



Dossier. L'hydromorphologie

Gabriel Melun, F. Arnaud, G. Arnaud-Fassetta, Mélanie Bertrand, Clélia Bilodeau, L. Borgniet, F. Boutault, G. Brousse, M. Cassel, T. Depret, et al.

► To cite this version:

Gabriel Melun, F. Arnaud, G. Arnaud-Fassetta, Mélanie Bertrand, Clélia Bilodeau, et al.. Dossier. L'hydromorphologie. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2, pp.5-25, 2019, 10.1051/lhb/2019037 . hal-02399198

HAL Id: hal-02399198

<https://hal.science/hal-02399198>

Submitted on 23 Apr 2021

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.



L'hydromorphologie

**coordonné
par Gabriel Melun**

Elaboré en étroite collaboration avec le Bureau du Comité Scientifique et Technique de la SHF qui propose les sujets, chaque dossier thématique est l'occasion de replacer un sujet dans son actualité. Une praticien.ne, endossant le rôle de rédacteur en chef, propose des contributions complémentaires issues de la communauté scientifique, technique, de celle des gestionnaires et des collectivités locales. Ces dossiers témoignent d'expérimentations, d'actions mises en œuvre et de retours d'expérience concrets, que le rédacteur en chef invité a pris soin de choisir.

Pour ce numéro, LHB a confié la coordination du Dossier à **Gabriel MELUN**.

Auteurs :

- ARNAUD F.** - Université de Lyon, UMR 5600 Environnement Ville Société, CNRS, Site ENS Lyon, Lyon, France
ARNAUD-FASSETTA G. - Université Paris-Diderot (Paris 7), UMR 8586 PRODIG
BERTRAND M. - Université de Grenoble Alpes, Irstea, ETNA, 38 000 Grenoble
BILODEAU C. - Université Paris-Diderot, Laboratoire LADYSS, UMR CNRS 7533
BORNIET L. - Université de Grenoble Alpes, Irstea, LESSEM, 38 000 Grenoble
BOULTAULT F. - Université de Lyon, UMR 5600 Environnement Ville Société, CNRS, Site ENS Lyon, Lyon, France ; ECOGEA, 352 avenue Roger Tissandier, 31600 Muret, France
BROUSSE G. - Université Paris-Diderot (Paris 7), UMR 8586 PRODIG
CASSEL M. - Université de Lyon, UMR 5600 Environnement Ville Société, CNRS, Site ENS Lyon, Lyon, France
DEPRET T. - Laboratoire de Géographie Physique, CNRS UMR 8591, Meudon Cedex, France
DUFOUR S. - Université de Rennes, Université Rennes 2-CNRS, UMR LETG
GOB F. - Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Laboratoire de géographie physique, UMR CNRS 8591
GRIVEL S. - Ministère de la Transition écologique et solidaire, Service de la recherche, Commissariat général au développement durable
KREUTZENBERGER K. - Agence française pour la biodiversité, Direction de la recherche, de l'expertise et des données
LE BIHAN M. - Agence française pour la biodiversité (AFB), Délégation Interrégionale Bretagne, Pays de la Loire
LE BISSONNAIS Y. - Laboratoire d'Étude des Interactions Sol-Agrosystème-Hydrosystème, INRA, UMR LISAH INRA-IRD-SupAgro-Univ. Montpellier
LIEBAULT F. - Université de Grenoble Alpes, Irstea, ETNA, 38 000 Grenoble
LOIRE R. - EDF HYDRO, Centre d'Ingénierie Hydraulique
MAGAND C. - Agence française pour la biodiversité, Direction de la recherche, de l'expertise et des données
MALAVOI J. R. - EDF HYDRO, Centre d'Ingénierie Hydraulique
MELUN G. - Agence française pour la biodiversité (AFB), Direction de la recherche, de l'expertise et des données
PIEGAY H. - Université de Lyon, UMR 5600 Environnement Ville Société, CNRS, Site ENS Lyon, Lyon, France
ROLAN-MEYNARD M. - Irstea, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau »
ROLLET A.J. - Université de Rennes, Université Rennes 2-CNRS, UMR LETG
TAMISIER V. - Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Laboratoire de géographie physique, UMR CNRS 8591
THOMMERET N. - ESGT-CNAM, Laboratoire GeF
VIVIER A. - Agence française pour la biodiversité (AFB), Direction de la recherche, de l'expertise et des données

Les outils de l'hydromorphologie fluviale développés en France en application de la Directive cadre sur l'eau

GRIVEL S., KREUTZENBERGER K., MELUN G.

Contexte

L'altération de l'hydromorphologie des cours d'eau est l'un des facteurs explicatifs de la dégradation de leur bon fonctionnement, des habitats qui les constituent et des espèces qui y vivent. Le suivi de l'hydromorphologie est inscrit dans la Directive cadre sur l'eau (DCE), d'autant plus que plus de 40 % des masses d'eau françaises sont en risque de non atteinte du bon état écologique pour un problème lié à la qualité physique (rapportage européen 2016). Outre la définition du très bon état, l'analyse des conditions hydromorphologiques est rendue nécessaire en particulier pour justifier de la non-dégradation de l'état existant ou encore en tant qu'exigence dans les programmes de mesures ; ceci dans une double logique de *préservation* lorsque l'état écologique est d'ores et déjà bon ou très bon, et de *restauration* lorsque celui-ci est dégradé.

Quels outils de connaissance disponibles face aux enjeux ?

Pour répondre aux obligations d'évaluation et de surveillance de l'hydromorphologie, l'État français a mis en place, sur la dernière décennie, plusieurs méthodes complémentaires et innovantes de suivi et d'analyse de l'hydromorphologie des cours d'eau. Ces méthodes ont été élaborées et alimentées grâce aux soutiens financiers et techniques de l'État (Ministère de l'écologie, Agence française pour la biodiversité et agences de l'eau, directions - régionales - de l'environnement, de l'aménagement et du logement et offices de l'eau pour l'outre-mer), en étroite collaboration avec le monde de la recherche. Ces méthodes permettent une analyse multi-scalaire emboîtée, depuis l'échelle régionale (bassin hydrographique, bassin versant) à l'échelle locale (tronçons de cours d'eau, ouvrages). Elles appréhendent les trois éléments de qualité fixés dans les objectifs de la DCE : hydrologie, conditions morphologiques, continuité de la rivière ; en s'appuyant sur i) des données géomatiques et ii) des mesures de terrain. Au final, les méthodes développées fournissent des bases de données nationales particulièrement riches, qui trouvent peu d'équivalents en Europe. Cette « boîte à outils » est constituée par :

- Le système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau (Syrah-ce) en métropole, et son pendant en outre-mer, le référentiel hydromorphologique ultramarin (Rhum). Ils sont constitués d'un catalogue de données géographiques recensant les pressions auxquelles sont soumis les cours d'eau, à différentes échelles spatiales (du bassin au tronçon hydrographique), afin de produire un inventaire des différentes pressions et des analyses de risques d'atteinte aux fonctionnements hydrologique, morphologique ou relatif à la continuité de la rivière.
- Le référentiel des obstacles à l'écoulement (ROE) complété par le recueil d'informations sur la continuité écologique (ICE) : le premier recense, sous un cadre de définition commun, les différents ouvrages faisant obstacles à l'écoulement de l'eau (barrage, seuil...), le second permet d'identifier plus particulièrement d'éventuels problèmes relatifs à la continuité biologique. Ces dispositifs, également déclinés en outre-mer, permettent de caractériser la pression des ouvrages sur les cours d'eau, plus spécifiquement leurs impacts en matière de morphologie et de continuité de la rivière, au sein de la même banque GeObs (<https://geobs.brgm.fr/>).
- La méthode de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau (Carhyce) comprenant : i) un protocole d'acquisition de données de terrain, appliqué aux stations des réseaux DCE ainsi qu'à certains projets d'aménagement ou de restauration de cours d'eau ; ii) une banque de stockage nationale des données issues de relevés de terrain (<https://carhyce.eaufrance.fr/>) ; et iii) une démarche d'évaluation du risque d'altération, construite à partir des données collectées. Ce dispositif constitue pour les gestionnaires un outil d'aide à la gestion des cours d'eau, en permettant notamment d'appréhender le diagnostic hydromorphologique à l'échelle stationnelle. Une contribution dans le présent dossier thématique est spécifiquement consacrée au projet Carhyce (voir *infra*).

Reposant sur de solides bases scientifiques, l'ensemble de ces dispositifs propose une démarche d'analyse robuste (Figure 1) permettant i) de caractériser une situation (de pressions ou altérations) en identifiant de manière précise les dysfonctionnements, ii) d'identifier les leviers d'actions et finalement iii) de planifier et de mettre en œuvre une solution adaptée.

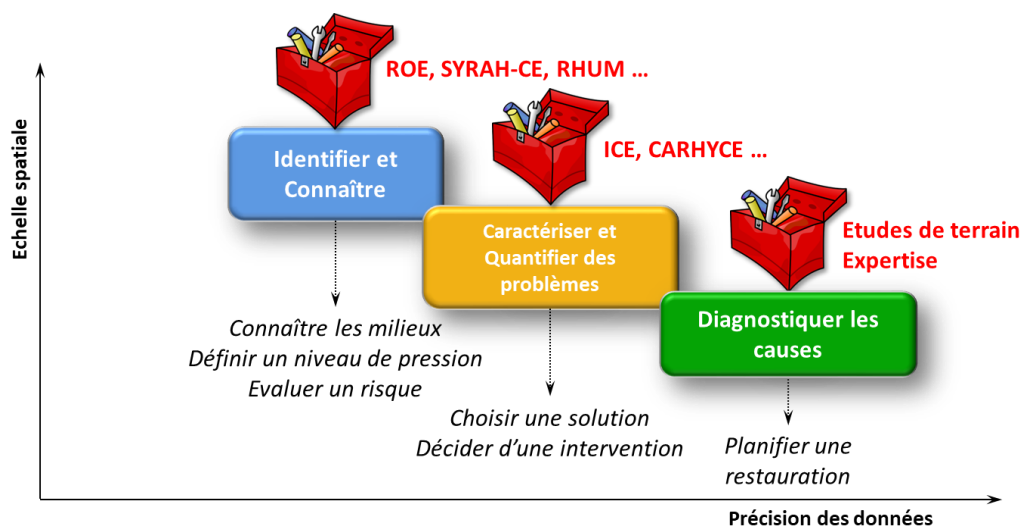


Figure 1 : « Identifier, Quantifier, Hiérarchiser, Décider, Planifier, Réaliser, Maîtriser et Gérer » : la boîte à outils multi-échelle à disposition des gestionnaires français pour l'évaluation, le suivi et la restauration du fonctionnement physique des cours d'eau (d'après Gob et al., 2014).

Mobiliser l'imagerie haute-résolution pour la surveillance des cours d'eau

LIÉBAULT F., BROUSSE G., BERTRAND M., BORGNIET L., ARNAUD-FASSETTA G.

La morphologie des lits de rivière est une composante essentielle de la qualité écologique de l'hydrosystème fluvial. Les processus de création et de destruction de formes fluviales en période de crue, sous l'effet de la redistribution des alluvions grossières (charge de fond) par la puissance fluviale, sont à l'origine d'une mosaïque diversifiée d'habitats aquatiques et terrestres, telle qu'on peut encore l'observer aujourd'hui sur certaines rivières faiblement aménagées. Les multiples pressions anthropiques (barrages, endiguements, rectifications, extractions de graviers) qui s'exercent ou qui se sont exercées sur les cours d'eau ont eu pour effet de contraindre ces dynamiques naturelles, avec des effets importants sur l'hétérogénéité des habitats. Depuis une vingtaine d'années, de nombreux projets de restauration ont vu le jour pour tenter de redonner un fonctionnement physique plus naturel aux rivières. L'analyse des effets de la restauration doit notamment passer par des programmes de suivi fondés sur l'observation des trajectoires morphologiques des cours d'eau, si possible avant et après restauration.

La surveillance morphologique des lits de rivière a largement bénéficié des grandes avancées technologiques récentes en matière de production et de traitement de l'information spatiale. L'imagerie LiDAR est aujourd'hui couramment utilisée pour produire des nuages de points 3D couvrant de grandes surfaces (10-100 km²), selon une résolution et une précision centimétriques. Avec l'émergence des outils de restitution photogrammétrique de type SfM (*Structure from Motion*), la production de nuages de point 3D à partir de prises de vues multi-échelles et multi-orientées d'une même surface est devenue beaucoup plus accessible. Cette innovation majeure issue de la vision artificielle, combinée à la démocratisation de drones de plus en plus performants, s'est traduite par une diffusion très rapide de l'imagerie haute-résolution dans le suivi de la dynamique fluviale (e.g., Javernick et al., 2014 ; Vazquez-Tarrio et al., 2017 ; Woodget et al., 2018).

Ces technologies sont actuellement mobilisées pour suivre deux opérations emblématiques de restauration de rivières alpines, fondées sur des réinjections sédimentaires de grande envergure : le Haut-Drac dans le Champsaur (sous maîtrise d'œuvre CLEDA) et le Buëch en aval du barrage de Saint-Sauveur (sous maîtrise d'œuvre EDF).

Afin de stopper l'incision accélérée du Drac faisant suite aux extractions massives de granulats, 450 000 m³ de graviers ont été utilisés pour recréer artificiellement un lit en tresses sur un tronçon de 3 km près de Saint-Bonnet-en-Champsaur. Pour suivre la formation et l'évolution du tressage, des prises de vue acquises par drone ont été réalisées lors des étiages estivaux de 2017 et 2018 (Fig. 1). Le traitement en photogrammétrie SfM des images a permis de produire des nuages de points géoréférencés, avec des précisions planimétriques et altimétriques de 3-4 cm et 7-9 cm, respectivement. Il a été également possible de restituer la bathymétrie des chenaux en eau à partir d'une correction empirique calibrée sur des données de terrain. Une méthode de cartographie des chenaux en eau a été développée au préalable, fondée sur l'application d'une segmentation des orthophotographies et d'une classification supervisée des objets. Enfin, les nuages de points issus de l'aérotiangulation ont été réalignés finement sur des ensembles de points stables, afin de pouvoir détecter les changements morphologiques sur la période d'observation.

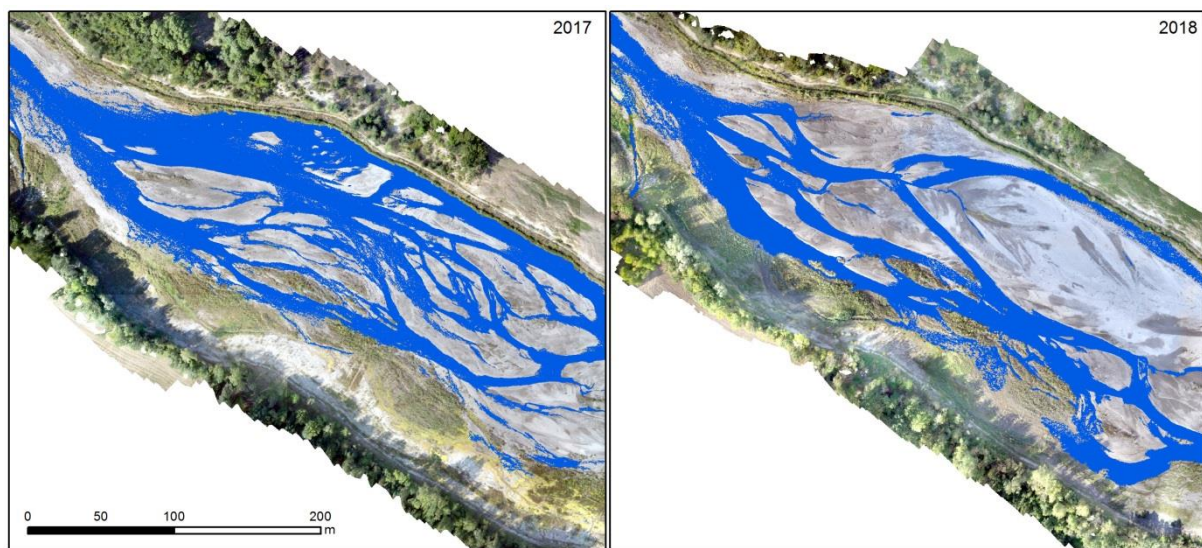


Figure 1. Cartographie automatisée des zones en eau à partir d'une classification supervisée des orthophotos du Haut-Drac de 2018 (résolution de 5 cm), qui montre bien la formation d'un tressage dans le tronçon restauré.

Dans le cadre du suivi de la réinjection sédimentaire du Buëch en aval du barrage de Saint-Sauveur, l'acquisition de données LiDAR séquentielles a permis de suivre l'évolution des atterrissements artificiels (44 000 m³) placés en aval de l'ouvrage et de cerner la propagation de la vague sédimentaire. L'analyse différentielle des restitutions topographiques haute-résolution réalisées avant et après une crue de période de retour 5 ans, combinée au traçage des déplacements de la charge de fond au moyen de tags RFID actifs (BE GEOPEKA), a permis de quantifier la recharge sédimentaire effective depuis la zone de recharge, et d'isoler l'aire d'influence morphologique de la réinjection. Les résultats montrent un engraissement significatif sur une distance d'environ 2 km en aval du site de réinjection (Fig. 2).

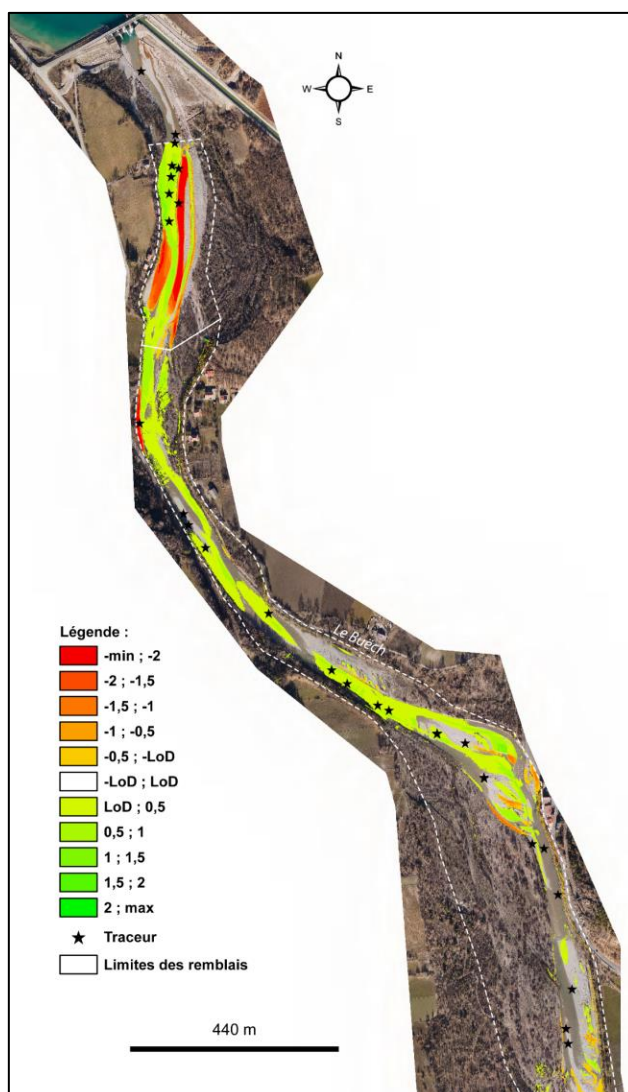


Figure 2 : Topographie différentielle du Buëch qui a permis de reconstruire les effets morphologiques de la réinjection sédimentaire en aval du barrage de Saint-Sauveur, suite à la crue de novembre 2016 (période de retour 5 ans). Le seuil de détection des changements est de 0.129 cm (intervalle de confiance de 95 %).

Ainsi, l'imagerie haute-résolution est devenue incontournable dans le domaine de l'observation des hydrosystèmes fluviaux. Lors des phases d'acquisition terrain relativement rapides, une richesse d'information exceptionnelle est produite à partir d'outils qui deviennent de plus en plus accessibles. L'un des enjeux majeurs des prochaines années concerne le développement d'outils permettant de faciliter le traitement et l'exploitation de ces données, qui restent difficiles à analyser compte tenu de leur quantité.

Bibliographie :

JAVERNICK L, BRASINGTON J, CARUSO B. (2014) - Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213: 166-182.

VÁZQUEZ-TARRÍO D, BORGNIET L, LIÉBAULT F, RECKING A. (2017) - Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps). *Geomorphology* 285: 94-105.

WOODGET AS, FYFFE C, CARBONNEAU PE. (2018) - From manned to unmanned aircraft: Adapting airborne particle size mapping methodologies to the characteristics of sUAS and SfM. *Earth Surface Processes and Landforms* 43: 857-870.

Effets cumulés des retenues sur la morphologie des cours d'eau

S. DUFOUR, C. MAGAND, A.J. ROLLET, Y. LE BISSONNAIS

L'effet des retenues sur le transport sédimentaire et l'hydromorphologie des cours d'eau est essentiellement abordé dans la littérature scientifique pour les grands ouvrages, le plus souvent isolés, en travers de cours d'eau et la question du cumul n'est quasiment pas abordée. Ainsi, l'effet d'une retenue résulte du rapport entre deux variables de contrôle que sont les caractéristiques hydrologiques des écoulements, et les concentrations et débits solides. En ralentissant l'écoulement et diminuant sa capacité de transport, l'un des effets de premier ordre d'une retenue est de constituer un piège pour les sédiments, surtout pour la charge de fond avec un taux de piégeage proche de 100% (sauf en présence d'équipements et/ou de gestions spécifiques).

En modifiant à la fois les flux liquides et solides, une retenue est susceptible de modifier la morphologie des tronçons de cours d'eau situés en aval. Pour que cette modification soit importante il faut (1) que la modification des débits affecte les débits morphogènes et les débits de mise en mouvement des particules, (2) que les retenues bloquent la charge de fond et, (3) que les tronçons aval possèdent une capacité d'ajustement. La nature et les caractéristiques de ces ajustements à l'aval d'un ouvrage ont fait l'objet des nombreuses études et synthèses scientifiques depuis les années 1960 (Williams et Wolman, 1984, Brandt, 2000, Petts et Gurnell, 2005, etc.). La littérature abordant spécifiquement l'influence cumulée des ouvrages sur la morphologie des cours d'eau reste très réduite comme le soulignait la synthèse réalisée en 2016 dans le cadre de l'ESCO « impact cumulé des retenues » (environ une dizaine de références) (Carluier *et al.*, 2016). Ces références traitent essentiellement de grands barrages en série le long de grands fleuves, ou de réseaux de petites retenues collinaires. Les effets observés vont dans le sens d'une diminution de la largeur de la bande active et de la migration des chenaux du cours d'eau, qui peut s'accompagner du développement d'une végétation riveraine. Compte tenu du manque de données disponibles, il peut être intéressant de considérer l'analogie entre ces systèmes de bassins versants équipés de retenues et des bassins comportant des lacs naturels en montagne comme étudiées par Arp *et al.* (2007). Cette étude pourrait ainsi être adaptée au contexte de retenues d'origine anthropique, et être mobilisée pour évaluer leur impact cumulé sur l'hydromorphologie.

Sur le plan opérationnel, l'analyse de la littérature permet de souligner l'importance de prendre en compte le contexte sédimentaire de chaque bassin versant pour analyser l'effet cumulé des retenues. Schématiquement, il convient de distinguer au moins 2 contextes : les bassins où la production et le transfert de sédiments sont importants depuis les versants vers le réseau hydrographique, et les réseaux hydrographiques connaissant un déficit sédimentaire.

Pour conclure, il existe des marges de progrès scientifique très importantes concernant la question de l'évaluation des effets cumulés des retenues sur la dimension hydro-morphologique des cours d'eau. Afin de combler ces lacunes il convient, d'une part, de passer d'une échelle d'analyse « tronçon » à une échelle « réseau » et, d'autre part, de procéder à une analyse spatialisée des processus et des structures résultantes. Ce travail est d'autant plus important que la demande opérationnelle se formalise dans contextes très densément anthropisés où il est non cohérent de considérer séparément les uns des autres les effets des aménagements et/ou des mesures de gestion.

En 2018, un appel à projets a été lancé par l'Agence Française pour la Biodiversité pour évaluer l'impact cumulé des retenues sur l'hydrologie, la physico-chimie, la biologie et l'hydromorphologie des cours d'eau. Huit bassins versants répartis sur l'ensemble du territoire national ont été sélectionnés, dont, cinq présentent d'importantes altérations hydromorphologiques. Ces projets de 2 à 3 ans, devraient permettre de tester les démarches proposées précédemment, d'acquérir de nouvelles données et de hiérarchiser les priorités de recherche sur ce sujet d'un point de vue opérationnel.

Bibliographie :

ARP C.D., J.C. SCHMIDT, M.A. BAKER ET A.K. MYERS (2007) - Stream geomorphology in a mountain lake district : hydraulic geometry, sediment sources and sinks, and downstream lake effects. *Earth Surface Processes and Landforms* 32(4): 525-543.

BRANDT, S. A. (2000) - Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena* 40(4).

CARLUER N., BABUT M., BELLIARD J., BERNEZ I., BURGER-LEENHARDT D., DORIOZ J.M., DOUEZ O., DUFOUR S., GRIMALDI C., HABETS F., LE BISSONNAIS Y., MOLÉNAT J., ROLLET A.J., ROSSET V., SAUVAGE S., USSEGLIO-POLATERA P., LEBLANC B. (2016) - Expertise scientifique collective sur l'impact cumulé des retenues. Rapport 325 pp + annexes.

PETTS G.E. ET GURNELL A.M. (2005) - Dams and geomorphology: Research progress and future directions. *Geomorphology* 71(1-2): 27-47.

WILLIAMS G.P. ET WOLMAN, M. G. (1984) - Downstream effects of dams on alluvial rivers. United States Geological Survey Professional Paper 1286. Washington, DC. 94 p.

Métrologie fine du charriage : objectifs et applications

DÉPRET T., PIÉGAY H., CASSEL M., BOUTAULT F., ARNAUD F.

La mesure du charriage se heurte à de nombreux écueils en raison de la forte variabilité spatiale et temporelle des processus du transport solide en rivière, de la difficulté technique et logistique à déployer les outils de mesure lors des épisodes de crues ou encore du coût parfois élevé du matériel. En fonction des méthodes retenues, quatre principaux objectifs peuvent être considérés : la détermination des débits-seuils de mise en mouvement, la reconstitution des distances et trajectoires de déplacement, l'estimation des épaisseurs érodées et sédimentées ou de la couche active, ou encore la quantification des flux.

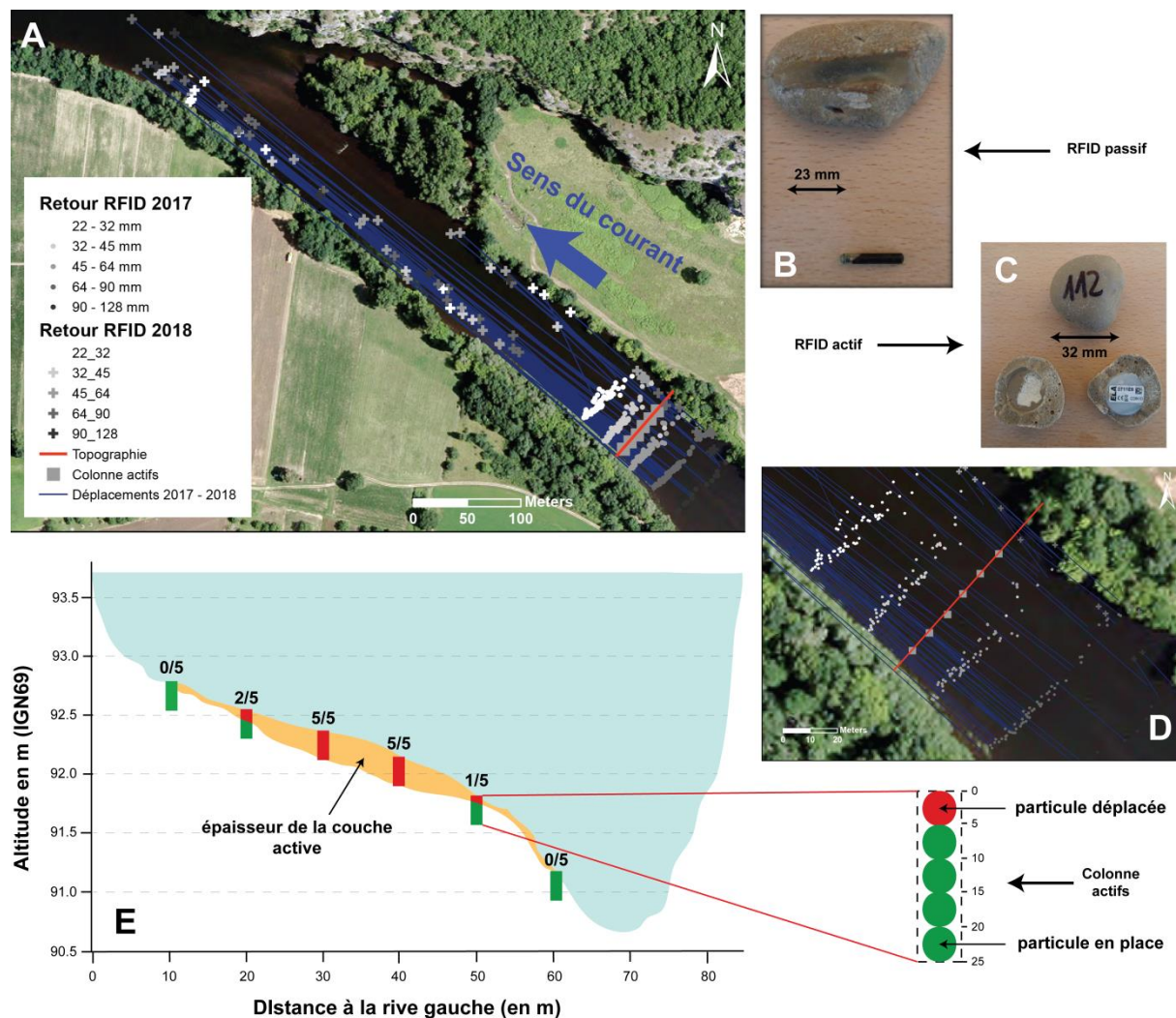
Parmi les méthodes existantes, celle s'appuyant sur des traceurs électromagnétiques est particulièrement prisée car elle permet un suivi individualisé de la charge de fond. Plusieurs types existent. Introduits au milieu des années 2000, les traceurs passifs basses fréquences (136 Hz) ont rapidement gagné en popularité en raison de leurs nombreux avantages : identifiant associé à chaque particule marquée, faible coût (2-3 euros l'unité), longue durée de vie (plusieurs décennies en théorie), distance de détection des particules enfouies significative (1,2m max), possibilité d'équiper des petites particules (axe b minimum : 12 mm). Cette technologie de radio-identification (RFID) présente néanmoins un certain nombre d'inconvénients qui affectent principalement le taux de détection. Dans certains contextes, celui-ci peut être faible (< 30%) car le temps nécessaire pour leur détection devient prohibitif.

En outre, lorsque des particules sont à quelques cm les unes des autres, elles peuvent ne pas être détectées en raison de la collision entre les signaux émis. Les traceurs peuvent également être enfouis dans le sédiment à une profondeur qui dépasse la distance maximale de détection. Le problème de la collision peut être en partie circonscrit en appliquant un protocole d'insertion par maille. Il sera en revanche toujours difficile d'obtenir un taux de détection élevé sur les cours d'eau au transport solide important et à la forte mobilité des formes fluviales car de nombreux traceurs seront enfouis. Cette difficulté concerne aussi les cours d'eau profonds ou de grande taille, compte tenu du temps de prospection qu'il faudra y consacrer. Il est alors judicieux d'augmenter le nombre de traceurs afin d'en garantir la détection d'au moins une centaine. Cela implique un minimum de 500 à 1000 particules à injecter dans les secteurs présentant les contraintes les plus fortes.

De nouveaux traceurs RFID, actifs et émettant à ultra haute fréquence (433.92 MHz), permettent de surmonter en partie ces contraintes. A l'air libre, leur distance maximale de détection est d'environ 80 m. Ils sont également détectables pour des profondeurs d'enfouissement supérieures à 2,6 m lorsque l'antenne se trouve à leur aplomb (rayon de 50 cm). De plus, ce système dispose d'un protocole anticollisions qui rend possible la détection simultanée de plusieurs particules voisines. Du fait de ces caractéristiques, ils présentent des taux de détection nettement plus élevés que les traceurs passifs pour des temps de prospection identiques ou inférieurs. La précision optimale de positionnement est similaire à celle des traceurs passifs. Par ailleurs, cette précision peut être ajustée en fonction des besoins de l'étude, des distances parcourues et du temps disponible pour la prospection. Leurs limites actuelles se rapportent à leur durée de vie (2-10 ans en fonction des intervalles d'émission), leur portée de détection réduite en milieu émergé (2-2.5 m max), leur coût unitaire élevé (35-40 euros) et leur grande taille (diamètre et épaisseur respectivement de 31 mm et 15 mm, contre une gamme de 2-4 mm et 8-32 mm pour les traceurs passifs). L'axe b des plus petites particules pouvant être équipées est ainsi de 45 mm. Les traceurs doivent être insérés dans des particules artificielles dont la recette, élaborée à cet effet, permet de reproduire la gamme de densité des sédiments naturels.

Les traceurs actifs offrent au final l'opportunité d'étudier les déplacements de la charge de fond sur des types de rivières difficiles à suivre avec des traceurs passifs. Ils s'avèrent particulièrement adaptés au suivi sédimentaire de larges cours d'eau dont l'essentiel de la bande active est hors d'eau à l'étiage (rivières en tresses essentiellement). De plus, les temps de prospection peuvent encore être réduits avec une détection par drone. Pour les grandes rivières présentant un lit mouillé important, les suivis restent envisageables mais les temps de prospection s'allongent significativement et se rapprochent de ceux observés avec les traceurs passifs. Les taux de retour demeurent en revanche théoriquement bien plus élevés. De plus, lorsque l'épaisseur de la lame d'eau ne dépasse pas 2,5 m, les prospections sont plus sécurisées et moins fastidieuses puisque la détection se fait à partir d'une embarcation à l'aide d'une antenne flottante et non plus d'une antenne tractée au fond du lit comme pour les traceurs passifs.

L'existence de ces deux types de traceurs donne désormais la possibilité d'évaluer la mobilité de la charge de fond sur une grande gamme de cours d'eau. Ils permettent principalement de déterminer les distances et trajectoires de déplacement et d'approcher les débits-seuils de mise en mouvement. Les traceurs actifs peuvent aussi permettre d'estimer les épaisseurs érodées et sédimentées lorsqu'ils sont installés en colonne sur des sections en travers. Combiner à des traceurs (actifs ou passifs) à partir desquels les distances de transport sont déterminées, il est alors possible de mesurer le flux de sédiments en reprenant le schéma théorique de la technique des chaînes et des galets peints mais en l'appliquant cette fois à des chenaux en eau. Un tel dispositif a par exemple été mis en place sur la Dordogne pour estimer les débits morphogènes et quantifier les volumes charriés lors des crues sur des tronçons déficitaires en sédiments car situés à l'aval d'une chaîne de barrages.



A – Trajectoire des traceurs en 2017 et 2018 sur la Dordogne (site de Meyraguet, équipé en janvier 2017) ; B – RFID passif équipé avec un tag de 23 mm ; C – galet artificiel équipé avec tag actif ; D – Disposition des colonnes de RFID actifs et E – Section au niveau des colonnes de RFID actifs avec les déplacements mesurés entre 2017 et 2018 (pour une crue biennale de deux jours, distance médiane = 268 m, épaisseur médiane couche active = 10 cm, volumes charriés = 2280 m³).

Concilier hydroélectricité et continuité sédimentaire

Jean-René MALAVOI, Rémi LOIRE

La continuité sédimentaire : objectif « grossier »

Depuis de très nombreuses années, EDF met en œuvre sur une grande partie de ses ouvrages hydroélectriques, des mesures de gestion visant à faire transiter vers l'aval tout ou partie des sédiments entrant dans ses retenues. Ces mesures visaient principalement, jusqu'à ces dernières années, à éviter le comblement des réservoirs et à maintenir les prises d'eau fonctionnelles. Dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE, EDF cherche à améliorer encore cette gestion pour faire transiter plus efficacement les sédiments au travers de ses barrages et notamment les plus grossiers (sables, graviers, galets). Il est en effet fondamental de préciser que les exigences réglementaires, tant européennes que françaises, visent principalement la continuité de la fraction grossière de la charge alluviale.

La circulaire d'application du L214-17 publiée en 2013, précise que l'objectif de la continuité sédimentaire est de garantir la vie des biocénoses aquatiques dont les habitats sont inféodés au substrat alluvial et d'assurer sur le moyen/long terme un « état sédimentaire suffisant » grâce à une superficie, une épaisseur, une nature granulométrique, un agencement de substrat alluvial et une fréquence de mise en mouvement, permettant la vie de ces biocénoses sur le tronçon considéré.

Pour mettre en œuvre ces nouvelles approches, EDF travaille à trois niveaux :

- Evaluation de la « transparence sédimentaire » de ses ouvrages.
- Evaluation de l' « état sédimentaire » des tronçons situés en aval des barrages concernés
- Mise en œuvre de mesure de gestion de la continuité sédimentaire

Evaluation de la « transparence sédimentaire » des barrages

EDF gère aujourd'hui environ 960 barrages et seuils de prise d'eau dont le niveau actuel de « transparence sédimentaire » (aux sédiments grossiers) est en cours d'évaluation à partir de divers paramètres concernant les caractéristiques des ouvrages et leur mode de gestion. 5 classes de « transparence » ont été créées, basées sur les paramètres suivants :

- Volume sédimentaire Transitant (VT) / Volume Entrant (VE)
- Granulométrie Transitant (GT) / Granulométrie Entrant (GE)
- Fréquence Transit (FT) / Fréquence Naturelle (FN)

Nous considérons à ce jour, que plus de 50% des ouvrages permettent le transit « suffisant » des sédiments grossiers arrivant dans les retenues.

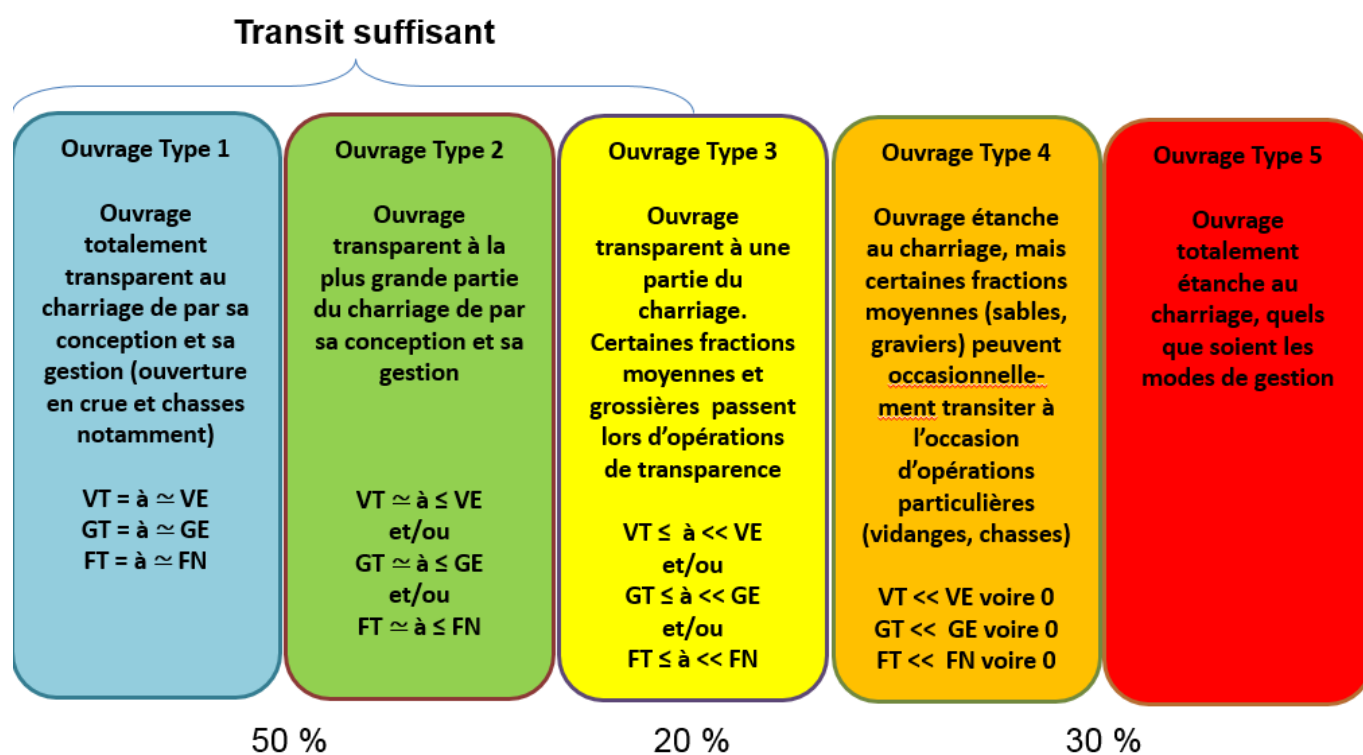


Figure 1: les catégories de transparence sédimentaire et proportion des 960 barrages et seuils de prises d'eau EDF concernés (en cours de validation)

Evaluation de l' « état sédimentaire » en aval de barrages

En complément de cette analyse et en particulier pour les ouvrages classés en Liste 2 au titre du L214-17, nous réalisons des diagnostics d'état sédimentaire sur les tronçons concernés, afin de vérifier qu'ils présentent bien les caractéristiques du substrat alluvial demandées par la circulaire de 2013.

A ce jour, sur 22 tronçons « liste 2 » diagnostiqués, 19 (dont 6 dans les 2 catégories les moins « transparentes » au charriage) sont jugés conformes aux exigences de la circulaire et 3 défaillants. Cela signifie que même en l'absence de transparence de l'ouvrage lui-même, un état sédimentaire peut perdurer, au moins un certain temps, dans les tronçons situés en aval, particulièrement si les débits liquides délivrés ont été réduits dans les mêmes ordres de grandeurs que les débits solides (cas de nombreux grands barrages).

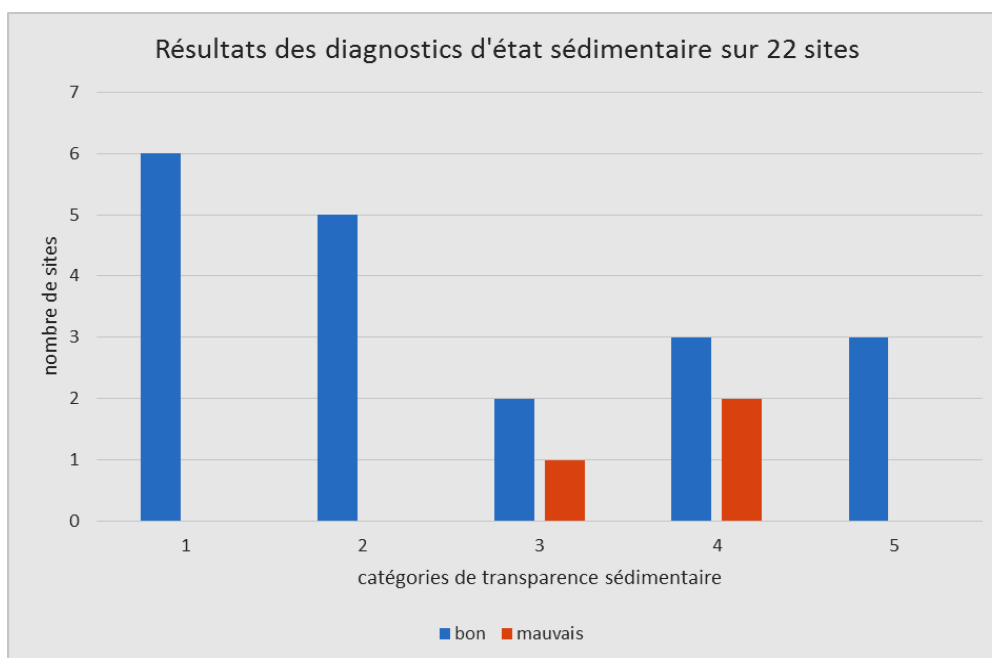


Figure 2 : résultats des diagnostics d'état sédimentaire réalisés sur 22 tronçons classés en liste 2, en aval d'ouvrages gérés par EDF.

Mesures de gestion mises en œuvre aujourd'hui

Un certain nombre de mesures de gestion déjà anciennement mises en œuvre par EDF continuent à l'être aujourd'hui. Nous ne développerons ci-dessous que celles qui contribuent à améliorer la continuité des sédiments grossiers.

La gestion par chasse

Cette méthode consiste à ouvrir, lors des crues ou des hautes eaux, les vannes de fond des barrages, en ayant préalablement vidé la retenue afin qu'il s'y recrée un écoulement libre. Seuls les barrages de type 1 à 3 (certains 4 parfois) permettent ce type de gestion mais celle-ci n'est pas toujours possible ni efficace et sa mise en œuvre est complexe, notamment car il faut gérer en parallèle le déstockage des sédiments fins.

Aujourd'hui des chasses à vocation de continuité sédimentaire « grossière » sont réalisées sur plus de 350 ouvrages, dont une centaine de plus de 100 000 m³ de capacité.

Notons que plus les chasses sont réalisées régulièrement, moins elles génèrent d'évacuation de fines lors de leur mise en œuvre.



Figure 3 : le site du barrage d'Aigueblanche (rivière Isère) où des chasses sont réalisées environ chaque année. a) vue aérienne de la retenue (Google Earth), b et c) vue de la retenue quasi pleine et vue pendant une chasse (prise vers l'aval depuis le pont). Notez la disparition du banc sablo-graveleux visible en rive droite sur la photo b). d) vue depuis l'aval immédiat des vannes du barrage après la chasse (photos b, c et d © EDF).

La gestion par curage/réinjection

Lorsque la gestion par chasse ne permet pas, ou incomplètement, le transit des sédiments grossiers, ou lorsque les chasses ne sont pas réalisables, EDF réalise des curages en queue de retenue (là où se dépose la fraction grossière) et une réinjection des matériaux curés immédiatement en aval de l'ouvrage. Les crues suivantes se chargent ensuite de redistribuer les alluvions dans le tronçon aval.



Figure 4 : le site du barrage de Saint Sauveur (rivière Buech) où des chasses sont réalisées régulièrement, mais qui ne suffisent pas à faire transiter la totalité des alluvions grossières qui se déposent en queue de retenue. a) vue aérienne (Google Earth), b) vue vers l'amont de la zone de curage en partie amont de la retenue (sur le delta alluvial), c) vue vers l'amont des deux cordons de réinjection (44000 m³ au total en 2016) , au fond le barrage et la retenue. (b et c © EDF).

La gestion par érosion des berges aval

Si les solutions précédentes ne sont pas réalisables, ou pour les compléter, EDF propose aussi sur certains sites, de réactiver les processus d'érosion latérale dans le tronçon situé en aval de l'ouvrage, afin de l'alimenter par la charge grossière ancienne disponible dans les terrasses alluviales.



Figure 5 : site du Vieux Rhin en aval du barrage de Kembs. a), dans le rectangle jaune, la zone qui a été désenrochée pour permettre l'érosion latérale (Google Earth). b) vue vers l'aval de cette zone après une crue en 2013 (© EDF).

Une méthode radicale... mais qui se traduit par la fin de l'activité hydroélectrique : la suppression d'ouvrage

Une solution radicale est parfois mise en œuvre sur certains ouvrages obsolètes : leur dérasement complet. Certains ont déjà été réalisés et d'autres sont programmés. Notons qu'il ne s'agit plus là de « concilier » hydroélectricité et continuité sédimentaire mais d'abandonner l'activité hydroélectrique. Il va sans dire que ce type de solution n'est mis en œuvre que très rarement sur le parc exploité par EDF...



Figure 6 : site du seuil de Trente Pas sur la Bléone (avant et après dérasement en 2013)

Conclusion

La préservation et l'amélioration de l'état sédimentaire des tronçons de rivière situés en aval de barrages hydroélectriques sont des challenges à la fois scientifiques, techniques, financiers et sociétaux. EDF s'y est attelé depuis plusieurs années et chaque année, de nouveaux sites sont traités, avec des approches souvent encore expérimentales. Les retours d'expérience tant français qu'internationaux sur les nouvelles méthodes de gestion de la continuité sédimentaire grossière sont globalement très positifs mais la mise en œuvre reste ardue tant les contraintes sont importantes.

Caractérisation de l'hydromorphologie fluviale à partir des données Carhyce

THOMMERET N., GOB F., BILODEAU C., TAMISIER V., KREUTZENBERGER K.

Introduction

Le projet Carhyce constitue un des outils déployés par l'AFB et ses partenaires pour répondre aux exigences de la DCE sur le territoire français (métropole et outre-mer). Projet ambitieux notamment par l'ampleur des données collectées, il constitue aujourd'hui un outil national d'aide à la gestion des cours d'eau associant, à un catalogue de données sur l'hydromorphologie des cours d'eau français, un outil de diagnostic hydromorphologique.

Le catalogue de données national

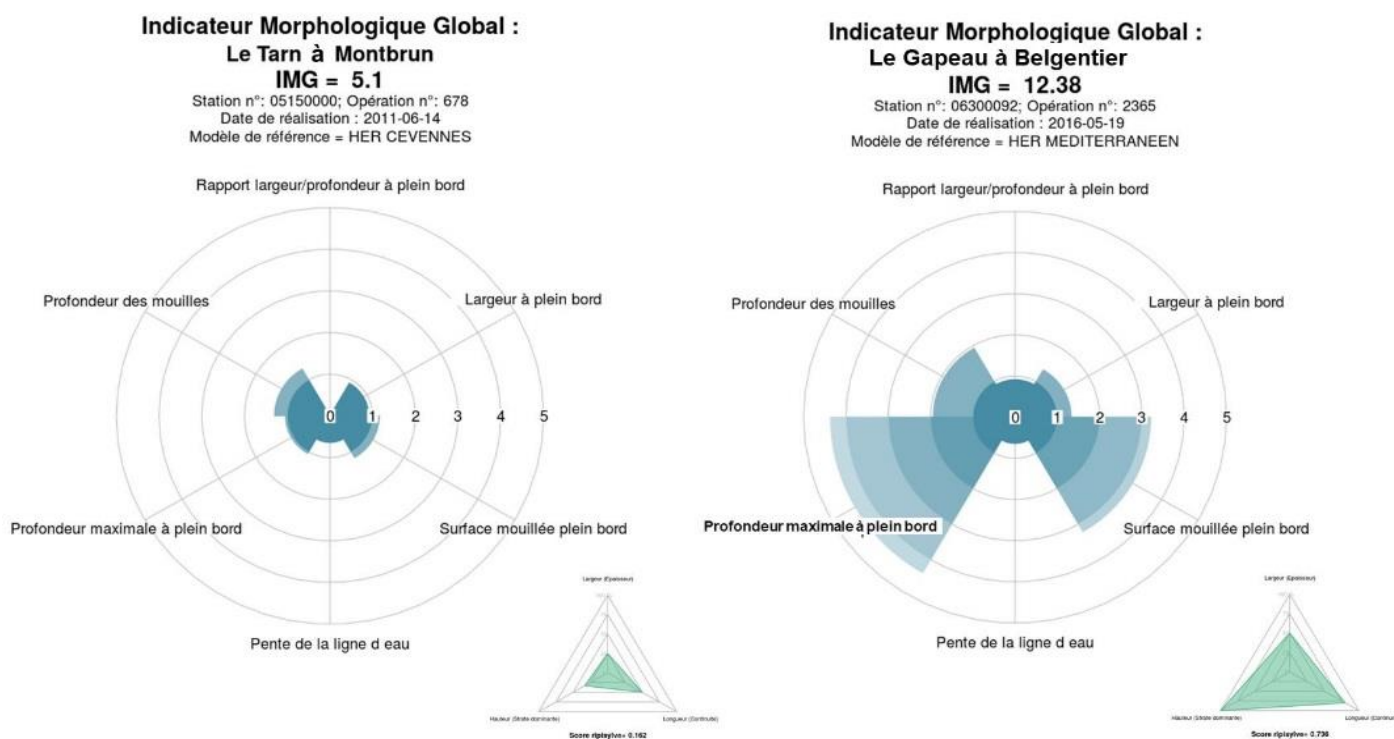
Le protocole de terrain Carhyce permet de disposer de données hydromorphologiques de terrain standardisées et objectives. Déployé sur l'ensemble du territoire national depuis 2009 par les agents de l'AFB, il permet de couvrir les différents types de cours d'eau et contextes géographiques français. Pour chacune des stations prospectées, les mesures de terrain et les traitements de données effectués *a posteriori* permettent de reconstituer leur morphologie mais aussi de calculer les paramètres de géométrie au jour d'acquisition et à plein bord ainsi que les paramètres relatifs à la dynamique du cours d'eau et à la diversité des formes du lit, ou encore de caractériser les sédiments et la ripisylve. La base de données regroupe à ce jour plus de 3000 tronçons de rivière décrits par une centaine de paramètres, constituant un catalogue de données riche et unique en Europe. Il est aujourd'hui utilisé par la communauté scientifique pour améliorer les connaissances du fonctionnement hydro-géomorphologique des cours d'eau français et par les gestionnaires qui y puisent de l'information pour, par exemple, caractériser certaines situations, planifier et suivre leurs interventions.

Fondements théoriques et évaluation hydromorphologique

Ces données permettent notamment de définir des tendances statistiques utilisées pour la construction de modèles ou référentiels hydromorphologiques régionaux. Ces derniers reposent sur une approche spatiale et dynamique qui considère des références spatiales plutôt qu'historiques. Ainsi, on se base sur un ensemble d'environ 500 tronçons de rivière considérés comme peu impactés par les activités et aménagements anthropiques récents (*i.e.* sur les dernières décennies) plutôt que sur un état historique figé dans le temps. Par cette démarche, on considère les hydrosystèmes comme dynamiques, évoluant dans le temps et l'espace, cherchant ainsi à favoriser la mise en place d'une situation d'équilibre des cours d'eau entre les variables hydrologiques de contrôle et l'ajustement des variables de réponse hydromorphologique du lit. Cet équilibre étant sensible aux conditions climatiques, hydrologiques et géologiques, les relations sont définies à l'échelle régionale.

L'évaluation consiste à quantifier l'écart d'une station donnée aux situations de référence régionales. Ces écarts traduisent la réponse du cours d'eau aux variables naturelles ou à des pressions (recalibrage, extraction de granulat, changement d'occupation du sol, modification des débits liquides ou solides, etc.) et peuvent mettre en évidence un déséquilibre du système fluvial. L'indicateur morphologique global (IMG) permet de rendre compte des écarts selon différentes composantes de la morphologie des lits et constitue un instrument utile pour : (i) identifier les stations potentiellement altérées, (ii) travailler sur l'impact des altérations sur les biocénoses, (iii) proposer un cadre et évaluer l'efficacité des opérations de restauration et (iv) être, en complément d'autres outils, utilisé comme outil d'analyse pour le rapportage DCE. Il prendra d'autant plus de sens qu'il sera analysé en regard d'autres graphiques ou paramètres tel que le recouvrement de ripisylve ou la diversité de granulométrie ou encore étudié dans le temps. Toutefois, comme tout indicateur, les modèles de référence et l'IMG doivent être considérés avec précaution et ne doivent pas aboutir à une uniformisation des cours d'eau ou à la normalisation de la forme de leur lit. Ils doivent être utilisés en complément d'autres outils d'analyse notamment représentatifs des échelles d'expression des variables de contrôles et de réponses des cours d'eau comme des pressions qui s'y exercent.

L'outil Carhyce d'aide à la gestion des cours d'eau (données retravaillées, indicateurs synthétiques, graphiques, mise en contexte des opérations et références bibliographiques) est mis à disposition des gestionnaires et de la communauté scientifique par le biais l'interface web d'exploitation des données (IED Carhyce : <http://lgp.cnrs.fr/carhyce>).



Indicateur morphologique global (IMG) de deux stations : le Tarn à Montbrun (collectée en 2011) et le Gapeau à Belgentier (collectés en 2016) ; en vignettes, représentation des « scores ripisylve » pour chaque cas.

Evaluer l'efficacité de la restauration : le réseau des Sites de Démonstration

VIVIER A., ROLAN-MEYNARD M.

Les travaux hydrauliques (rectification, endiguement, seuils, barrages, extractions de granulats...) provoquent des altérations du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau. En uniformisant et en modifiant les habitats, ces interventions perturbent profondément les communautés biologiques inféodées aux cours d'eau. Afin de remédier à ces altérations et sous l'impulsion d'une législation favorable (Directive cadre sur l'eau, 2000), un nombre croissant d'opérations de restauration de l'hydromorphologie sont mises en œuvre. Mais qu'en est-il de leurs effets sur l'écosystème, de leur efficacité à la fois par rapport à leurs objectifs propres et par rapport à l'atteinte du bon état, objectif majeur de la DCE ? Les conclusions émises par la littérature scientifique (études de cas, méta-analyses) ne sont pas univoques. Si la majorité de ces travaux, dont l'ambitieux projet européen *Reform*, soulignent les effets positifs de la restauration hydromorphologique sur divers paramètres, comme la diversité et les abondances des communautés aquatiques, d'autres travaux sont plus mesurés dans leurs conclusions. Tous évoquent cependant la grande variabilité des réponses des communautés aux travaux de restauration. D'après ces études, cette variabilité peut être en partie d'origine naturelle (diversité des milieux, des régimes hydrologiques...), mais peut également résulter de biais méthodologiques fondamentaux tels que des problèmes de conception, temporelle et/ou spatiale, des suivis et d'insuffisance de prise en compte des éléments de contexte.

Depuis 2010, les agences de l'eau, l'Irstea et l'Agence française pour la biodiversité travaillent en partenariat pour améliorer les connaissances sur la restauration de l'hydromorphologie des cours d'eau et promouvoir sa mise en œuvre sur le terrain. C'est dans ce contexte qu'est né le projet de *Réseau des sites de démonstration pour la restauration hydromorphologique des cours d'eau*. Ce projet a pour objectif scientifique de produire des données standardisées de suivi sur quelques dizaines de sites de restauration, appelés sites de démonstration. Ces données de suivi doivent permettre i) au porteur de projet d'évaluer la réussite de son action, mais également ii) d'alimenter la communauté scientifique en données de suivi de bonne qualité, harmonisées, bancarisées au sein de bases nationales. Ceci devrait permettre, à moyen terme, une analyse robuste des données de suivi inter-sites et l'amélioration de nos connaissances sur les effets de la restauration, ainsi que de notre capacité à prédire ces effets et à agir de façon pertinente sur le terrain pour retrouver des cours d'eau en bon état.

La pierre angulaire du projet a consisté en l'élaboration d'un suivi standardisé. Une première version de ce suivi, appelé « Suivi scientifique minimal » (SSM), a été proposée en 2010. Ce travail pose les bases d'un suivi bien construit et informatif. Temps long, design *BACI* (*Before-after-control-impact*), utilisation de protocoles standardisés en constituent les grands principes. Cette première version du SSM a été mise en œuvre sur plus de vingt sites de démonstration. En 2014, une évaluation du projet « Réseau de sites de démonstration » a été menée. Tout en réaffirmant les principes fondamentaux du SSM, cette évaluation a permis de dégager des pistes d'amélioration concernant l'opérationnalité du suivi, la meilleure prise en compte des données de contexte et la bancarisation des données. Issu d'une réflexion collective, un guide opérationnel pour l'élaboration de ce suivi est paru début 2019 (Rolan-Meynard *et al.*, 2019), applicable à 7 types d'opérations de restauration hydromorphologique sur cours d'eau. Il est adapté aux cours d'eau permanents et prospectables à pied. Sur les bases de cette nouvelle version du SSM, le réseau des sites de démonstration a aujourd'hui pour objectif de s'élargir à de nouveaux sites et d'atteindre d'ici fin 2020 un minimum de 60 sites suivis.

Depuis 2016, des actions de valorisation scientifiques et techniques (colloques, journées techniques, publication) permettent au projet de gagner en visibilité et de s'enrichir de nouveaux regards et de nouvelles collaborations. La 1^{re} journée nationale du réseau des sites de démonstration a eu lieu le 13 novembre 2018 et a permis d'échanger autour de divers retours d'expérience (présentations orales et vidéos) et de souligner l'originalité et l'importance de ce réseau. Les discussions ont permis de conforter ou de faire émerger de nouvelles pistes de travail, comme par exemple la prise en compte des co-bénéfices liés aux opérations de restauration et le suivi des effets de la restauration sur les communautés végétales et animales des berges.

Au-delà de ses objectifs scientifiques et techniques, ce projet a permis une montée en compétence collective de l'ensemble des participants et le renforcement d'une communauté de travail autour d'objectifs communs clairement formalisés. De par son aspect partenarial et collaboratif, il permet également de réfléchir et de construire une réflexion à des échelles de temps longues et à des échelles spatiales multiples (du local au national), indispensables pour pouvoir appréhender les trajectoires d'évolution des écosystèmes.

Bibliographie

ROLAN-MEYNARD M. *et al.* (2019) - Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau. Agence française pour la biodiversité. Collection Guides et protocoles. 189 p.

Réhabilitation hydromorphologique des cours d'eau guyanais soumis à l'orpaillage

MELUN G., LE BIHAN M.

Le territoire guyanais est couvert à environ 95% par la forêt amazonienne primaire, et abrite à ce titre une biodiversité incroyable et méconnue. La forêt guyanaise abriterait entre 7 000 et 10 000 espèces végétales, mais aussi près de 1 200 espèces de vertébrés, 685 espèces d'oiseaux et plus 400 000 espèces d'insectes. Un seul hectare de forêt guyanaise abriterait autant d'espèces d'arbres que toute l'Europe (Deloitte, 2018).

Ces milieux d'une richesse inestimable sont pourtant extrêmement fragiles et aujourd'hui largement menacés par différentes pressions, notamment par l'exploitation aurifère (orpaillage). On distingue l'orpaillage primaire, qui s'opère directement sur les filons au sein de la roche-mère, et l'orpaillage dit « alluvionnaire », qui vise à remobiliser les particules d'or contenues dans les dépôts alluviaux des criques (cours d'eau), et issues de l'érosion des gisements primaires. Une part importante (70%) de l'or guyanais provient de cette seconde méthode d'orpaillage, qui est à l'origine d'un fort accroissement de la déforestation, d'une déstructuration importante de l'ensemble des fonds de vallées exploités et d'une rectification des cours d'eau.

Depuis 1990, ce sont ainsi plus de 3000 km de cours d'eau qui ont été exploités. En plus de la destruction des habitats et des espèces présents sur la zone d'orpaillage, les modalités d'exploitation (sol nu, terrassement conséquent, travaux hydrauliques) entraînent de fortes perturbations des flux physiques (turbidité, colmatage par les sédiments fins, réchauffement de l'eau, pollution, etc.) et biologiques (Fig.1). Le niveau d'altération de la qualité physico-chimique des eaux se propage également en aval, à l'origine d'une perte significative de fonctionnalités écologiques sur l'ensemble du réseau.

L'exploitation légale est généralement concrétisée par une autorisation d'exploitation (AEX) d'1 km² sur une période maximale de 4 ans. La zone exploitée prend généralement une forme rectangulaire qui s'étend en fond de vallée sur une longueur d'environ 2 km. Un arrêté préfectoral fixe, pour chaque AEX délivrée, une obligation de réhabilitation partielle des parcelles *post-exploitation*, visant notamment à favoriser leur revégétalisation. Cependant, un manque de cadrage et d'orientations techniques en lien avec le fonctionnement hydromorphologique global des cours d'eau et des milieux rivulaires, réduit l'efficacité desdits travaux de réhabilitation (Fig.2).

La réhabilitation est un « retour partiel à l'état du cours d'eau avant dégradation » (Morandi & Piegay, 2017). Elle impose de connaître les caractéristiques hydromorphologiques de la crique avant l'exploitation alluvionnaire (*i.e.* nombre de bras, pente, sinuosité, faciès d'écoulement, gabarit, granulométrie, caractéristiques de la ripisylve, etc.). Ces données, qui caractérisent l'état initial, constituent des valeur-guides, essentielles pour le bon dimensionnement de la réhabilitation.

Une collaboration, associant l'AFB à l'ensemble des partenaires locaux (Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Guyane (DEAL), Office de l'eau de Guyane (OEG), Office national des forêts (ONF), Fédération des opérateurs miniers de Guyane (FEDOMG) et Collectivité territoriale de Guyane (CTG), a été mise en place afin d'améliorer l'efficacité des travaux de réhabilitation. Une mission d'expertise a été conduite sur le terrain en novembre 2018, avec pour objectifs de caractériser dans un premier temps les impacts de l'orpaillage sur les milieux aquatiques, puis de fournir des éléments techniques concrets pour améliorer la reconstruction des lits fluviaux et de leurs marges (Melun & *al.*, 2019). Il est par exemple indiqué que le tracé du nouveau lit reprenne le niveau de sinuosité initial tout en évitant les zones de barranques (bassins de décantation), où l'ajustement morphologique des lits s'avère très complexe. La disposition des granulats apportés au cours d'eau doit surtout permettre de reconstituer des radiers aux points d'inflexion des méandres, afin de stabiliser le profil en long de la crique. Ces matériaux doivent présenter une granulométrie similaire à celle naturellement présente dans le lit.

L'ensemble des préconisations rappelle également l'importance d'une bonne organisation lors des phases chantier. En pleine forêt primaire, la réhabilitation des criques est complexe du fait notamment de l'accessibilité, qui rend difficile l'acheminement d'outils ou de matériaux. Pour pallier à ces contraintes, il est primordial de conserver précieusement, au cours de la phase d'exploitation, les éléments naturels, essentiels à la réhabilitation des fonds de vallées (terres humifères, grumes, cailloux et blocs...). L'ensemble des préconisations formulées permet d'envisager une amélioration de la fonctionnalité des milieux impactés, qui sera évaluée par un suivi rigoureux sur des sites pilotes, dès 2019.



Fig. 1 : Vue d'une crique soumise à l'orpaillage alluvionnaire, mettant en évidence la très forte dégradation des milieux. (© G. Melun, 2018).

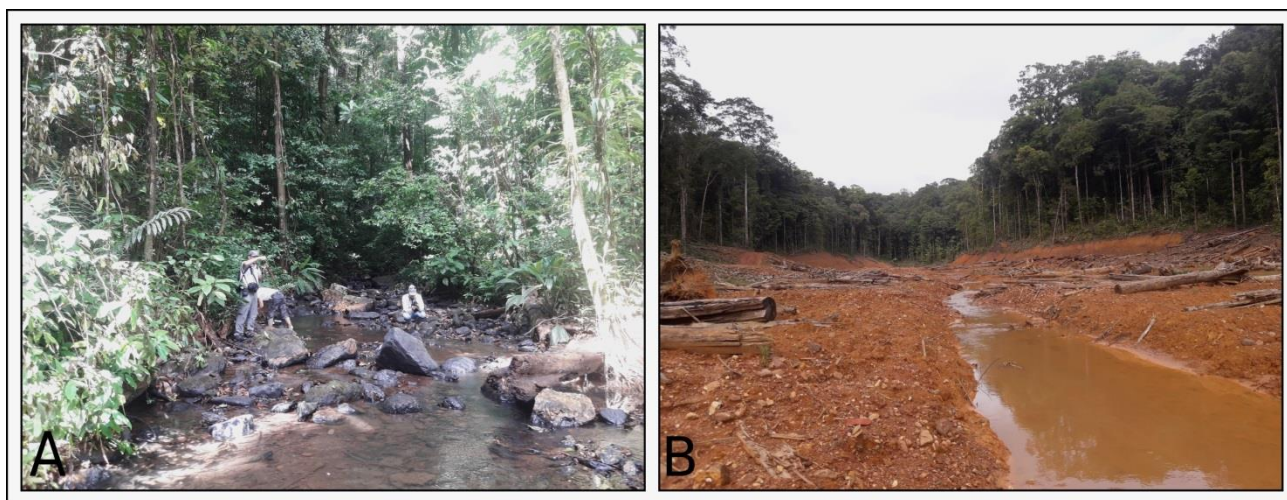


Fig. 2 : Aperçu de la Crique Ricard « de référence » sur un tronçon bientôt exploité (A) et, quelques centaines de mètres en aval, « réhabilitée » après exploitation (B). (© G. Melun, 2018)

Bibliographie

MELUN G., LE BIHAN M., DE BILLY V. (À paraître) - Guide de préconisations techniques pour la réhabilitation hydromorphologique des sites d'orpaillage en Guyane. Projet RHySOG. Rapport AFB.

MORANDI B., PIÉGAY H. (2017) - Restauration de cours d'eau en France : comment les définitions et les pratiques ont-elles évolué dans le temps et dans l'espace, quelles pistes d'action pour le futur ? Collection *Comprendre pour agir*. AFB. 28 pages.

DELOITTE (2018) - Le potentiel de développement économique durable de la Guyane. Rapport WWF. 526 p.