, l'aménagement du haut-bassin de l'Yonne aux fins du flottage du bois était à son apogée. À cette époque, tous les affluents de l'Yonne en amont de Clamecy possèdent au minimum 1 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. Il a été possible de calculer la superficie de 25 étangs. La plupart de ceux-ci ont une 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 a une superficie supérieure à 1 ha (fig. 3B et tab. 2). La hauteur des digues varie entre 2,6 m et 6,5 m.

## Les débits reconstitués de la période du flottage

Le tableau 2 résume les caractéristiques des 25 étangs pour lesquels nous disposons de données de volume et de temps de vidange. A partir de ces données, les débits des lâchers ont pu être calculés (tab. 2). Ils

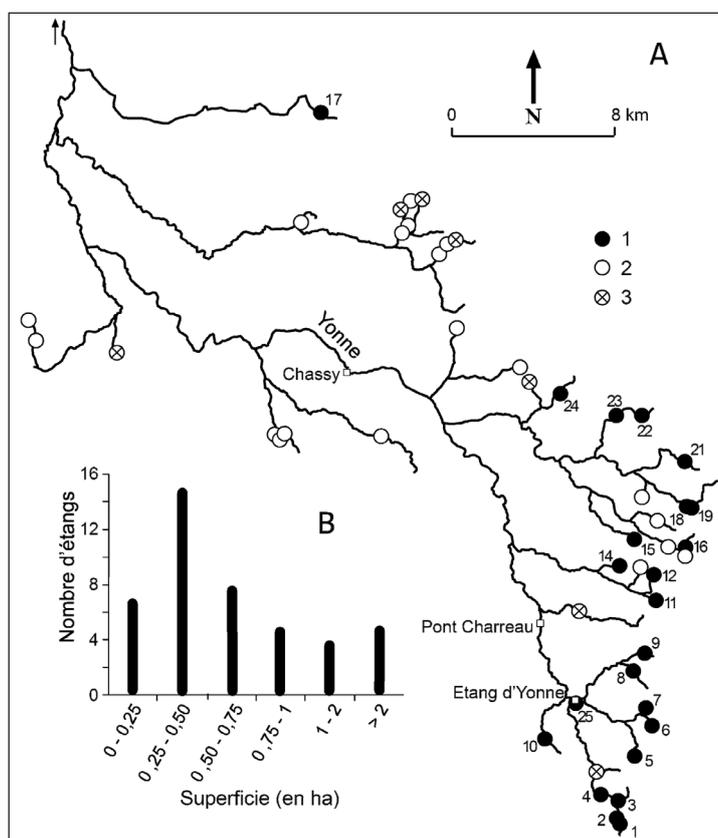
## Résultats

### Les étangs destinés au flottage

Le croisement des sources historiques a permis de dresser une liste de 48 étangs sur le bassin de l'Yonne *stricto sensu* (fig. 3A). Parmi ceux-ci, 26 existent encore aujourd'hui (fig. 4A) et ont pu être localisés grâce à la carte topographique. Quelques autres sont seulement mentionnés sur la carte topographique IGN au 1/25 000 en raison de la présence de l'ancienne digue (fig. 4B). La construction de nombreux étangs remonte au Moyen Âge, bien avant le début du flotta-

Fig. 3 – Localisation des étangs destinés au flottage dans le haut bassin de l'Yonne (A ; les numéros correspondent aux étangs indiqués in tab. 2) ; 1 : données de volume et temps de vidange disponibles ; 2 : données de volume et temps de vidange non disponibles ; 3 : localisation incertaine) ; Distribution statistique de la superficie des étangs étudiés (B).

Fig. 3 – Location of the reservoirs built for timber floating activity in the upper Yonne River (A; see the numbers in the tab. 1); 1: data of volume and emptying time available; 2: data of volume and emptying time not available; 3: uncertain location; Statistic distribution of the area of the reservoirs (B).



	Nom de l'étang	BV (en km <sup>2</sup> )	Superficie (en ha)		Profondeur maximale (en m)	Volume (en m <sup>3</sup> )		Temps de vidange (en h)		Débit de la crue artificielle (en m <sup>3</sup> /s)			
			a	b		a	b	T1	T2	aT1	aT2	bT1	bT2
1	Belleperche (sup.)	1,7	0,23	0,25	4,5	3 419	3 750	2	2	0,49	0,49	0,54	0,54
2	Belleperche (inf.)	1,7	0,69	0,78	4,1	9 452	10 694	1,25	1,25	2,16	2,16	2,44	2,44
3	Roches	3,7	0,27	0,27	4,15	3 717	3 666	0,75	0,75	1,41	1,41	1,39	1,39
4	Moines	7,1	0,52	0,53	5,7	9 908	10 108	1,75	1,75	1,65	1,65	1,68	1,68
5	Proie	1,7	0,73	0,76	4,5	11 025	11 325	1	1,25	3,13	2,51	3,21	2,58
6	Préperny	1,6	1,00	0,99	4,2	14 029	13 916	1,25	1,5	3,18	2,66	3,16	2,64
7	Maubraye	2,2	0,33	0,40	5,4	5 909	7 114	0,5	0,75	3,28	2,19	3,95	2,63
8	Motte	7,5	0,79	0,75	3,6	9 494	9 018	1	1,25	2,75	2,22	2,61	2,11
9	Chauveau	1,6	0,43	0,47	2,6	3 744	4 056	0,5	0,75	2,11	1,42	2,28	1,53
10	Fachin	3,2	0,74	0,75	4,5	11 133	11 303	1	1,25	3,22	2,60	3,27	2,64
11	Touron	1,6	0,77	0,72	5,6	14 356	13 440	1,25	1,75	3,24	2,33	3,03	2,18
12	Grenouilles	1,5	0,29	0,28	5,1	4 860	4 794	0,5	0,75	2,73	1,83	2,69	1,80
13	Brenots	3,9	0,27	0,25	6,55	5 796	5 546	0,75	1	2,18	1,64	2,09	1,57
14	Sanclerge	5,9	0,26	0,20	5,7	4 924	3 838	0,25	0,5	5,53	2,79	4,31	2,18
15	Griveau	6,1	0,53	0,50	5,6	9 896	9 408	1	1,25	2,83	2,28	2,69	2,16
16	Rainache	1,7	0,73	0,84	5,2	12 711	14 491	0,75	1	4,81	3,63	5,48	4,14
17	Gaulots	1,6	0,33	0,36	4,85	5 309	5 869	0,5	0,75	2,98	2,00	3,30	2,21
18	Vernay	2,9	0,39	0,34	3,9	5 095	4 420	0,5	0,75	2,87	1,93	2,49	1,67
19	Vernay	2,9	0,65	0,30	3,45	7 459	3 502	0,75	1	2,82	2,13	1,32	1,00
20	Bouchot	1	0,00	0,26	5,2	-	4 451	0,5	0,75	-	-	2,49	1,67
21	Montagne	2,3	0,93	0,90	3,8	11 743	11 400	1,5	2	2,24	1,70	2,18	1,65
22	Martelet	2,6	0,71	0,76	3,9	9 201	9 880	1,5	1,5	1,76	1,76	1,89	1,89
23	Contentin	4,1	0,52	0,57	4,9	8 489	9 310	1	1,25	2,39	1,92	2,62	2,10
24	Brouelle	1,3	-	0,38	5,1	/	6 433	1	1,25			1,94	1,58
25	Etang d'Yonne	44,3	1,74	2,40	6,1	35 474	48 800	3	6	3,70	2,05	5,08	2,82

Tab. 2 – **Débits des crues artificielles de 25 étangs destinés au flottage dans la haute Yonne** (a : données issues du Cadastre Napoléonien ; b : données issues des Ponts et Chaussées ou du Code du Commerce du Bois).

Tab. 2 – **Discharges of artificial floods of 25 ponds intended for timber floating in the upper Yonne** (a: data from the Napoleon's Cadastre; b: data from the archives of civil engineering or the archives of timber trade).

s'échelonnent entre 0,49 m<sup>3</sup>/s et 5,48 m<sup>3</sup>/s et ont une moyenne proche de 2 m<sup>3</sup>/s pour les minima et de 2,75 m<sup>3</sup>/s pour les maxima. Seul un quart des étangs produit un lâcher d'un débit supérieur à 2,3 m<sup>3</sup>/s pour l'estimation basse et à 3,2 m<sup>3</sup>/s pour l'estimation haute. Les débits se situent donc le plus souvent entre 1 m<sup>3</sup>/s et 3 m<sup>3</sup>/s pour des petits cours d'eau drainant des bassins versants inférieurs à 10 km<sup>2</sup>. Sur le cours principal de l'Yonne, à l'Etang d'Yonne, le débit des lâchers est compris entre 2 m<sup>3</sup>/s et 5 m<sup>3</sup>/s pour un bassin-versant de 44 km<sup>2</sup>. Aujourd'hui, le débit moyen mensuel de l'Yonne enregistré à la station hydrométrique de Corancy est de 3,15 m<sup>3</sup>/s en novembre, de 3,9 m<sup>3</sup>/s en décembre et de 4,77 m<sup>3</sup>/s en janvier, pour un bassin versant de 98 km<sup>2</sup>.

*Les débits des lâchers dans les têtes de bassin.* Le calcul du débit des bassins de 5 km<sup>2</sup> à partir des valeurs de la station de Corancy (équation 2) permet de considérer que le débit naturel de 2,7 m<sup>3</sup>/s correspond à un débit quinquennal ( $Q_5$ ) à la station de référence. Ainsi, avec des débits de 2-3 m<sup>3</sup>/s en moyenne (tab. 2), les lâchers correspondent à des

débits naturellement rares aussi bien par leur fréquence que par leur intensité. Dans le détail et en gardant à l'esprit que la transposition des périodes de retour sur des si petits bassins n'est qu'approximative, les lâchers des étangs de Belleperche, des Roches, des Moines, de la Motte et de Griveau s'approchent de la crue biennale à la station de référence ; le lâcher de l'étang des Brenots est légèrement inférieur à la crue quinquennale et celui de l'étang de Contentin légèrement supérieur à la crue décennale ; les autres étangs (16), drainant tous de petits bassins versants, lâchent des débits supérieurs à la crue vicennale ! Certains lâchers constituent même plus du double de la valeur de la crue vicennale : par exemple, l'étang du Touron produit un lâcher de 2,2 m<sup>3</sup>/s et 3,25 m<sup>3</sup>/s alors que la crue vicennale du ruisseau au niveau de l'étang serait, selon la superficie de son bassin-versant, de l'ordre de 1,3 m<sup>3</sup>/s. Les débits des lâchers en tête de bassin correspondent donc à des débits rares, voire exceptionnels et l'on conçoit ainsi les conséquences de telles courues sur le milieu. L'équivalent de crues biennales, décennales,

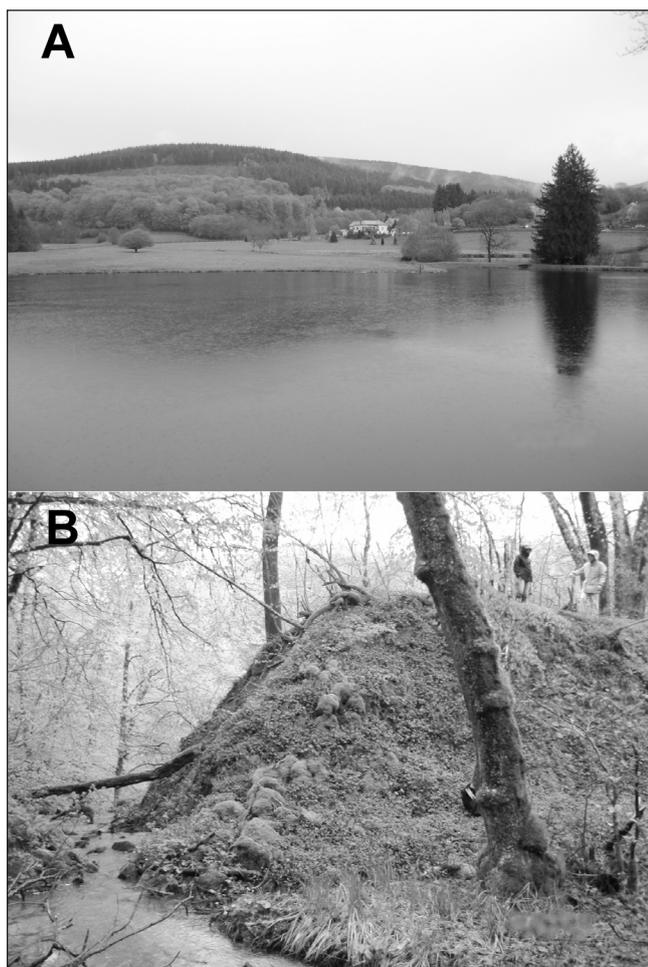


Fig. 4 – Vue de l'Etang d'Yonne (A) ; Digue de l'ancien étang des Grenouilles (B).

Fig. 4 – View of the Etang d'Yonne (A); Dike of the pond 'des Grenouilles' (destroyed; B).

voire vicennales était lâché plusieurs fois par semaine sur l'ensemble des cours d'eau morvandiaux pendant plusieurs mois par an. La pratique du flottage du bois s'est donc traduite par une modification de la magnitude et de la fréquence des écoulements. Le renforcement artificiel du débit des petits cours d'eau se traduit également par les puissances spécifiques qui s'échelonnent entre  $250 \text{ W/m}^2$  et  $400 \text{ W/m}^2$  pour des cours d'eau larges d'à peine 4 à 5 m. Ces valeurs sont exceptionnelles pour ces cours d'eau. Dans les têtes de bassin, les lâchers correspondaient donc à des crues de très forte énergie qui devaient engendrer un transport solide important. En effet, selon l'équation 5, le transport de sédiments dont la taille est comprise entre 150 mm et 350 mm était possible. De gros éléments pouvaient donc être facilement mobilisés durant les courues.

*Les écoulements à l'aval de l'étang d'Yonne.* Plus à l'aval, la question des écoulements anthropisés se pose différemment puisque lorsqu'on se trouve sur le cours principal de l'Yonne : la rivière est plus large et les pentes moins prononcées ( $0,007 \text{ m/m}$ ). Sur ce tronçon, les lâchers d'eau ne devaient jamais dépasser le débit de pleins bords afin de ne pas inonder les berges et maintenir les bûches dans le che-

nal. Aucun document d'archive n'indique quelles hauteurs d'eau étaient atteintes lors des courues. Nous avons cherché à les estimer au moyen d'une comparaison de cartes postales anciennes prises au moment du flot et d'observations faites sur de petits épisodes de crues récentes. Le 29 avril 2009, une crue jaugée à  $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station de Corancy a donné par extrapolation (équation 2) un débit proche de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  à l'aval de l'Etang d'Yonne. Cette valeur est très proche de celle que donne notre reconstitution des lâchers à partir de l'étang et qui est comprise entre  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Selon la courbe des débits classés de la station de Corancy, ce débit est très légèrement inférieur à la valeur du débit atteint ou dépassé 10 % du temps, soit une trentaine de jours dans l'année. Sur le cours principal de l'Yonne, le débit des lâchers n'est donc pas exceptionnel. Les crues artificielles pour le flottage peuvent, sur ce tronçon, être qualifiées d'ordinaires alors qu'elles ont un caractère exceptionnel dans les têtes de bassin. Des valeurs de puissance spécifique ont pu être calculées au pont Charreau, légèrement en amont de Château-Chinon, et à Chassy, en aval du lac de Pannecière. Au pont Charreau, les valeurs de puissance spécifique sont comprises entre  $37 \text{ W/m}^2$  et  $77 \text{ W/m}^2$  ; à Chassy, entre  $30 \text{ W/m}^2$  et  $70 \text{ W/m}^2$ . Déduites de l'équation 5, de telles puissances spécifiques permettent le transport de particules de 40 à 80 mm de diamètre. Or, le fond du lit en aval de l'étang d'Yonne est composé d'éléments grossiers dont le  $D_{50}$  est proche de 8 cm et le  $D_{90}$  supérieur à 10 cm. Dans cette partie du bassin, les courues ne mobilisaient dès lors que partiellement le matériel composant le lit de l'Yonne. L'équation 5 montre qu'une puissance supérieure à  $90 \text{ W/m}^2$  est nécessaire pour mobiliser un  $D_{50}$  de 10 cm ce qui correspond à un débit de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  au pont Charreau et  $32 \text{ m}^3/\text{s}$  à Chassy. Il faut donc des crues beaucoup plus importantes, proches de la crue annuelle, pour mobiliser l'ensemble de la charge de fond de l'Yonne.

## Observations géomorphologiques

Les premières observations géomorphologiques ont permis de mettre en évidence quelques caractéristiques des chenaux de l'Yonne amont et de ses affluents :

- Dans les têtes de bassin, à l'aval de trois étangs ayant fait l'objet de prospections détaillées, l'étang des Grenouilles, l'étang neuf et l'étang de la Motte, nous avons pu observer une incision importante des lits. Comme tous les autres étangs, ceux-ci étaient jadis retenus par une digue de plusieurs mètres de haut qui obstruait entièrement la vallée (fig. 4B et fig. 5), bloquant ainsi le transit sédimentaire (un remblaiement partiel de l'amont de l'ancien plan d'eau est aujourd'hui visible). A l'aval de ces ouvrages, les affluents coulent plusieurs mètres en contrebas de ce qui semble être le niveau de l'ancienne plaine alluviale ou le fond d'un valon en berceau (fig. 5). De nombreux affleurements rocheux et des bocs résiduels très grossiers (axe b : 30-60 cm), parfois anguleux, sont également visibles dans le lit des ruisseaux à l'aval des étangs destinés au flottage. Les affleurements rocheux et les formes d'incision sont absents des têtes de bassin qui sont des alvéoles granitiques encore colmatés par les colluvions et des accumulations tourbeuses.

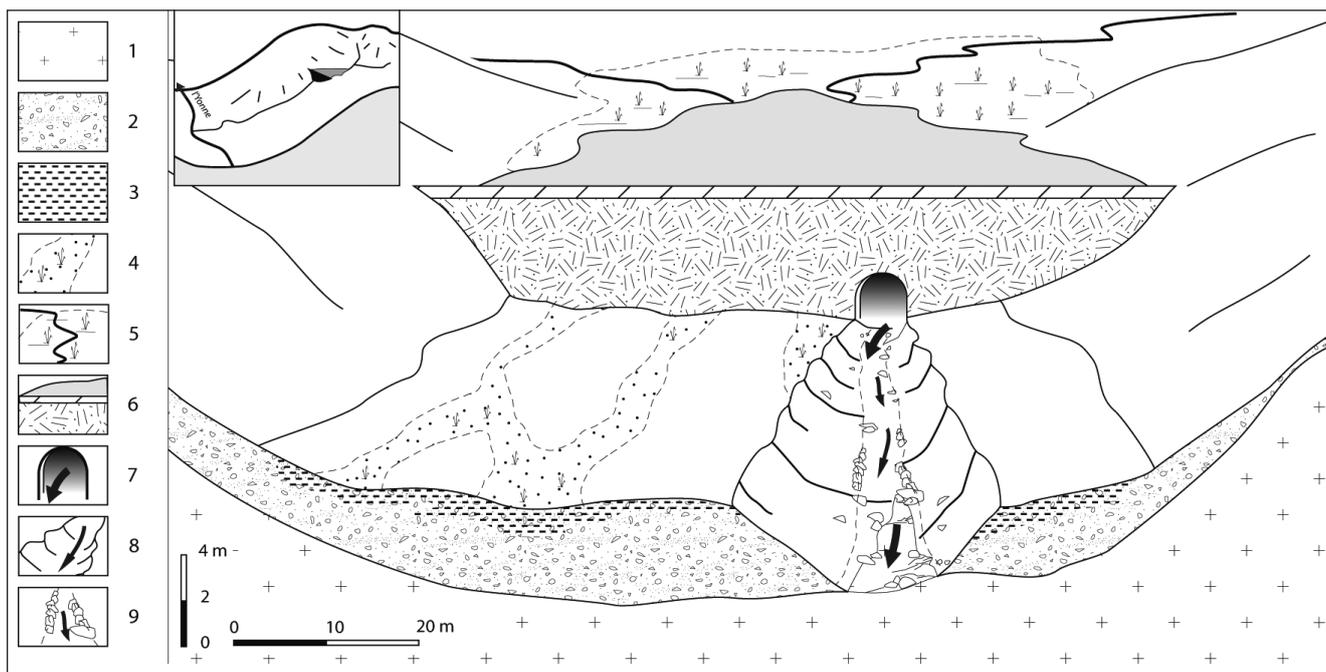


Fig. 5 – Effets géomorphologiques des lâchers d'eau dans les têtes de bassin. 1 : substratum cristallin ; 2 : colluvions et alluvions périglaciaires et holocènes ; 3 : horizons hydromorphes et tourbeux des alvéoles et vallons ; 4 : paléochenaux de l'ancien fond de vallon ; 5 : tourbière ou marécage de fond d'alvéole ; 6 : digue et étang destiné au flottage ; 7 : pertuis d'évacuation ; 8 : incision partiellement consécutive aux lâchers d'eau ; 9 : alignement de blocs destinés à canaliser l'écoulement et les bûches flottées.

Fig. 5 – **Geomorphological effects of artificial floods in the upper catchments.** 1: crystalline substratum; 2: periglacial and Holocene colluvium and alluvium; 3: damp and peaty soil of the small valleys; 4: palaeochannel on the former valley bottom; 5: peat bog or swamp in the bottom of upper catchment; 6: dyke and pond intended for timber floating; 7: floodgate of the pond; 8: incision partially due to the artificial floods; 9: line of boulders intended to facilitate the transfer of flows and logs.

- A l'aval, dans les secteurs où la vallée de l'Yonne s'élargit, aucune trace d'incision n'a pu être observée. Les lits présentent au contraire des formes caractéristiques d'un stock sédimentaire abondant : absence d'affleurement rocheux, rapport largeur/profondeur élevé, alternance seul/mouille très peu marquée. Certains tronçons présentent même une amorce de lit en toit aux marges déprimées et hydromorphes.

- A la charnière de ces deux secteurs, lorsque la vallée quitte la partie la plus encaissée de son bassin et que se développe une plaine alluviale de 50 à 75 m de large, une autre configuration peut être observée (fig. 6). L'Yonne a été plaquée au pied du versant de rive gauche sur une distance de 1,5 km et a été stabilisée par un alignement de blocs grossiers disposés en rive droite. Ce changement de cours a très vraisemblablement été réalisé pour limiter l'érosion latérale (grâce à la présence d'un versant rocheux en rive gauche et de l'endiguement en rive droite) mais également afin de corriger la sinuosité naturelle de la rivière et ainsi faciliter la descente des bûches flottées. Ce nouveau lit est composé d'une nappe caillouteuse très grossière ( $D_{50}$  : 64 mm ;  $D_{95}$  : 129 mm) et il domine actuellement de 1,5 à 2 m le talweg présent dans la plaine alluviale et que l'on peut supposer être l'ancien cours de l'Yonne. L'épaisseur de cette nappe n'est pour l'instant pas connue précisément. Cependant, à la faveur d'une brèche dans la berge, une partie de l'écoulement rejoint le talweg de la plaine alluviale. Au niveau de la brèche, la berge du chenal artificiel est composée de blocs

grossiers surmontés par une accumulation de blocs plus petits. La hauteur totale dépasse largement 1 m, ce qui donne une première estimation de l'épaisseur de la nappe. En rejoignant le centre de la plaine alluviale, la rivière incise les dépôts limoneux ou sablo-limoneux qui descendent en pente douce du chenal perché vers l'ancien tracé de l'Yonne (fig. 6).

## Synthèse et discussion

Il est à présent possible de présenter une synthèse des résultats acquis et de discuter les relations entre les estimations hydrauliques et les formes observées. À plusieurs égards, les résultats peuvent être sectorisés, notamment parce que la reconstitution des écoulements met en évidence une disparité entre les têtes de bassin et le cours aval de l'Yonne.

### Les têtes de bassin

Pendant plusieurs décennies, voire plus d'un siècle et demi, les petits bassins inférieurs à 10 km<sup>2</sup> ont connu chaque hiver le passage répété d'ondes de crues artificielles d'une intensité tout à fait inhabituelle. Au plus fort du flottage, des crues équivalentes aux crues quinquennales, décennales voire vicennales étaient lâchées plusieurs fois par semaine dans de très petits cours d'eau. Bien que ces crues fussent de courte durée car elles correspondaient au temps de vidange

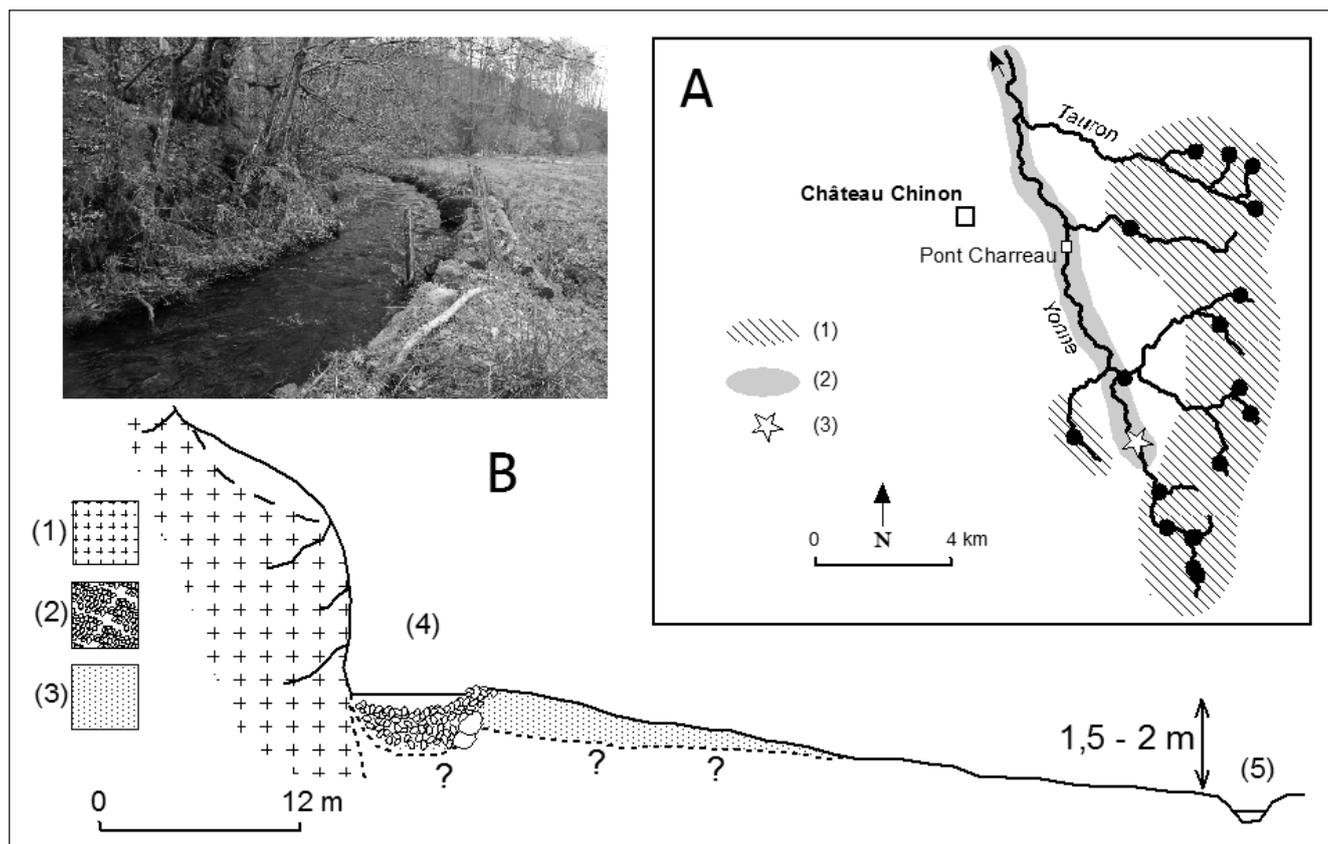


Fig. 6 – Conséquences géomorphologiques du dérèglement du régime hydrologique (A). 1 : zone d'incision repérée ou potentielle ; 2 : vague sédimentaire ; 3 : localisation de la fig. 6B. Photo et représentation schématique du lit perché de l'Yonne (B). 1 : substratum cristallin ; 2 : nappe caillouteuse du chenal ; 3 : plaine alluviale sablo-limoneuse ; 4 : chenal principal perché 1,5 à 2 m plus haut que le niveau de la plaine alluviale et plaqué contre le versant ; 5 : talweg occupé par un petit chenal sous calibré, actif lors du débordement du chenal perché.

Fig. 6 – Geomorphological consequences of the hydrological regime disturbances (A). 1: area of identified or potential incision; 2: sediment wave; 3: location of fig. 6B. Photo and schematic representation of the perched bed of the Yonne (B). 1: crystalline substratum; 2: channel gravel sheet; 3: sandy-silty alluvial flood plain; 4: main channel perched 1.5 to 2 m higher than the floodplain and moved against the foothill; 5: small channel draining the lower section of the flood plain, only active when the Yonne overflows.

de l'étang, soit 2 h en moyenne, elles ont dû avoir des conséquences morphogéniques considérables étant donné leur intensité et leur fréquence. L'estimation des puissances spécifiques, comprises entre 250 W/m<sup>2</sup> et 400 W/m<sup>2</sup>, montre en effet que ces lâchers d'eau pouvaient avoir une grande capacité de cisaillement et de transport. Les calculs que nous proposons prolongeraient donc l'hypothèse émise par J.-P. Bravard (1999) sur l'efficacité du transport en suspension dans ces bassins. Nous pouvons ajouter à présent que le transport par charriage a certainement été favorisé par ces déversements à l'aval des barrages dans la mesure où ces puissances spécifiques étaient capables de mettre en mouvement une partie du matériau grossier composant le fond du lit.

La validité de ces résultats est logiquement soumise à la fiabilité de la reconstitution des débits. Les valeurs que nous proposons peuvent paraître très élevées, puisque des débits de 1 à 3 m<sup>3</sup>/s pour des bassins versants de 1 à 7,5 km<sup>2</sup> correspondent à des débits spécifiques de 400 à 1 000 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>. Elles ne paraissent toutefois pas démesurées si nous les comparons aux écoulements que produisent des événements pluvieux intenses dans de petits bassins versants de taille

comparable (1,5 à 44 km<sup>2</sup>) de la moitié nord de la France : J. Douvinet (2008) mentionne en effet à plusieurs reprises des valeurs de débit spécifique comprises entre 630 et 1 790 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>. En outre, il faut garder présent à l'esprit que, dans notre cas, les volumes d'eau écoulés provenaient d'un stockage ayant duré pendant plusieurs jours et qu'ils représentent en réalité la lame d'eau écoulée par le bassin dans ce laps de temps, ce qui fait alors considérablement chuter les valeurs du débit spécifique.

Les formes d'incision développées dans les chenaux à l'aval des étangs doivent être considérées avec prudence, dans l'état actuel de nos connaissances. L'absence de toute datation et d'observations de terrain plus approfondies ne nous permet pas d'affirmer avec certitude que ces lits incisés sont entièrement postérieurs à l'édification des digues, donc consécutifs aux lâchers. Toutefois, la configuration des sites ainsi que les débits et les puissances spécifiques présentées plus haut permettent de conserver l'hypothèse d'une forte incision historique à l'aval des étangs. Si ces observations se confirmaient à l'avenir et pouvaient être généralisées à l'ensemble des affluents de l'Yonne, elles indique-

raient que l'industrie du flottage du bois a entraîné un volumineux déstockage sédimentaire dans cette partie du bassin en l'espace d'à peine un siècle et demi.

## Les secteurs médians et aval

Sur le cours principal de l'Yonne, la fréquence des crues consécutives aux lâchers était aussi importante mais leur intensité était moins exceptionnelle en regard des écoulements naturels. En effet, la rivière étant plus large, moins pentue et moins encaissée, les volumes d'eau injectés depuis les têtes de bassin ou les étangs situés en bordure de l'Yonne étaient proportionnellement moins élevés. Ces lâchers maintenaient un débit fort dans le cours d'eau sans engendrer une véritable crue ; la compétence des écoulements est restée dans la gamme des événements ordinaires et fréquents, ce qui n'était pas de nature à instaurer de nouvelles conditions de transport.

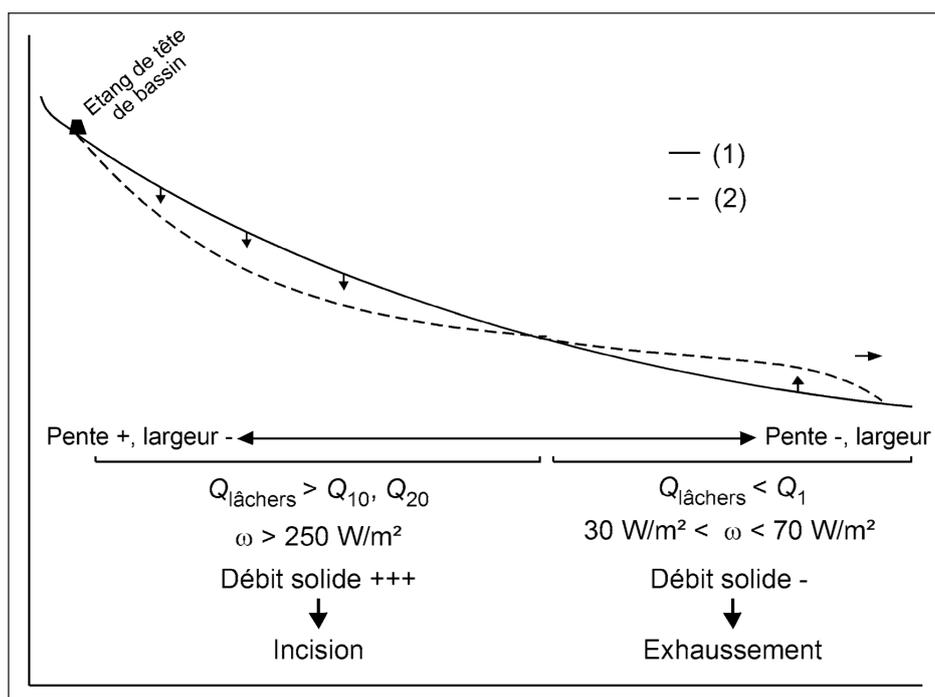
D'un point de vue morphologique, les lits perchés que nous avons décrits peuvent être considérés comme le corollaire d'une augmentation du transport solide dans les hauts bassins et d'une évacuation difficile, entraînant donc un stockage, dans les secteurs médians et inférieurs. Le fait que ces chenaux comportent une charge grossière abondante alors que leurs marges sont constituées de limons laisse penser que l'exhaussement est en grande partie constitué par la charge de fond arrachée dans les têtes de bassin. Dans le cas du secteur médian décrit plus haut, deux hypothèses pourraient expliquer la configuration actuelle du profil en travers (fig. 7) : soit la plaine alluviale antérieure au flottage était subhorizontale et la position actuelle du chenal est le fruit d'une aggradation produite par un apport sédimentaire venu de l'amont (charge grossière dans le lit et limons de débordement en bordure), soit la plaine alluviale présentait déjà une pente douce d'origine colluviale sur l'une de ses marges et le lit a simplement été déplacé vers le versant grâce à une digue (toujours visible à l'amont du site). Seules des observations complémentaires comme des sondages permettront de trancher entre ces deux hypothèses et d'évaluer vraiment l'aggradation. Quoiqu'il en soit, il paraît certain que la nappe caillouteuse présente dans le lit perché s'est mise en place après le détournement du cours d'eau de

son tracé primitif (*cf. supra*) ; elle témoigne donc d'un important transit sédimentaire contemporain du flottage. La taille et le volume des sédiments transportés correspondent par ailleurs aux estimations de puissances spécifiques critiques proposées plus haut. Ce tronçon perché, situé à la charnière entre les têtes de bassin et le cours moyen de l'Yonne supérieure conforterait ainsi l'hypothèse d'un important déstockage à l'aval immédiat des étangs et d'une vague sédimentaire en transit sur le cours principal de l'Yonne.

Le calcul des débits et des puissances spécifiques rend compte de décalages fonctionnels entre les têtes de bassin et le cours principal. Cette dichotomie et les observations géomorphologiques invitent à émettre l'hypothèse que les cours d'eau ont pu connaître une forte érosion dans les têtes de bassin et, sur le cours principal de l'Yonne, la propagation d'une vague sédimentaire. La figure 7 est une proposition schématique de l'évolution du système et n'est actuellement supportée que par un nombre restreint d'observations de terrain qui demandent à être validées. On peut considérer en première analyse que, à l'aval immédiat des étangs, les crues artificielles survenues dans des lits fluviaux étroits et très pentus étaient extrêmement puissantes et ont donc probablement entraîné un débit solide important. A l'inverse, lorsque la pente de l'Yonne s'adoucit vers l'aval et que le chenal s'élargit, les puissances spécifiques diminuent et le transport solide était donc plus limité. Dans les conditions actuelles, cette charge de fond peut être stable à long terme puisque les conditions hydrauliques qui permettaient sa mise en mouvement ont disparu. En un certain sens, cette situation présente quelques analogies avec celle que L.A. James (1989, 1994) décrit dans des bassins livrés à l'extraction minière, où le dépilage hydraulique des filons a abondamment alimenté les chenaux en sédiments. Leur stockage dans le système perdure ensuite, dans la mesure où les volumes excèdent la capacité de ce dernier à les évacuer.

Fig. 7 – Différenciation longitudinale des impacts géomorphologiques des débits artificiels destinés au flottage dans l'Yonne. 1 : lit théorique pré-flottage ; 2 : lit théorique post-flottage.

Fig. 7 – *Downstream differentiation of the impacts of artificial floods in the Yonne basin.* 1: theoretical bed before timber floating; 2: theoretical bed after timber floating.



## Conclusions

L'étude des documents conservés aux archives a délivré des informations permettant de reconstituer des conditions d'écoulement qui n'ont plus cours aujourd'hui. Il a été ainsi possible de mieux mesurer certains effets de l'industrie du flottage du bois dans le massif du Morvan. Cette entreprise d'une ampleur sans équivalent sur le territoire français a été à l'origine de nouvelles conditions d'écoulement, notamment dans les têtes de bassin où elles ont eu des conséquences morphogéniques considérables et sans doute accompagnées d'importants changements écologiques. La reconstitution du régime hydrologique de l'époque était donc un préalable incontournable pour évaluer ces impacts et connaître l'origine des états actuels du milieu fluvial de l'Yonne. Cette étude n'est qu'une première étape d'un projet plus ample qui a pour objectif de mieux comprendre quels ont été les impacts du flottage sur les cours d'eau du Morvan. Le propos de cet article s'est ainsi focalisé sur l'aspect hydrologique. Les hypothèses émises sur l'évolution morphosédimentaire décrite plus haut ne se vérifient, pour l'instant, que grâce à un nombre restreint d'observations qui demandent à être complétées. Une campagne de sondages dans la plaine alluviale permettrait notamment de reconstituer la configuration antérieure au flottage et d'estimer les volumes érodés puis transportés.

## Remerciements

Les auteurs remercient Paul Benoit, Marie-Bernadette Albert, Jean-Paul Bravard et Jérôme Belliard pour leurs précieux conseils, ainsi que les relecteurs qui ont permis de préciser les démarches et la présentation des résultats. Merci également à Natasha Shields pour sa relecture des résumés en anglais.

## Références

- Beaujeu-Garnier J. (1951)** – *Le Morvan et sa bordure : étude géomorphologique*. Presses Universitaires de France, Paris, 288 p.
- Benoit P., Berthier K. (2005)** – Les aménagements hydrauliques liés au flottage du bois : leur impact sur le milieu fluvial XVI<sup>e</sup>-XVII<sup>e</sup> siècles. *Forêt et transports modernes*, IHMC-CNRS, Cahier d'études, 15, 41-55.
- Benoit P., Berthier K., Boët P., Reze C. (2002)** – Les aménagements hydrauliques liés au flottage du bois, leur impact sur le milieu fluvial XVI<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècles. *Rapport PIREN Seine*, 1-11.
- Berger L. (1998)** – *Développement et ressources en eau dans trois vallées de la bordure orientale du Massif central (XIX<sup>e</sup>-XX siècles), la Turdine, le Gier et la Cance*. Thèse de géographie, université Paris-Sorbonne (Paris 4), 583 p.
- Berthier K. (2007)** – Les aménagements fluviaux pour le transport du bois : l'exemple du bassin parisien aux XVII<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècles. In Corvol A. (Ed.) : *Forêt et eau – XIII<sup>e</sup>-XXI<sup>e</sup> siècles*. L'Harmattan, Paris, 231-248.
- Boissière J. (1993)** – *Populations et économies du bois dans la France moderne : contribution à l'étude des milieux forestiers entre Paris et le Morvan au dernier siècle de l'Ancien Régime (vers 1685-1790)*. Thèse d'histoire, université Paris-Sorbonne (Paris 4), 1600 p.
- Bourquin M.-H. (2006)** – *L'approvisionnement de Paris en bois de la Régence à la Révolution (1175-1789)*. Confrérie Saint-Nicolas, Clamecy, 369 p.
- Bravard J.-P. (1999)** – Le flottage du bois et le changement du paysage fluvial des montagnes françaises. *Médiévales*, 36, 53-61.
- Bravard J.-P., Petit F., (2000)** – *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Armand Colin, Paris, 221 p.
- Bruley J. (1995)** – *Les gondoliers du Morvan : quatre siècles durant, Paris fut chauffé par le bois du Morvan*. Editions de l'Armançon, Précy-sous-Thil, 334 p.
- Chevrier H. (2007)** – *Histoire du flottage du bois sur la Cure : des forêts du Morvan à la ville de Paris : l'approvisionnement en bois de chauffage*. Société des Sciences historiques et naturelles de l'Yonne, Auxerre, 218 p.
- Delagrive J. (1738)** – *Cours de la Seine et des rivières et ruisseaux commerçans qui y affluent*. BNF, Cartes et plans, GE CC – 1389 (RES).
- Douvinet J. (2008)** – *Les bassins versants sensibles aux « crues rapides » dans le Bassin Parisien – Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes*. Thèse de géographie, université de Caen-Basse-Normandie, 338 p.
- Dupin A. (1817)** – *Code du commerce de bois et de charbons pour l'approvisionnement de Paris, ou Recueil général de tous les arrêts du Conseil*. Guillaume et Cie, Paris, 2 vol., 900 p.
- Dupin A., Guillaume L.-M. (1817)** – *Carte des Rivières et Ruisseaux du Bassin de la Seine servant à l'Approvisionnement de Paris divisée en Départements avec l'Indication des Flottages en Train et à Bois perdu, des Pertuis, Ecluses, Vannes, Portes Marinières, etc. Pour l'ouvrage intitulé Code du Commerce des Bois et Charbons de Bois, Dupin, 1817, Paris, Guillaume, 1 feuille, BNF, cartes et plans, GE D – 5547.*
- Ferguson R.I. (2005)** – Estimating critical stream power for bedload transport calculations in gravel-bed rivers. *Geomorphology* 70-1, 33-41.
- Gourdain (1732)** – *Carte de partie de Bourgogne, Nivernais et Morvan contenant les rivières et ruisseaux flottables pour la provision de Paris*. Archives Nationales, site de Paris, cartes et plans, NIII, 1 feuille.
- Graf W.L. (1980)** – The effect of dam closure on downstream rapids. *Water Resources Research* 16-1, 129-136.
- Gob F. (2010)** – The influence of sediment size, relative grain size and channel slope on initiation of sediment motion in boulder bed rivers. A lichenometric study. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 1535-1547.
- Grosbon C. (1994)** – *Le flottage à travers les familles clamecycoises*. Société scientifique et artistique de Clamecy, Clamecy, tome 1, 127 p.
- Guillien E. (2001)** – *Les propriétaires forestiers morvandiaux ont assuré une partie de l'approvisionnement de Paris en bois de chauffage de 1549 à 1939*. Les Traînes-bûches du Morvan, Clamecy, 85 p.
- Guillien E. (2007)** – *Quand la moulée du Morvan descendait à Paris. Tome 1 : Les courues du Morvan aux vaux d'Yonne*. Les Traînes-bûches du Morvan, Clamecy, 319 p.
- Guillot-Chene G. (1979)** – *Le flottage en Morvan : du bois pour Paris*. Garnier, Paris, 95 p.

- Jacob N. (2005)** – Prélèvements hydriques de l'agriculture et de l'industrie en Cévenne vivaraise depuis le XIX<sup>e</sup> siècle : l'apport des archives à la gestion contemporaine. *La Houille Blanche*, 3, 97-102.
- James L.A. (1989)** – Sustained storage and transport of hydraulic gold mining sediment in the Bear River, California. *Annals of the Association of American Geographers* 79-4, 570-592.
- James L.A. (1994)** – Channel changes wrought by gold mining: northern Sierra Nevada, California, In Marston R., Hasfurth V. (Eds.): *Effects of Human-induced Changes on Hydrologic Systems*. Annual Summer Symposium of the American Water Resources Association, American Water Resources Association, Jackson Hole, Wyoming, 629-638.
- Mao L., Uyttendaele G.P., Iroumé A., Lenzi M.A. (2008)** – Field based analysis of sediment entrainment in two high gradient streams located in Alpine and Andine environments. *Geomorphology* 93, 3-4, 368-383.
- Marnezy A. (1999)** – *L'Arc et sa vallée, Anthropisation et géodynamique d'une rivière alpine dans son bassin versant*. Thèse d'Etat en géographie, université Joseph-Fourier (Grenoble 1), 682 p.
- Météry F. (2009)** – *L'industrie hydraulique en milieu rural: l'exemple de la vallée de la haute Arroux (Morvan), aux XIX<sup>e</sup> – XX<sup>e</sup> siècles*. Mémoire de maîtrise de géographie, université Lumière (Lyon 2), 101 p.
- Moreau J.-P. (1953)** – *L'Yonne et ses affluents : étude du régime et de l'aménagement du fleuve*. Thèse, université de Paris, 2 vol., s.n.
- Nicolas-Delabarre C. (1996)** – Flottage du bois à Clamecy et en haute Yonne. *L'écho de Joigny*, 53, 61-75.
- Nilsson C., Lepori F., Malmqvist B., Törnlund E., Hjerdt N., Helfield J., Palm D., Östergren J., Jansson R., Brännäs E., Lundqvist H. (2005)** – Forecasting environmental responses to restoration of rivers used as log floatways: An interdisciplinary challenge. *Ecosystems* 8, 779-800.
- Palm D. (2007)** – *Restoration of streams used for timber floating: Egg to fry survival, fry displacement, over-wintering and population density of juvenile brown trout (Salmo trutta L.)*. Thèse en sciences de la forêt, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, 33.
- Petit F., Gob F., Houbrechts G., Assani A.A. (2005)** – Critical specific stream power in gravel-bed rivers. *Geomorphology* 69, 92-101.
- Poux A.-S. (2009)** – *Etude du dispositif hydrologique pour le flottage du bois en Morvan (XVI<sup>e</sup>-XX<sup>e</sup> s.) : statistique des étangs, reconstitution des débits des lâchers et évaluation des impacts géomorphologiques*. Mémoire de géographie, université Lumière (Lyon 2), 96 p.
- Rezé C.-H. (2002)** – *Les aménagements du réseau hydrographique du Morvan pour le flottage du bois, du XVI<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> siècle*. Mémoire de maîtrise d'archéologie, université Panthéon-Sorbonne (Paris 1), 61 p.
- Tremblay S. (1991)** – *La récupération du bois submergé en Sagamie : potentiels, faisabilité et perspectives d'écodéveloppement à l'échelle locale*. Mémoire en étude régionale, université du Québec, Chicoutimi, 300 p.

Article soumis le 14 septembre 2010, accepté le 26 avril 2011.