

# **Influence des sédiments fins sur la dynamique des systèmes de bancs de galets alternés d'une rivière de montagne aménagée**

*Influence of fine sediments on the morphodynamics of an alternate gravel bar system in a harnessed mountain river*

Laboratoire d'accueil :

Unité de Recherche RiverLy, Irstea centre de Lyon-Villeurbanne,  
5 rue de la Doua - CS 20244, 69625 Villeurbanne Cedex, France

Directeur de thèse :

Benoît Camenen, Irstea

Ecole doctorale, domaine de spécialité, établissement de rattachement :

MEGA, mécanique des fluides, Université de Lyon

Résumé:

Ce travail de thèse concerne la morphodynamique des bancs de galets alternés sur les rivières alpines aménagées. Un objectif important de ce travail sera de mieux appréhender l'impact des sédiments fins sur la dynamique de tels systèmes, en particulier sur le possible atterrissement des bancs de galets, le développement de la végétation et éventuellement la forte réduction de leur dynamique. Cette étude sera réalisée sur le système Arc-Isère qui a en effet la particularité de transporter de grandes quantités de matériaux fins qui peuvent, par les dépôts et leur lien avec la végétation pionnière, fortement influencer les écoulements, le transport solide par charriage, et la morphodynamique des bancs. Dans la suite des travaux de G. Antoine (2013), un effort sera réalisé quant à la dynamique des matériaux en suspension (MES) et les échanges avec le lit moyen. Il s'agira aussi de replacer les études locales de bancs de galets (thèses de M. Jodeau, 2007, M. Jaballah, 2013, et C. Jourdain, 2016) dans leur contexte et de mieux appréhender leur représentativité au sein du système Arc-Isère. Cette étude sera expérimentale (mesures de terrain et traitement de lidar et photos aériennes) et numérique (modélisation 1D). Parmi les objectifs scientifiques, la comparaison entre les effets d'une chasse de barrages par rapport à une crue naturelle sera fondamentale pour les gestionnaires de la rivière. Cette thèse se fera en effet en collaboration avec EDF (CIH Chambéry) dans le cadre du site atelier Arc-Isère de la ZABR.

Abstract:

The objective of this PhD work is to better understand the effects of fine sediments on the morphodynamics of gravel bars in engineered alpine rivers. Even if the morphology of these rivers is mainly controlled by bed load transport (and so coarse sediments), fine sediments do affect the dynamics through their interaction with bed load and vegetation through possible deposits on gravel bars. This study will be conducted on the Arc-Isère river system, which is characterized by alternate gravel bar system more or less vegetated and large concentrations of suspended sediment matter (SSM). Following the work of G. Antoine (2013), an important part of the work will be on the SSM dynamics, with a special focus on exchanges between the flow and gravel bars. Another objective is to extend local studies on gravel bars (PhDs of M. Jodeau, 2007, M. Jaballah, 2013, and C. Jourdain, 2016) to the whole river system. The study will be both experimental (field measurements, lidar and aerial picture analysis) and numerical (1D models). An important part of the scientific objectives will be to compare effects of flushing events carried out by the dam managers and natural floods on the morphodynamics of the river. This PhD work will be partly supported by EDF and the Arc-Isère collaborative study site of the ZABR (Zone Atelier Bassin Rhône), a regional multidisciplinary observatory for the Rhône river basin.

# 1. Objectifs

## 1.1 Objectif général du travail de thèse

L'objectif de cette thèse est de proposer une meilleure compréhension de l'interaction entre les sédiments fins et la morphodynamique d'un système de bancs de galets alternés dans une rivière alpine endiguée, en particulier du fait des échanges avec le lit (érosion et dépôt). Ce travail se fera principalement via une expérimentation et étude du système Arc-Isère mais aussi via une modélisation unidimensionnelle de la dynamique des sédiments fins.

## 1.2 Profil du candidat recherché

Le candidat recherché pour répondre à l'objectif de ce projet devra au minimum avoir des connaissances de base dans les disciplines suivantes :

- Hydraulique des rivières, transport sédimentaire, géomorphologie
- Modélisation numérique, programmation (Fortran, Matlab)
- SIG, télédétection, traitement de l'image
- Français, Anglais scientifique

# 2. État de l'Art

## 2.1 Aménagement des rivières

L'endiguement des rivières et leur aménagement par des équipements hydrauliques affectent la morphologie des lits (Gregory, 2006, Piégay, 2005, Martin-Vide, 2001). Les rivières initialement en tresses développent souvent des bancs alternés entre digues (Jaeggi, 1984, Lisle et al., 1991). L'étude de Moulin (2005) sur l'Isère et ses affluents montre que les actions anthropiques tendent à favoriser la stabilité des lits par fixation des formes fluviales. Les bancs de galets autrefois mobiles sont fixés et métamorphosés en îles stables et végétalisées d'abord par la végétation herbacée puis par les bois tendres. Cette végétalisation de l'espace intra-digue est un des enjeux majeurs de la gestion des cours d'eau, du fait d'une élévation des lignes d'eau en crue ; du stockage des matériaux fins dans les sections végétalisées ; de l'augmentation de la production de bois mort disponible en cas de crue pour créer des embâcles. Sur la Drôme, par comparaison de deux zones avec ou sans endiguements, Dufour et al. (2007) montrent que les endiguements affectent clairement la morphologie de la rivière en favorisant l'incision du chenal, un accroissement de la granulométrie, et en induisant des effets sur la végétation (homogénéisation des espèces et prédominance des espèces résistantes à des conditions sèches). L'étude plus récente de Jaballah et al. (2015) a aussi mis en évidence l'impact non négligeable des obstacles naturels (courbe liée à un éperon rocheux) et artificiels (pile de pont) sur la dynamique et la stabilité des bancs de l'Arc. Ceci est en cohérence avec de nombreuses études de formation de système de bancs alternés (Crosato & Mosselman, 2009, Zolezzi & Seminara, 2001).

Les impacts des aménagements hydroélectriques sur la morphologie du lit des cours d'eau sont de deux types : (i) une rupture de la continuité sédimentaire, les sédiments étant stockés dans les retenues, et (ii) une perturbation de l'écoulement, le régime naturel des cours étant fortement influencé par les prises d'eau, déviations et lâchers (Brandt, 2000; 2005). Cette situation conduit à une érosion des berges et des tronçons à l'aval. Kondolf (1997) utilise le terme "hungry water" pour qualifier ces écoulements. Si le débit liquide est diminué jusqu'à la limite de mise en mouvement des galets, une réduction de la section active est seulement observée. L'exemple de la rivière Piave en Italie (Surian, 1999), indique un rétrécissement du chenal, un passage du style en tresse au style divaguant, et l'absence d'un nouvel équilibre. L'établissement d'un débit réservé, souvent inférieur au débit naturel, favorise aussi la colonisation du lit par la végétation.

Les rivières aménagées sont non seulement affectées par les effets continus des retenues mais aussi par des événements ponctuels tels que les chasses hydrauliques. L'objectif des chasses est d'évacuer les

sédiments stockés dans les retenues (Poirel, 2001). Les impacts sur l'aval sont loin d'être négligeables. En particulier, les débits importants générés par le lâcher d'eau ont des effets sur la morphologie des tronçons aval. Mürle et al. (2003) ont observé l'érosion des cônes de déjection et l'accumulation de sédiments grossiers dans les tronçons les plus larges, ces sédiments étant repris par la suite. Fasolato et al. (2006) ont observé des évolutions du lit (érosion ou dépôt) atteignant plus de 4 m de haut. Les concentrations en sédiments fins sont aussi susceptibles d'induire des dépôts conséquents. Rathburn & Wohl (2003) ont montré que les dépôts ont lieu préférentiellement dans les mouilles et les recirculations latérales de l'écoulement. Brandt (1999) a établi que les dépôts se font principalement dans le lit plutôt que sur les berges, et notamment dans les dépressions, la quantité et la taille des sédiments diminuant avec la distance au barrage.

## ***2.2 Impacts des sédiments sur les rivières aménagés***

Le lien entre les augmentations de concentration en sédiments fins et les augmentations de contrainte de cisaillement au fond a été souligné (Ziegler et Nisbet, 1994). Une fois déposés dans le lit, les sédiments fins peuvent avoir un impact sur le transport solide (Diplas et Parker, 1992) : des quantités importantes de sédiments fins accumulées dans le lit augmentent la stabilité des particules de surface ; mais une fois que la zone sous le pavage devient saturée en sédiments fins et que les interstices du pavage se remplissent en sédiments fins, la surface du lit devient moins rugueuse et la mobilité des grains en mouvement est augmentée. Des sédiments fins cohésifs peuvent également former, en séchant, un ciment liant les galets entre eux et diminuant ainsi leur capacité à être mis en mouvement.

L'absence de crue morphogène, i.e. susceptible de mobiliser une grande partie des sédiments du lit, sur plusieurs années entraîne une stabilisation du lit et sa végétalisation. Les travaux expérimentaux de Allain-Jegou (2002) et Jourdain (2017) sur l'Isère en amont de Grenoble visaient à la compréhension de l'influence de la végétation sur les paramètres hydrauliques et des interactions transport sédimentaire-écoulement-îles, le terme île désignant des bancs végétalisés. La présence de la végétation implique un rehaussement des lignes d'eau et surtout un stockage des sédiments fins dans les parties hautes du lit, menant à une végétalisation irréversible et croissante des îles. De même, des expériences en modèle réduit (Martin-Vide, 2001) montrent une élévation de la ligne d'eau en crue du fait de la présence de végétation, et l'observation d'une crue sur le cas de terrain correspondant indique des dépôts de sédiments fins dans les zones végétalisées. Les bancs de galets constituent en effet un lieu privilégié pour l'implantation de la végétation (Gilvear et al., 2005) Les bancs sont le résultat de séries chronologiques complexes de dépôts et d'érosions successifs associés aux crues (Bartholdy & Billi, 2002). Le degré de végétalisation des bancs est à mettre en étroite relation avec la durée d'exposition du banc au-dessus de la ligne d'eau, la profondeur de la nappe alluviale, la nature et la stabilité des sédiments, et enfin avec le type de végétation disponible pour la colonisation. Suivant ces critères, les bancs sont progressivement végétalisés alors qu'ils s'élargissent et augmentent de hauteur, et cette végétalisation induit une concentration de l'écoulement qui réduit le pouvoir érosif (Jang & Shimizu, 2007). Edwards et al. (1999) montrent que, sur les bancs de galets, la présence des débris les plus gros (troncs) ont une forte influence sur le dépôt des sédiments fins et sont des sites de colonisation pour la végétation pionnière. Ces sites représentent le premier stade de végétalisation des îles et ont le potentiel pour s'accroître au fil des crues successives. Les plantes ont en outre la capacité de favoriser le dépôt de sédiments fins et autres débris par leur effet sur l'écoulement, alimentant de cette façon la végétalisation progressive du banc de galets. La relation entre les dépôts de sédiments fins et la végétation sur un banc de galets est examinée par Langlade & Décamp (1995). L'étude expérimentale sur un banc de galets de la Garonne montre que le gradient, amont-aval de la végétation est corrélé au gradient des caractéristiques granulométriques (sédiments grossiers à l'amont, sédiments fins à l'aval). Des solutions techniques (essartage, curage, arasement des îles) existent pour éliminer la végétation des bancs ou pour limiter son développement (Allain Jegou, 2002, Jourdain, 2017).

Il existe peu d'études à ce jour sur le potentiel impact des sédiments fins sur la dynamique d'une rivière à gravier à l'exception de leur lien avec le développement de la végétation pionnière (Gilvear et al., 2005 ; Gilvear & Willby, 2006). Les bancs de galets constituent un stockage très important de sédiments fins dont on ne connaît que très peu la dynamique (Salant et al., 2008; Marttila & Klove,

2014). Perret et al. (2015) ont montré à l'aide d'une étude de laboratoire que les sédiments fins infiltrés dans la matrice grossière pouvaient ainsi fortement limiter le début de mouvement des graviers, en particulier si les sédiments fins ont une certaine cohésion. L'érodabilité de ces sédiments fins est en effet contrôlée par leurs propriétés physiques et chimiques ainsi que par d'éventuels effets biologiques (Grabowski et al., 2011, Droppo et al., 2015). Selon les événements hydrologiques, de très forts dépôts de sédiments peuvent aussi apparaître, accélérant l'isolement du banc par rapport au chenal principal (Rodrigues et al., 2005 ; Camenen et al., 2016).

### **3. Contexte**

#### ***3.1 La gestion sédimentaire intégrée des rivières de montagne aménagées***

L'évolution des lits des cours d'eau du fait des aménagements des bassins (occupation des sols et retenues) et du changement climatique (fonte des glaciers) est un enjeu important du point de vue de la ressource en eau (position de la nappe alluviale), du potentiel énergétique (capacité des réservoirs), de risques (inondation, protection contre les crues débordantes), de la stabilité des ouvrages (ponts, érosion des berges), de l'écologie des hydrosystèmes (zones humides, qualité de l'eau et du substrat), des voies de communications.

Dans un tel contexte, les rivières de montagne sont traditionnellement recalibrées sous la forme d'un lit unique permettant le passage à plein bord d'événements rares, voisins de la crue centennale. Cette pratique ne respecte pas les lois de la dynamique fluviale basées essentiellement sur l'existence et le maintien d'un lit mineur capable d'évoluer librement à travers un lit d'inondation. Les principaux inconvénients des recalibrages en lits uniques sont :

- obstruction du chenal lors des fortes crues mobilisant la charge de fond,
- dépôt de sédiments fins lors de faibles crues très chargées en matières en suspension (MES), et végétalisation, voire fixation des formes fluviales
- interventions fréquentes pour le curage artificiel du lit,
- mauvaise qualité de l'eau pour les étiages et la vie aquatique.

Ainsi les rivières de montagne fortement aménagées présentent des déséquilibres morphologiques à forts enjeux en termes de risque naturel et de ressources en eau. Ceci rend nécessaire la définition et la mise en œuvre d'une gestion sédimentaire intégrée à l'échelle de l'hydrosystème.

#### ***3.2 Formation des systèmes de bancs alternés peu dynamiques***

La construction de digues pour canaliser les rivières alpines a fortement modifié ces systèmes où les apports sédimentaires restent importants et où la vallée est étroite. Du fait de l'absence de mobilité latérale, de nombreuses rivières alpines sont passées d'un système en tresses à un système de bancs alternés. Ce type de système correspond à une alternance de bancs de galets accolés sur les digues en rive gauche et en rive droite avec un chenal principal divaguant entre ces bancs. L'augmentation de la pente moyenne dans ces rivières alpines du fait d'un recalibrage en un lit rectiligne a de plus impliqué une érosion importante du lit mineur. Cette érosion a souvent aussi été exacerbée par des extractions de sédiments en lit mineur jusque dans les années 90 mais aussi par la limitation des apports sédimentaires grossiers du fait de la présence de barrages le long de la rivière et surtout du fait des ouvrages de protection réalisés sur la plupart des torrents de montagne alimentant ces rivières alpines (seuil, plage de dépôt, etc.). A cela se rajoute l'impact des ouvrages hydroélectriques et dérivations, très présents sur ces rivières, qui ont fortement modifié l'hydrologie, laissant de longs tronçons de rivière sous un débit réservé. Ainsi, une évolution courante des rivières alpines endiguées est la fixation de ces bancs, qui petit à petit se végétalisent, et limitent fortement la débitance de la rivière lors des crues rares, impliquant ainsi un risque d'inondation plus élevé.

### ***3.3 Le cas représentatif de l'Arc (en Maurienne) et de l'Isère***

La vallée de la Maurienne en aval de Modane est caractérisée par une concentration d'aménagements hydroélectriques et de voies de communication (la voie ferrée Lyon - Turin, la RN6 et l'autoroute A43) dans une vallée étroite fortement marquée par les apports en sédiments en provenance de l'ensemble du bassin versant. Le lit de l'Arc déjà fortement contraint (Marnézy, 1999) a de nouveau été modifié pendant la construction de l'autoroute (1996-2001). Il a été curé, élargi afin d'assurer l'écoulement de la crue centennale, rendu plus rectiligne en certains secteurs afin de repousser vers l'aval un possible débordement. La confluence avec l'Isère coïncide avec un système à plus faible pente mais avec des contraintes similaires (artificialisation du lit, hydro-électricité, présence d'ouvrage transversaux, incision du lit). La dérivation de l'Isère (retenue d'Aigueblanche) vers l'Arc implique, tout comme pour l'Arc, un tronçon de l'Isère en aval d'Aigueblanche avec une hydrologie fortement impactée, et donc une dynamique fluviale fortement réduite. A cela se rajoute sur l'Isère un impact toujours ressenti des extractions de granulats et la végétalisation généralisée des bancs avec un fort enjeu sur le risque d'inondation sur la Combe de Savoie (Artelia, 2013).

Une importante problématique pour EDF est de maintenir l'aménagement hydroélectrique Arc-Isère dans un état acceptable concernant les dépôts de sédiments pour l'optimisation de la production et la fonctionnalité des organes de sécurité. L'Arc moyen, en aval des restitutions des centrales de Bissorte, Aussois et Villarodin, est équipé d'aménagements au fil de l'eau. Les aménagements du système Arc-Isère se composent ensuite d'une prise d'eau au barrage de Saint Martin la Porte, d'une dérivation des eaux captées vers l'Isère via deux bassins d'accumulation (Longefan et Flumet) et un bassin de démodulation (Le Cheylas). Les eaux sont turbinées en entrée du bassin de Longefan (usine d'Hermillon) et en entrée du bassin du Cheylas (usine du Cheylas fonctionnant en STEP). De la même manière, des eaux de l'Isère sont dérivées à Aigueblanche, turbinées et restituées à l'Arc à Randens. Afin de conserver la capacité des réservoirs, des chasses hydrauliques de ces barrages au fil de l'eau sont réalisées régulièrement (au mois de juin de chaque année sauf en cas de crue naturelle supérieure à la crue annuelle). Depuis 2008, des chasses du bassin de Longefan sont aussi réalisées dans l'objectif d'atteindre un bilan sédimentaire nul au niveau du bassin. Contrairement à l'Isère (aval de l'Arc en Maurienne) qui a une pente plus faible et dont les bancs sont en grande partie végétalisés, le secteur aval de l'Arc en Maurienne montre une diversité importante pour son lit moyen allant du banc nu au banc totalement fixé par la végétation. Dans l'objectif d'estimer les possibles évolutions de l'Arc et de l'état des aménagements au fil de l'eau, la compréhension de la dynamique du lit et de sa végétalisation est donc essentielle.

Dans le secteur de la Combe de Savoie, la végétalisation des bancs de galets inquiète fortement du fait du risque accru des inondations. Le lit moyen de l'Isère auparavant dynamique et occupé par des espèces pionnières, s'est aujourd'hui transformé en un milieu figé siège d'une végétation terrestre. Des modélisations hydrauliques ont ainsi montré que l'inondation de la Combe de Savoie devient problématique à partir des crues trentennales, voire critique pour des crues cinquantennales. En 2016 et 2017, des travaux de restauration ont été réalisés pour redynamiser des bancs de galets ; ces derniers consistaient principalement en l'arasement des bancs végétalisés afin de former de nouveau un chenal secondaire. Il se pose cependant la question de la pérennité de ces travaux en particulier du fait de la dynamique de lit « amoindri » liée à l'hydrologie affectée par les aménagements hydro-électriques.

Le site Arc-Isère, bien que spécifique, reste représentatif des nombreuses rivières alpines aménagées. Son étude pourra ainsi être facilement transposable à des rivières comme l'Arves ou la Durance en France, ainsi qu'à d'autres rivières européennes (Lech, Allemagne ; Drau, Autriche ; Rhône amont, Suisse ; Adige, Italie ; etc.)

### ***3.4 Contexte scientifique***

Le site Arc-Isère est reconnu depuis 2008 comme site-atelier de la Zone Atelier du Bassin du Rhône (ZABR) pour l'étude des flux de matière dans un hydrosystème montagnard aménagé. Le site-atelier est co-animé par B. Camenen (Irstea HH) et J. Némery (IGE Grenoble). Cette labélisation permet un

développement des échanges interdisciplinaires incluant de nouvelles disciplines comme l'écologie, la chimie ou les sciences sociales. En partenariat avec EdF, le SPC Alpes du Nord, l'IGE et la DREAL Rhône-Alpes, un réseau de stations de mesure hydro-sédimentaire (débit, concentration en MES) a été mis en place sur le bassin versant de l'Arc et de l'Isère. En vue de la compréhension des apports d'un des principaux contributeurs en MES au Rhône, cette action s'inscrit dans l'Axe 3 « Métrologie des Flux » de l'Observatoire des sédiments du Rhône (OSR4).

L'équipe « Hydraulique des Rivières » de l'unité de recherche RiverLy d'Irstea développe des recherches sur la dynamique hydro-sédimentaire de l'Arc depuis le début des années 1990. Avec les doctorats de Magali Jodeau (2007), et de Mohamed Jaballah (2013), un banc de galet de l'Arc (dit « MJ ») situé près de Ste-Marie-de-Cuines a été suivi en détail de 2005 à 2013, incluant de nombreuses mesures topographiques, de granulométrie de surface et de l'hydrodynamique locale. Le doctorat de Mohamed Jaballah (2013) a permis de mettre en valeur ces mesures et de replacer sa dynamique à l'échelle du tronçon et du système de bancs alternés (Jaballah et al., 2015). Depuis 2005, de nombreuses mesures ont été réalisées avant et après les principaux événements hydrologiques, soit avant et après les chasses de barrage annuelles de 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016 et 2017 et les crues de septembre 2006, mai 2008 et juin 2013. Nous disposons donc d'un site-laboratoire dont l'évolution morphodynamique est suivie et documentée en détail localement. La dynamique des dépôts de fines a aussi pu être évaluée sur quelques bancs à l'aide d'une analyse photographique (Camenen et al., 2013, 2016). Ce site a enfin permis d'étudier finement les interactions complexes entre charge grossière, charge fine et végétation, produisant des conditions de transport et d'évolution morphologique très différentes des schémas classiques uniquement fondés sur la charge grossière. Ces deux projets de thèse se sont cependant focalisés que sur une dynamique locale et n'ont pas permis d'élucider l'impact des sédiments fins sur un banc de galets non végétalisé.

Quelques autres sites de référence ont été suivis par EDF depuis 2008 sur des tronçons représentatifs de différents faciès morphologiques le long de l'Arc et de l'Isère. Camille Jourdain (2017) a aussi étudié la dynamique de l'Isère sur la Combe de Savoie avec une étude de terrain de bancs de galets situés en amont et en aval de la confluence avec l'Arc. Elle a montré que des crues courantes agissent sur la dynamique sédimentaire et végétale de l'Isère principalement via un renouvellement lent des macroformes fluviales par le biais d'une érosion latérale progressive des bancs. A contrario, des crues rares ne permettent nécessairement pas une destruction de la jeune végétation ni un renouvellement du lit de grande ampleur. Une approche globale semble donc intéressante afin d'établir un modèle conceptuel de l'évolution du lit de l'Arc et de l'Isère, qui pourra servir de socle à une gestion sédimentaire intégrée de la rivière. L'apport des données LiDAR (levées en 2010, 2014, et 2017) permettra ainsi d'avoir une vision plus globale de l'état du système et de son évolution (Eldin, 2012) en réalisant une étude diachronique des caractéristiques des bancs (étendue, volume, taux de végétalisation etc.). De plus, dans le cadre d'une collaboration avec EDF-CIH et d'un projet financé par l'Agence de l'Eau, des appareils photo ont été placés en haut de berge permettant des prises de photos journalières de plusieurs bancs test. Ces photos devront nous permettre ainsi d'évaluer la dynamique des dépôts de fines suite à des événements permettant la submersion des bancs, voire l'impact d'autres événements météorologiques (pluie, vent) sur la dispersion de ces dépôts (Camenen et al, 2013).

Une modélisation unidimensionnelle du système Arc-Isère est particulièrement adaptée du fait de la longueur du tronçon étudié (>100 km). Des modèles numériques ont ainsi été réalisés pour l'estimation des évolutions des fonds avec RubarBE (développé par A. Paquier ; Dugué, 2009 ; Jaballah, 2013) et pour la dynamique des sédiments fins avec Mage-AdisTS (développé par J.B. Faure ; Caillaud, 2013) et Courlis (EDF ; Antoine, 2013). Concernant les sédiments fins, les travaux ont jusqu'à aujourd'hui principalement porté sur l'estimation des flux le long de l'Arc et de l'Isère. Antoine (2013) a ainsi montré que les principales difficultés pour la modélisation des dépôts et érosion sur les bancs sont la quantité et la disponibilité des sédiments fins sur les bancs, la potentielle non-uniformité latérale de la concentration en MES, et la variabilité des écoulements sur le banc non reproduite par un simple modèle 1D donnant une vitesse moyenne dans le chenal et au dessus du banc. Aujourd'hui, la majorité des modèles numériques inclut les équations de Krone (1962) et Partheniades (1962) pour reproduire les échanges de sédiments entre la suspension et le lit. La formulation

actuellement implémentée dans AdisTS correspond à une simplification de ces équations (Guertault et al, 2016) qui mériterait sans doute des améliorations pour tenir compte des effets de cohésion et consolidation. Une réflexion sur l'interaction entre la dynamique végétale et l'évolution morphologique semble de plus nécessaire. Elle pourra se faire sur la base de travaux en modélisation bi-dimensionnelle (van Oorschot, et al., 2017). Une modélisation bidimensionnelle serait en effet plus adaptée pour la description plus fine des processus de dépôt et érosion sur un banc mais cette dernière reste plus difficilement applicable sur un long tronçon du fait du manque de données (bathymétrie et pour le calage hydraulique) et du coût en temps de calcul (Jaballah, 2013).

## **4. Programme de travail**

### **4.1 Objectifs scientifiques**

Les objectifs scientifiques de ce travail de doctorat sont les suivants :

- Identifier et quantifier la dynamique d'évolution des bancs de galets, du taux de sédimentation/érosion et de végétalisation de ces derniers, à partir d'une analyse des suivis Lidar et photographies aériennes. Ce travail devrait par ailleurs permettre d'évaluer la quantité de sédiments fins disponible le long du domaine d'étude ;
- Compléter l'étude globale par des suivis expérimentaux in situ sur un ou plusieurs sites pilote à définir afin de comprendre plus particulièrement la dynamique des dépôts sur les bancs de galets. Ces sites incluront en particulier les bancs instrumentés avec des appareils en time-laps ;
- Améliorer la représentation des termes sources (érosion/dépôt) dans le code de calcul unidimensionnel AdisTS (advection-dispersion) pour reproduire la dynamique des dépôts sur les bancs de galets, et valider la modélisation numérique sur des événements suivis (chasses de barrages).

### **4.2 Identifier et quantifier la dynamique d'évolution des bancs de galets**

Cette première partie du travail de thèse correspondra à une analyse des données existantes afin de caractériser le système Arc-Isère dans sa globalité et d'identifier les différentes dynamiques de bancs de galets le long de ce système.

L'analyse de la dynamique d'évolution des bancs de galets sur l'ensemble de l'Arc (à partir de St Jean de Maurienne) et de l'Isère (de Aigueblanche jusqu'à Montmélian) se fera principalement à partir des levés Lidar (mai et septembre 2010, déc. 2014, janvier 2017) et photos aériennes. En collaboration avec Lionel Pénard et l'outil PRIM (Pénard & Morel, 2012), une base de données permettant de caractériser les bancs de l'Arc et de l'Isère (superficie, volume, granulométrie de surface, taux de végétalisation) sera réalisée à partir des différents levés Lidar. Une comparaison diachronique permettra de plus de discuter la dynamique de ces bancs de galets en fonction de leur caractéristique (volume, taux de végétalisation, etc.).

Ce travail devrait ainsi permettre de mettre en relief les études plus locales réalisées précédemment sur la morphodynamique de bancs de galets (Jodeau, 2007 ; Jaballah, 2013 ; Jourdain, 2017) en situant ces bancs étudiés à l'échelle de la rivière.

Cette étude, en combinant bibliographie et analyse photographique des surface de dépôt, devra de plus permettre d'évaluer la quantité de sédiments fins disponible le long de l'Arc et de l'Isère.

### **4.3 Suivi expérimental et compréhension des processus locaux**

Un point important de ce travail de doctorat est la compréhension des processus de dépôt et érosion des sédiments fins sur les bancs de galets. Camenen et al (2015) ont ainsi montré que des effets d'entraînement des différentes classes de sédiments pouvaient fortement modifier le flux de chute des

particules. Des études plus ponctuelles de la dynamique de ces dépôts semblent donc fondamentales pour mieux caractériser les différents processus de dépôt et reprise sur les bancs de galets. L'acquisition de données se fera en particulier lors des événements de chasse de barrages où une instrumentation pourra être mise en place. En collaboration avec nos partenaires (EDF, IGE) dans le cadre d'un projet ANR (appel d'offre 2018), ces campagnes de mesures incluront des mesures de l'écoulement (LSPIV, ADCP), des prélèvements de Matériaux en Suspension (MES) sur différents points de la colonne d'eau à l'aide de différents préleveurs, de mesure de concentration et granulométrie in situ à l'aide d'un LISST-200X, ainsi que des mesures de vitesses de chute des MES à l'aide de l'outil SCAF développé par l'équipe Hydrimz d'IGE.

En parallèle, cette étude sera complétée par une analyse d'image journalière (appareil photo en prise snap-shot) de plusieurs bancs test afin d'établir l'impact de différents événements hydrologiques sur les dépôts (en lien avec la hauteur d'immersion du banc, le débit de la rivière et sa concentration), voire le possible impact de la pluie ou du vent si des évolutions sont observées sans submersion du banc. Cette analyse se fera en collaboration avec EDF et dans le cadre d'un projet avec l'Agence de l'Eau.

A partir des observations et expérimentations effectuées sur les sites expérimentaux de terrain, le doctorant proposera une analyse des processus complexes issus du couplage entre charge grossière charriée, charge fine transportée en suspension et mélangée aux grossiers dans les dépôts type bancs, et les différentes phases de développement de la végétation.

#### ***4.4 Modélisation de la dynamique des sédiments fins***

La troisième partie de ce projet a pour objectif d'améliorer la modélisation numérique pour reproduire la dynamique des sédiments fins (argile, limon et sable). Le(la) doctorant(e) se focalisera plus précisément sur la dynamique des dépôts de ces matériaux avec un objectif de mieux représenter les termes sources dans le modèle hydro-sédimentaire 1D Mage (ou Rubar)-AdisTS (qui résout l'équation d'advection-dispersion), soit les termes de dépôt et érosion moyens sur un banc. Ce travail consistera principalement à modifier et caler une équation de type Krone-Partheniades (Partheniades, 1962) déjà implémentée dans le modèle (Guertault et al., 2016). Il sera cependant important de faire le lien entre les processus locaux mesurés sur un banc de galets instrumenté (évolution des fonds, courantologie, turbulence, vitesse de chute des matériaux, etc.) et leurs valeurs moyennes sur le banc. Ceci pourra être réalisé par l'application d'un modèle 2D sur le ou les sites expérimentaux en collaboration avec EDF-LNHE (thèse de Florian Cordier, projet ANR) afin de comparer et valider les résultats du modèle 1D. Un stage est prévu au printemps 2018 afin de construire le modèle hydro-sédimentaire unidimensionnel de l'Arc et de l'Isère sur la base des modèles existants (Antoine, 2013) en affinant tout particulièrement la description des bancs de galets. Le modèle numérique 1D sera ensuite validé sur l'ensemble du tronçon Arc-Isère pour des événements suivis pendant la thèse mais aussi depuis la mise en place du réseau de mesure (depuis 2006). Le doctorant bénéficiera donc de l'expérience acquise avec la thèse de Germain Antoine (2013) et les modélisations que ce dernier a réalisées avec le modèle Courlis, et des données d'un réseau de stations hydro-sédimentaires et de mesures locales mis en place par ailleurs. En particulier, la station de Pontamafrey fournira débits et concentrations en entrée du système étudié côté Arc ; une station devrait se construire sur l'Isère amont afin de fournir les données d'entrée côté Isère. Les stations de Chamousset (Arc aval), Montmélian (Isère en aval de la confluence) et enfin Grenoble Campus permettront de vérifier les données de flux en sortie. La principale difficulté en plus d'améliorer les termes d'échanges avec le fond de la rivière sera de quantifier de manière réaliste la disponibilité en sédiments fins sur les bancs de galets.

Un module permettant de prendre en compte la végétation, sa dynamique (végétation pionnière en particulier) et son impact sur l'hydraulique (évolution dynamique de la rugosité) et donc sur les dépôts et reprises des sédiments fins sera développé sur la base des travaux de Van Oorschot et al. (2017). L'objectif reste prioritairement de développer un modèle simple spécifique à une modélisation 1D afin d'améliorer les scénarios prédictifs en prenant donc compte d'une possible évolution de la végétation sur le long terme.

Enfin, une modélisation prospective avec AdisTS pourra être réalisée sur des chroniques de débit hypothétiques (incluant chasses hydrauliques des barrages de l'Arc, crues naturelles) afin d'identifier les zones à risque morphologique (érosion, exhaussement) et plus particulièrement les zones où les dépôts et la végétalisation des bancs peuvent s'accroître de manière irréversible. Une telle modélisation prospective pourra permettre de proposer des solutions de gestion alternative .

#### 4.5 Calendrier

- Début 2018 : validation de la proposition de thèse par Irstea
- Printemps-été 2018 : sélection des candidats
- Automne 2018 : début des travaux de thèse (1<sup>er</sup> octobre ou après)
- 2018-2019 (1<sup>ère</sup> année de thèse):
  - Analyse bibliographique ;
  - *Téledétection* : Mise en place d'une base de données des caractéristiques des bancs de l'Arc et Isère, analyse diachronique ;
  - *Expérimental* : Premières expériences sur la dynamique des dépôts sur un banc de galets de référence lors d'une chasse de l'Arc ou de l'Isère ; début d'analyse de la dynamique des dépôts à l'aide des photos journalières ;
  - *Numérique* : Prise en main des modèles existants de l'Arc et Isère et du code de calcul AdisTS ;
  - *Rédaction* : Conférence, article dans un journal international (analyse lidar et photos aérienne) rapport annuel
- 2019-2020 (2<sup>nde</sup> année de thèse):
  - *Expérimental* : Suivi et analyse de la dynamique des dépôts sur un banc de galets lors de quelques événements (photo issues drone, photos journalières, mesures topographiques et granulométrique, mesures de l'écoulement au dessus du banc, mesures granulométriques, évolution en temps réel du fond, etc.)
  - *Numérique* : Application d'AdisTS sur des événements de l'Arc et Isère. Développement et validation du terme d'érosion et dépôt sur les sites pilotes ;
  - *Rédaction* : Conférence, article dans un journal international (analyse de la dynamique des dépôts sur les bancs de galets), rapport annuel
- 2020-2021 (3<sup>ème</sup> année de thèse):
  - *Expérimental* : Suivi éventuel d'un événement pour compléter l'analyse des données accumulées au cours des trois années de doctorat.
  - *Numérique* : Modélisation, implémentation et calage d'un module « végétation » pour la modélisation 1D, tests prospectifs pour des chasses hydrauliques des barrages de l'Arc et crues naturelles afin d'améliorer la compréhension des différents possibles impacts en aval et proposer des solutions de gestion alternatives
  - *Rédaction* : article dans un journal international (modélisation numérique), mémoire de doctorat.
- Automne 2021 : Soutenance de thèse

## 5. Encadrement et collaborations

### 5.1 Insertion dans les programmes du Irstea

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet de l'UR RiverLy sur l'axe « Flux et mécanismes de transfert ». Cette approche peut s'articuler avec les travaux d'André Paquier et Jean-Baptiste Faure sur la modélisation hydrosédimentaire unidimensionnelle des rivières (thèses de P. Balayn, S.R. Khodashenas, K. El kadi Abderrezzak, M. Jodeau, C. Béraud et L. Guertault), de Jérôme Le Coz pour la mesure acoustique du flux de MES (thèses de S. Moore, A. Vergne, et G. Dramais) et les travaux expérimentaux de laboratoire en lits composés (Sébastien Proust, thèses de V. Dupuis et M. Oukacine) et avec transport solide multi-classe (Céline Berni, thèse d'E. Perret). Ces travaux se situent

bien sûr dans la directe continuité des études réalisées sur le site Arc-Isère (thèses de M. Jodeau, M. Jaballah, et G. Antoine).

En terme de modélisation numérique, le doctorant sera impliqué dans le développement des logiciels RubarBE et surtout Adis-TS.

## **5.2 Partenariat et encadrement**

La thèse s'effectuera en collaboration entre EDF et Irstea. Le financement de la bourse de thèse sera partagé entre EDF et le Irstea (accord cadre EDF-Irstea). Le demi-financement côté EDF se fera via le CIH et des expertise proposées sur le suivi et l'étude des chasses de l'Arc et de l'Isère.

L'encadrement et la direction de thèse sera assurée par B. Camenen (HDR, Irstea HHLY) avec une inscription à l'Université de Lyon, Ecole Doctorale MEGA, spécialité mécanique des fluides .

Le comité de thèse inclura Lionel Pénard (Irstea Lyon), Magali Jodeau (EDF, LNHE), Guido Zolezzi (Université de Trente, Italie), Alain Recking (Irstea Grenoble), Cédric Legout (IGE, Grenoble), Eric Valette (EDF-CIH), et Christophe Dal'Osto (SISARC).

Des échanges méthodologiques et scientifiques pourront être effectués avec les équipes Hydrimz d'IGE, EDF (CIH, DTG et LNHE) et Irstea Grenoble à l'occasion d'un projet ANR (appel d'offre 2018). Le(a) candidat(e) sera encouragé à se familiariser avec le terrain en participant à des mesures en collaboration avec ces partenaires.

Des échanges avec le SISARC seront aussi nécessaires afin de pouvoir utiliser les données et modèles acquis par le syndicat de rivière, avec en particulier les données et suivis des travaux de restauration des bancs de l'Isère dans la Combe de Savoie

## **6. Références**

### **6.1 Références de l'équipe**

- Antoine G. (2013). Dynamique des matériaux en suspension le long de rivières aménagées de montagne. Exemple de l'Arc en Maurienne et de l'Isère. PhD thesis, Université de Grenoble, France, 282 p.
- Antoine G., Jodeau M., Camenen B., Esteves M., Nemery J. & Lauters F. (2013). Estimation des flux de matières en suspension lors des chasses hydrauliques de l'Arc de 2006 à 2011. *La Houille Blanche*, 4:43-49.
- Balayn, P., Paquier, A. & Lapuszek, M. (2003). 1-D sediment transport model: representation of mixtures and calibration, in proceedings of the XXX<sup>th</sup> IAHR congress, Thessalonique, GRC, 24-29 August 2003, pp. 557-564.
- Caillaud R. (2013). Modélisation hydrosédimentaire de la dynamique des matières en suspension dans l'Arc et l'Isère. Stage fin étude ingénieur, Centrale Lyon.
- Camenen B., (2007). A simple formula for the settling velocity of particles, *J. of Hydraulic Eng.*, 133(2), 229-233,
- Camenen B. (2012). Discussion of "Understanding the influence of slope on the threshold of coarse grain motion: Revisiting critical stream power" by C. Parker, N.J. Clifford, & C.R. Thorne. *Geomorphology* 139-140: 34-38.
- Camenen B., Bayram A. & Larson M. (2006). Equivalent roughness height for plane bed under steady flow, *J. of Hydraulic Eng.*, 132(11), 1146-1158,
- Camenen B., Jodeau M. & Jaballah M. (2013). Estimate of fine sediment deposit dynamics over a gravel bar using photography analysis. *Int. J. of Sediment Res.* 28(2): 220-233.
- Camenen B., Jodeau M. & Le Coz J. (2008). Modélisation du flux sédimentaire pendant une chasse hydraulique (Arc en Maurienne), *La Houille Blanche* (4) 83-89.
- Camenen B. & Larson M. (2005) A bed-load transport formula for the nearshore, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, (63) 249-260.
- Camenen, B., Perret, E., Herrero, A., Berni, C., Thollet, F., Buffet, A., Dramais, G., Le Bescond C., & Lagouy M. (2016). Estimation of the volume of a fine sediment deposit over a gravel bar during a flushing event. *Proc. River Flow conference*, St Louis, Missouri, USA, July 2016, CDRom, pp. 533-540.
- Cordier, F., Tassi, P., Jodeau, M., & Camenen B. (2016). Large-scale morphodynamics structures in the Arc en Maurienne River (France). *Proc. River Flow conference*, St Louis, Missouri, USA, July 2016, CDRom.

- Dugué V. (2009). Modélisation morphodynamique d'une rivière de montagne : l'Arc en Maurienne. Stage fin étude ingénieur / Master 2, ENSEEIHT, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Eldin C. (2012). Les bancs de graviers de l'Arc en Maurienne : Constitution d'une base de données et analyse de l'évolution des bancs de graviers à partir d'un levé Lidar et de données image. Master 2, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne.
- El kadi Abderrezzak, K., (2006). Evolution d'un lit de rivière en fonction des apports. Thèse de Mécanique à l'Université Claude Bernard Lyon 1.
- El kadi Abderrezzak, K., Paquier, A. & Gay, A., 2008. One-dimensional numerical modelling of dam-break waves over movable beds: application to experimental and field cases. *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 8, p. 169-198.
- Guertault, L., Camenen B., Peteuil, C., Paquier, A. (2014). Long term evolution of a dam reservoir subjected to regular flushing events. *Advances in Geosciences* 39: 89-94.
- Guertault, L., Camenen B., Peteuil, C., Paquier, A. (2016). One-dimensional modelling of suspended sediment dynamics in dam reservoirs. *J. Hydraulic Eng.* 04016033:1-9.
- Jaballah M. (2013). Alternate bar morphodynamics in an engineered mountainous river [Morphodynamique des bancs alternés d'une rivière de montagne aménagée], PhD thesis, Université C. Bernard, Lyon, France, 196 p. (en anglais).
- Jaballah, M., Camenen, B. & Paquier, A. (2015). Alternate bar development in an alpine river following engineering works. *Advance in Water Res.* 81:103-113.
- Jodeau, M. (2007). Morphodynamique d'un banc de galets en rivière aménagée lors de crues. Thèse de Mécanique à l'Université Claude Bernard Lyon 1.
- Jodeau M., Hauet A., Paquier A., Le Coz J. & Dramais G. (2008). Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(2): 117-127.
- Launay, M., Le Coz, J., Angot, H., Dramais, G., Andriès, E., Camenen, B., & Coquery M. (2015). Numerical and physical simulation of soluble contaminant transport through complex large river systems. *J. Hydro-engineering Res.* 9:120-132.
- Lauters, F., Laperrousaz, E., Camenen, B., Le Coz, J., Thollet, F., Némery, J., & de Linares, M. (2012). Vers une gestion sédimentaire durable de l'aménagement hydro-électrique Arc-Isère, *La Houille Blanche*, 1:19-25.
- Paquier, A. (2003). Aperçu sur le transport de sédiments en rivière. Application à l'Arc. *Académie d'Agriculture de France*, 89(3): 10.
- Paquier, A. & Khodashenas, S.R. (2002). River bed deformation calculated from boundary shear stress. *Journal of Hydraulic Research*, 40(5): 603-609.
- Pénard, L. & Morel, M. (2012). Automatic detection of gravel bars in a river channel from airborne LiDAR-derived DTM. *HIC - 10th International Conference on Hydroinformatics*, Juil. 2012, Hambourg, Allemagne. 8 p.
- Perret, E., Herrero, A., Berni, C., El kadi Abderrezzak, K. & Camenen, B. (2015), Incipient motion of a bimodal mixture of gravel and silt: a laboratory experimental study. *Proc. 36th IAHR Congress*, 8p.
- Perret, E. (2017). Transport of moderately sorted gravels at low bed shear stresses : impact of bed arrangement and fine sediment infiltration. Université Claude Bernard, Lyon 1, 373p.
- Ramez, P. (2005). Formation de bancs dans un lit endigué. *Partie 1 : théorie. Houille Blanche*, vol. 6, p. 20 - 28
- Ramez, P. (2005). Formation de bancs dans un lit rectiligne. *Partie 2 : calage et application . Houille Blanche*, vol. 6, p. 29 - 37
- Ramez, P. & Paquier, A. (2004). Morphologie des rivières à gravier pavées avec berges érodables. *Partie 1 : valorisation d'expériences de laboratoire. Houille Blanche* (5): 101-106.
- Ramez, P. & Paquier, A. (2004). Morphologie des rivières à gravier pavées avec berges végétalisées. *Partie 2 : validation sur des mesures in situ. Houille Blanche* (5): 107-114.

## 6.2 Références externes sur le sujet

- Allain-Jegou C. (2002). Relations végétation-écoulement-transport solide dans le lit des rivières - Etude de l'Isère dans le Grésivaudan. PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France.
- Artelia Eau et Environnement (2013). Evolution du lit de l'Isère: Synthèse diagnostique, contribution à l'élaboration d'un plan de gestion et accompagnement des acteurs locaux; Volet 1: Etude globale pour la gestion du transport solide Dreal Rhône - Agence de l'Eau RMC

- Bartholdy, J. & Billi, P. (2002). Morphodynamics of a gravel bar reach. *Geomorphology*, 42: 293-310.
- Brandt, S. (1999). Sedimentological and geomorphological effects of reservoir flushing : The Cachi reservoir, Costa Rica, 1996. *Geografiska Annaler A*, 81:391-407.
- Brandt, S. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40: 375-401.
- Brandt, S. (2005). Conceptualization of hydraulic and sedimentary processes in downstream reaches during flushing of reservoirs. In proceedings of the XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea, 2577-2588.
- Crosato A. & Mosselman E. (2009). Simple physics-based predictor for the number of river bars and the transition between meandering and braiding. *Water Resour. Res* 45(W03424):1-14.
- Diplas, P. & Parker, G. (1992). Deposition and removal of fines in gravel-bed streams. In Billi, P., Hey, R., Thorne, C. et Tacconi, P., éditeurs : *Dynamics of gravel bed rivers*, 313-329. Wiley & Sons. 11
- Droppo, I. G., D'Andrea, L., Krishnappan, B. G., Jaskot, C., Trapp, B., Basuvara, M. & Liss, S. N. (2015). Fine-sediment dynamics: towards an improved understanding of sediment erosion and transport *J. Soils & Sediments*, 15: 467-479.
- Dufour, S., Barsoum, N., Muller, E. & Piégay, H. (2007). Effects of channel confinement on pioneer woody vegetation structure, composition and diversity along the River Drôme (SE France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (8): 1244-1256
- EdF (2002). Note de synthèse « chasses et curages de l'Arc », perspectives EdF. Rapport EdF.
- Edwards, P., Kollmann, J., Gurnell, A., Petts, G., Tockner, K. & Ward, J. (1999). A conceptual model of vegetation dynamics on gravel bars of a large alpine river. *Wetlands Ecology and Management*, 7:141-153.
- Fasolato, G., Ronco, P., & Tregnaghi, M. (2006). Morphodynamics of mountain rivers following repeated sediment release from reservoirs. In *River Flow 2006*, 1329-1336.
- Gilvear, D., Francis, R., Willby, N. et Gurnell, A. (2005). Gravel bars : a key habitat of gravel bed rivers for vegetation. In *Gravel bed rivers 6*. 12 p.
- Gilvear, D. & Willby, N. (2006). Channel dynamics and geomorphic variability as controls on gravel bar vegetation, River Tummel, *Scotland River Res. and Applications*, 22:457-474.
- Grabowski, R. C., Droppo, I. G. & Wharton, G. Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties *Earth-Science Reviews*, 2011, 105, 101-120.
- Gregory, K. (2006). The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79:172-191.
- Hydratec & Irstea. (1999). Etude hydraulique de l'Arc de Maurienne (de Modane à l'Isère), *Morphologie du lit de l'Arc*. Rapport.
- Jaeggi, M. (1984). Formation and effects of alternate bars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110:142-156.
- Jang, C. J. & Shimizu, Y. (2007). Vegetation effects on the morphological behavior of alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research*, 45 (6): 763-772.
- Jourdain C. (2017). Les interactions entre le transport sédimentaire, l'hydrologie et la végétation dans la capacité d'auto-entretien d'un lit de rivière. Université de Grenoble, France
- Kondolf, G. (1997). Hungry water : Effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21:533-551.
- Krone, R. (1962). "Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes." Final Rep., Univ. of California, Berkeley, CA.
- Langlade, L.-R. & Décamp, O. (1995). Accumulation de limon et colonisation végétale d'un banc de galets. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences Paris, Science de la vie*, 318:1073-1082.
- Lisle, T., Ikeda, H., & Iseya, F. (1991). Formation of stationary alternate bars in a steep channel with mixed-size sediment: a flume experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16:463-469.
- Marnezy A. (1999). L'Arc et sa vallée ; anthropisation et géodynamique d'une rivière alpine dans son bassin versant. Thèse de doctorat à l'université Joseph Fourier Grenoble I.
- Martin-Vide, J. , (2001). Restoration of an urban river in Barcelona, Spain. *Environmental Engineering Policy*, 2:113-119.
- Marttila, H. & Klove, B. (2014). Storage, properties and seasonal variations in fine-grained bed sediment within the main channel and headwaters of the River Sanginjoki, Finland *Hydrological Processes*, 28: 4756-4765
- Moulin, B. (2005). Variabilité spatiale et temporelle du bois mort dans le réseau hydrographique de l'Isère à l'amont de Grenoble. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, St Etienne, France.
- Mürle, U., Ortlepp, J., & Zahner, M., 2003. Effects of experimental flooding on riverine morphology, structure and riparian vegetation: the River Spöl, Swiss National Park. *Aquatic Science*, 65:191-198.
- Partheniades, E. (1962). – A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water. Ph.D thesis, University of California, Berkeley, 182 p.
- Piégay, H. (2005). Editorial : sediment management in river systems : a need to assess changing processes in the long term and at a large scale. *River Research and Applications*, 21:689-691.

- Poirel, A. (2001). la gestion des sédiments par chasse (1) : retour d'expérience sur quelques aménagement hydrauliques alpins. *La Houille Blanche*, 6-7:55-61.
- Rathburn, S. & Wohl, E. (2003). Predicting fine sediment dynamics along a pool riffle mountain channel. *Geomorphology*, 55:111-124.
- Rodrigues, S., Bréhéret, J. G., Moatar, F. & Macaire, J.-J. (2005) Impact des crues sur des bilans sédimentaires de chenaux secondaires de la Loire moyenne. *Géomatériaux (Sédimentologie)*, 337 : 487-495
- Salant, N. L., Hassan, M. A. & Alonso, C. V. (2008). Suspended sediment dynamics at high and low storm flows in two small watersheds *Hydrological Processes*, 22: 1573-1587.
- Surian, N. (1999). Channel changes due to river regulation : the case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24:1135-1151.
- van Oorschot, M., Kleinhans, M. G., Geerling, G. W., Egger, G., Leuven, R. S. E. W. & Middelkoop, H. (2017). Modeling invasive alien plant species in river systems: interaction with native ecosystem engineers and effects on hydro-morphodynamic processes. *Water Resources Research* (in press).
- Ziegler, C. & Nisbet, B. (1994). Fine-grained sediment transport in Pawtuxet river, Rhode Island. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120:561-575.
- Zolezzi G, Luchi R, Tubino M. (2009). Morphodynamic regime of gravel bed, single thread meandering rivers. *J Geophys Res.* 114(F01005):1-14.
- Zolezzi G, Seminara G. (2001). Downstream and upstream influence in river meandering. Part 1. General theory and application to overdeepening. *J.Fluid Mech.* 438:183-211.