

**Projet ANR-18-CE01-0019-01**

**DEAR (Deposition and erosion of fine  
sediments in Alpine Rivers)**

Programme Milieux et biodiversité : Terre fluide et solide 2018

<b>A</b>	<b>IDENTIFICATION.....</b>	<b>3</b>
<b>B</b>	<b>RESUME CONSOLIDE PUBLIC .....</b>	<b>3</b>
	<b>B.1 Résumé consolidé public en français .....</b>	<b>3</b>
	Dynamique des sédiments fins dans les rivières alpines	3
	B.1.1 Compréhension des érosions et dépôts de sédiments fins et leur liens avec la végétation pionnière dans les rivières alpines	3
	B.1.2 Outils et méthodes utilisés lors du projet DEAR	4
	B.1.3 Résultats majeurs du projet	4
	B.1.4 Production scientifique	4
	B.1.5 Illustration	4
	B.1.6 Information factuelles	5
	<b>B.2 Consolidated public summary in English .....</b>	<b>5</b>
	Fine sediment dynamics in Alpine rivers	5
	B.2.1 Understanding the erosion and deposition of fine sediments and their links with pioneer vegetation in Alpine Rivers	5
	B.2.2 Tools and methods used during the DEAR project	5
	B.2.3 Main results of the DEAR project	5
	B.2.4 Scientific production	6
	B.2.5 Illustration	6
	B.2.6 Factual information	6
<b>C</b>	<b>MEMOIRE SCIENTIFIQUE.....</b>	<b>6</b>
	C.1 Résumé du mémoire .....	6
	C.2 Enjeux et problématique, état de l'art .....	7
	C.3 Approche scientifique et technique.....	8
	<b>C.4 Résultats obtenus .....</b>	<b>9</b>
	C.4.1 Sources de sédiments fins	9
	C.4.2 Mesures des flux	10
	C.4.3 Interaction fines-graviers	11
	C.4.4 Méthodes pour caractériser et suivre l'évolution des bancs	11
	C.4.5 Modélisation des flux	12
	C.4.6 Mesures de restauration	12
	C.5 Discussion .....	13
	C.6 Conclusions.....	13

C.7	Références.....	13
D	LISTE DES LIVRABLES.....	14
D.1	Manuscrits de thèse .....	15
D.2	Rapports de stage.....	16
E	IMPACT DU PROJET .....	17
E.1	Indicateurs d'impact .....	17
E.2	Liste des publications et communications .....	18
E.2.1	Revue à comité de lecture (international)	18
E.2.2	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage (international)	19
E.2.3	Communications (conférence internationale)	19
E.2.4	Revue à comité de lecture (France)	20
E.2.5	Communications (conférence France)	21
E.2.6	Autres actions de diffusion (rapports)	21
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	21
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) .....	23

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	DEAR
Titre du projet	Deposition and Erosion of fine sediments in Alpine Rivers
Coordinateur du projet (société/organisme)	Benoît Camenen, INRAE
Période du projet (date de début – date de fin)	01/01/2019 30/06/2023
Site web du projet, le cas échéant	<a href="https://dear.inrae.fr/">https://dear.inrae.fr/</a>

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	M. Benoît Camenen
Téléphone	04 72 20 86 07 / 06 88 32 78 50
Adresse électronique	<a href="mailto:benoit.camenen@inrae.fr">benoit.camenen@inrae.fr</a>
Date de rédaction	Mai 2023

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	IGE, Cédric Legoût EDF (CIH, LNHE), Magali Jodeau
---	--

## B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

### B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

#### DYNAMIQUE DES SEDIMENTS FINS DANS LES RIVIERES ALPINES

##### B.1.1 COMPREHENSION DES EROSIONS ET DEPOTS DE SEDIMENTS FINS ET LEUR LIENS AVEC LA VEGETATION PIONNIERE DANS LES RIVIERES ALPINES

Les rivières alpines à graviers contraintes par des digues latérales sont caractérisées par des systèmes de bancs alternés et un transport solide élevé allant des graviers aux argiles. Du fait des activités anthropiques sur les bassins versants (restauration des terrains en montagne) et le long des cours d'eau (endiguement, barrage, extractions), on observe aujourd'hui un manque d'apport de graviers alors que les classes les plus fines sont peu impactées. Ce déséquilibre aboutit souvent à une érosion du chenal principal et une fixation des bancs de graviers où des dépôts massifs de sédiments fins sont associés à une colonisation par la végétation riparienne. Ce processus souvent irréversible réduit fortement la qualité des habitats et accroît le risque inondation. L'objectif principal de ce projet est donc de mieux comprendre la dynamique des sédiments fins dans les rivières alpines en fonction des forçages hydro-sédimentaires (crue, fonte de printemps, chasse) et leurs interactions avec les bancs de galets et la végétation afin de pouvoir donner des clés pour limiter les dépôts de fines et la croissance de la végétation pionnière, et ainsi aider à la gestion hydro-sédimentaire de ces cours d'eau.

### B.1.2 OUTILS ET METHODES UTILISES LORS DU PROJET DEAR

Les actions du projet DEAR se déclinent sur trois échelles d'espace en combinant expérimentations de laboratoire, de terrain et modélisation numérique. A l'échelle métrique, l'étude s'est focalisée sur les seuils critiques d'érosion en lien avec les propriétés du sol à l'aide de placettes et d'érodimètres. A l'échelle du banc, de nombreux travaux ont permis de caractériser *i)* les stocks de fines en combinant méthodologies de terrain et analyse spatiale, *ii)* la dynamique des dépôts sur les bancs de galets par analyse d'image et par analyse numérique bi-dimensionnelle. Les expérimentations de laboratoire ont aidé à la compréhension de la formation des bancs et des dépôts de sédiments fins. Des avancées sur la modélisation numérique bi-dimensionnelle ont été réalisées pour la modélisation des dépôts de sédiments fins et du développement de la végétation pionnière et de son interaction avec la dynamique des bancs. Enfin, à l'échelle de l'ensemble de la rivière, la mesure des flux combinée à une modélisation numérique uni-dimensionnelle a permis de mieux appréhender la dynamique globale de ces sédiments fins transportés en suspension le long d'un système alpin, en distinguant argiles et limons et sables.

### B.1.3 RESULTATS MAJEURS DU PROJET

Les résultats du projet présentés lors de la restitution en octobre 2022 aux différents acteurs des sites étudiés incluent une meilleure compréhension qualitative et quantitative de la dynamique des sédiments fins dans les rivières alpines. Plusieurs outils expérimentaux (mesures d'érosion, des surfaces de dépôts par analyse d'image) et numériques (modèles hydro-sédimentaires 1D et 2D) sont aujourd'hui disponibles pour la communauté scientifique et opérationnelle. Des développements expérimentaux pour la mesure des sables et numériques pour les interaction fins-grossiers sont en cours suite à ce projet.

### B.1.4 PRODUCTION SCIENTIFIQUE

La production scientifique depuis le début du projet est principalement liée aux cinq projets de thèse et trois postdoctorats associés. Cela inclut à la fin de ce projet 17 articles dans des journaux internationaux et 20 articles dans des conférences internationales.

### B.1.5 ILLUSTRATION



Dépôt de sédiments fins typique sur un banc de galets suite à une chasse de barrage

### B.1.6 INFORMATION FACTUELLES

Le projet DEAR (Deposition and erosion of fine sediments in Alpine Rivers) est un projet de recherche coordonné par Benoît Camenen (INRAE, centre de Lyon-Grenoble, UR RiverLy, Villeurbanne). Il associe aussi EDF (CIH, Bourget-du-Lac et LHNE, Chatou), ainsi que le laboratoire IGE (équipe Hydrimz, St-Martin-d'Hères) et l'UR ETNA d'INRAE, centre de Lyon-Grenoble, St-Martin-d'Hères). Le projet a commencé en janvier 2018 et a duré 54 mois (y compris une prolongation de 6 mois liée à la crise covid). Il a bénéficié d'une aide ANR de 451 000 € pour un coût global de l'ordre de 1 500 000 €.

## B.2 CONSOLIDATED PUBLIC SUMMARY IN ENGLISH

### FINE SEDIMENT DYNAMICS IN ALPINE RIVERS

#### B.2.1 UNDERSTANDING THE EROSION AND DEPOSITION OF FINE SEDIMENTS AND THEIR LINKS WITH PIONEER VEGETATION IN ALPINE RIVERS

Alpine gravel-bed Rivers constrained by lateral dykes are characterised by alternate bars associated with a high sediment transport with particles ranging from gravels to clay. Human activity in the catchment area and along the river led to a lack of gravel input, while the finer classes are little affected. This imbalance often results in erosion of the main channel and fixation of the gravel bars, where massive deposits of fine sediments can occur together with colonisation by the riparian vegetation. This process, often irreversible, reduces the habitat quality and increases the risk of flooding. The main aim of this project is therefore to better understand how the dynamics of fine sediments in Alpine rivers depends on the hydrosedimentary forcing factors (flooding, spring melt, dam flushing) and what are their interactions with gravel bars and vegetation. Then, our objective is to provide keys to river managers to limit fine sediment deposition and the growth of pioneer vegetation.

#### B.2.2 TOOLS AND METHODS USED DURING THE DEAR PROJECT

The DEAR project cover three spatial scales, combining laboratory and field experiments and numerical modelling. On a metric scale, the study focused on erosion thresholds in relation to soil properties, using reference patches and erodimeters. At the scale of the gravel bar, we characterised fine sediment stocks using a combination of field methods and spatial analysis, and their deposition over gravel bars using image analysis and two-dimensional numerical analysis. Laboratory experiments helped to understand the formation of gravel bars and fine sediment deposits. Two-dimensional numerical modelling also provided a better understanding of fine deposits and the development of pioneer vegetation and its interaction with the dynamics of gravel bars. Finally, on the scale of the whole river, sediment flux measurements combined with one-dimensional numerical modelling provided a better understanding of the overall dynamics of these fine sediments (clay, silt and sand) transported in suspension along an Alpine system.

#### B.2.3 MAIN RESULTS OF THE DEAR PROJECT

The results of the project, which were presented in October 2022 to the various stakeholders involved in the sites studied in the project, include a better qualitative and quantitative understanding of the dynamics of fine sediments in Alpine rivers. Several tools, experimental (measurements of erosion and surface area of fine sediment deposit using image analysis) and numerical (1D and 2D hydrosedimentary models), are now available to the scientific

community. Experimental developments for sand measurement and numerical developments for fine-coarse interaction are underway as a result of this project.

#### B.2.4 SCIENTIFIC PRODUCTION

Since the beginning of the project, the scientific output has been developed mainly related to the five Ph.D. thesis and three postdoctoral research activities. In June 2023, its outcome includes 17 articles published in international journals and 20 articles presented in international conferences.

#### B.2.5 ILLUSTRATION



Typical deposition of fine sediment on a sand/gravel bar after a dam flushing episode.

#### B.2.6 FACTUAL INFORMATION

The DEAR project (Deposition and erosion of fine sediments in Alpine Rivers) is a research project coordinated by Benoît Camenen (INRAE, centre of Lyon-Grenoble, UR RiverLy, Villeurbanne). It also involves EDF (CIH, Bourget-du-Lac et LHNE, Chatou), as well as the IGE laboratory (Hydrimz team, St-Martin-d'Hères) et l'UR ETNA d'INRAE, centre of Lyon-Grenoble, St-Martin-d'Hères). The project started in January 2018 and lasted 54 months (including an extension of 6 months due to the covid crisis). It received an ANR funding of 451 000 € for a total cost of around 1 500 000 €.

## C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

***Mémoire scientifique confidentiel*** : non

### C.1 RESUME DU MEMOIRE

Les rivières alpines à graviers contraintes par des digues latérales sont caractérisées par des systèmes de bancs alternés et un transport solide élevé allant des graviers aux argiles. Du fait des activités anthropiques sur les bassins versant et le long des cours d'eau, on observe aujourd'hui un manque d'apport de graviers alors que les classes les plus fines sont peu impactées. Ce déséquilibre aboutit souvent à une érosion de chenal principal et une fixation des bancs de graviers où des dépôts massifs de sédiments fins sont associés à une colonisation

par la végétation riparienne. Ce processus souvent irréversible réduit fortement la qualité des habitats et accroît le risque inondation. L'objectif principal de ce projet était donc de mieux comprendre la dynamique des sédiments fins dans les rivières alpines selon les forçages (crue, fonte de printemps, chasse) et leurs interactions avec les bancs de galets et la végétation afin de pouvoir donner des clés pour limiter les dépôts de fines et la croissance de la végétation pionnière et ainsi aider à la gestion hydro-sédimentaire de ces cours d'eau.

Les actions du projet DEAR se déclinent sur trois échelles d'espace en combinant expérimentations de laboratoire, de terrain et modélisation numérique. A l'échelle métrique, l'étude s'est focalisée sur les seuils d'érosion, en lien avec les propriétés du sol, à l'aide de placettes et d'érodimètres. A l'échelle du banc, de nombreux travaux ont permis de caractériser i) les stocks de fines en combinant méthodologies de terrain et analyse spatiale, ii) la dynamique des dépôts sur les bancs de galets par analyse d'image et par analyse numérique bi-dimensionnelle. Les expérimentations de laboratoire ont aidé à la compréhension de la formation des bancs et des dépôts de sédiments fins. La modélisation numérique bi-dimensionnelle a aussi permis une meilleure compréhension des dépôts de sédiments fins et du développement de la végétation pionnière et de son interaction avec la dynamique des bancs. Enfin, à l'échelle de l'ensemble de la rivière, la mesure des flux combinée à une modélisation numérique uni-dimensionnelle a permis de mieux appréhender la dynamique globale de ces sédiments fins transportés en suspension le long d'un système alpin.

Les résultats du projet présentés lors de la restitution en octobre 2022 aux différents acteurs des sites étudiés incluent une meilleure compréhension qualitative et quantitative de la dynamique des sédiments fins dans les rivières alpines. Plusieurs outils expérimentaux (mesures d'érosion, des surfaces de dépôts par analyse d'image) et numérique (modèles hydro-sédimentaires 1D et 2D) sont aujourd'hui disponibles pour la communauté scientifique. Des développements expérimentaux pour la mesure des sables et numériques pour les interaction fins-grossiers sont en cours pour donner suite à ce projet.

## **C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART**

Si les études à grande échelle peuvent aider à comprendre la dynamique globale des stocks de sédiments fins et leur interaction avec la morphologie du lit, il est nécessaire de mieux comprendre les processus élémentaires locaux, en particulier lorsqu'il s'agit de modèles numériques basés sur la physique. Les conditions de seuil pour le mouvement des particules et les flux solides sont difficiles à estimer pour les rivières à gravier car elles présentent souvent des distributions granulométriques étendues (Perret et al., 2022). Cette connaissance fine de la dynamique du lit est cruciale pour les études sur l'habitat du poisson et les projets de restauration du transport des sédiments (injection sédimentaire, chasse de barrage, l'arasement de seuils/barrages, voir Wood et Armitage, 1997). Pour les sédiments fins, il existe une grande variabilité spatiale de la distribution de la taille des grains, qui reste difficile à évaluer en particulier pour la fraction sableuse (Gray & Gartner, 2009). En effet, la granulométrie varie à la fois verticalement (entre les dépôts de surface et les particules infiltrées) et longitudinalement (de la tête à la queue d'un banc, canaux secondaires, zones végétalisées, etc.). Les effets de la cohésion peuvent affecter de manière significative l'érodabilité des sédiments, tandis que la teneur en matières organiques influence les caractéristiques de floculation, et donc les flux de décantation (Wendling et al, 2016). Pour pouvoir mieux évaluer les principaux processus de sédimentation qui se produisent sur le terrain, il est fondamental de caractériser les principaux paramètres impliqués tels que la

distribution granulométrique, le taux d'érosion ou la vitesse de sédimentation (Vercruyssen et al., 2017).

En parallèle, un des principaux enjeux de la modélisation numérique reste les échanges de sédiments fins entre la colonne d'eau et le lit (Mooneyham & Strom, 2018), notamment pour les sables. Le rapport de taille entre les sédiments fins et les graviers formant la matrice est souvent utilisé pour déterminer l'évolution de l'infiltration et du colmatage (Gibson et al., 2010). Ainsi, les propriétés des couches du substrat changent (porosité, perméabilité, conductivité hydraulique, conditions de seuil pour le mouvement naissant ; Nunez-Gonzalez, 2016, Perret et al. 2018) et peuvent ainsi fortement impacter la dynamique sédimentaire et la morphologie des formes sédimentaires (Gupta et al., 2022).

L'estimation des flux de sédiments fins avec incertitude dans les rivières alpines s'est considérablement améliorée depuis les années 2000 grâce à des méthodes indirectes telles que la turbidité (Navratil et al., 2011). Les flux de sable restent souvent non mesurés et négligés alors qu'ils peuvent représenter une part importante de la charge (Wright et al., 2010). D'autres méthodes d'évaluation des bilans de sédiments fins totaux sont nécessaires, basées sur des SIG (Système d'Information Géographique) et des mesures de terrain. En effet, les sédiments fins stockés dans le lit de la rivière jouent un rôle important, en tant que composante de stockage, dans les bilans de sédiments fins (Collins & Walling, 2007 ; Navratil et al., 2010 ; Marttila & Klove, 2014 ; Misset et al., 2021) y compris pour les sables (Navratil et al., 2010 ; Deng et al., 2023). De plus, les différents processus physiques conduisant à l'érosion ou au dépôt de sédiments fins sur les bancs de graviers (équilibre de la suspension, resuspension due à l'érosion des berges et au charriage) et leur importance en termes de bilan sédimentaire sont mal connus.

Les systèmes fluviaux alpins typiquement encaissés tendent à évoluer vers une configuration d'équilibre de bancs alternés nus et migrants (Crosato & Mosselman, 2009, Jaballah et al., 2015). Ensuite, si le système est également impacté par une régulation du débit et/ou un manque d'apport sédimentaire (dû aux gravières par exemple), il peut évoluer vers une configuration d'équilibre moins dynamique caractérisée par des bancs végétalisés plus grands et moins mobiles (Serlet et al., 2018 ; Jourdain et al., 2020). Une question importante est de comprendre comment la morphologie de la rivière affecte le transfert de sédiments fins en fonction à la fois de la bathymétrie et de la rugosité du lit (frottement de fond ou traînée due aux arbres, Dupuis et al., 2016). Les effets de la géométrie (Juez et al., 2018), des crues et apports en sédiments sur la dynamique des sédiments fins n'ont été que rarement étudiés dans des conditions simplifiées. L'effet de la macro-rugosité de la végétation sur la dynamique de suspension a été étudié autour de patches (Zong & Nepf, 2010) mais il manque encore des informations sur le taux de sédimentation et la remobilisation des sédiments dans les zones végétalisées (Allain-Jegou, 2002 ; Le Bouteiller & Venditti, 2014, 2015).

Il n'existe pas d'étude intégrée basée sur des mesures et des modélisations de pointe pour étudier comment le rôle des mécanismes locaux affecte le transfert, le dépôt et l'érosion des sédiments fins à l'échelle du bief et, à long terme, l'évolution morphologique d'un cours d'eau.

### **C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE**

Au cours du projet DEAR, les processus associés aux sédiments fins ont été étudiés par la combinaison d'expériences en laboratoire, de mesures sur le terrain et de modélisation numérique à trois échelles spatiales et temporelles complémentaires : (i) l'échelle locale (~mètres) et instantanée (~secondes), (ii) l'échelle du tronçon (~kilomètres) sur des périodes à l'échelle de l'événement (~jours à mois), et (iii) l'échelle de la rivière (~100km) sur des périodes

à long terme (décennies). La considération de ces trois échelles spatiales et temporelles avait pour objectif de mieux comprendre les processus locaux et leur impact sur les grandes échelles, et inversement de mieux évaluer les effets des grandes échelles sur la dynamique locale.

Deux sites ont été choisis pour des expériences sur le terrain car ils représentent des configurations typiques de rivières alpines, soit avec un niveau élevé d'anthropisation et de nombreux problèmes liés à la dynamique des sédiments fins (système Arc-Isère) ou, au contraire, tout à fait naturel (Galabre). Le réseau hydrographique Arc-Isère présente plusieurs formes typiques de bancs de graviers alternés et certains d'entre eux sont recouverts de sédiments fins et de végétation les stabilisant. De nombreux travaux d'ingénierie en particulier sur l'Isère ont ainsi été nécessaires pour gérer le transport des sédiments et le développement de la végétation, et pour réduire le risque d'inondation. Les rivières Arc-Isère constituent un site de référence de la ZABR (Zone Atelier du Bassin du Rhône) qui est suivi depuis plus de 15 ans (Némery et al., 2013). L'hydrologie spécifique du système Arc-Isère a permis dans le cadre de ce projet d'organiser des expériences intensives sur le terrain d'une part grâce aux chasses de barrage programmées régulièrement et d'autre part du fait de la fonte nivale, permettant des campagnes de terrain au printemps. Le projet a aussi bénéficié des équipements de mesure de l'observatoire Draix-Bléone (site de l'infrastructure de recherche OZCAR, Observatoires de la Zone Critique Applications et Recherches), en particulier sur le Galabre. Ce site naturel a été très complémentaire pour décrire certains processus critiques tels que la remise en suspension des sédiments fins à partir de la matrice du lit, mais aussi pour évaluer l'impact de l'anthropisation sur la dynamique des sédiments fins. Sur ces sites expérimentaux, de nombreuses études ont été réalisées à l'échelle locale (mesures de l'érodabilité, mesures de granulométrie de surface et sub-surface focalisées sur la fraction fine, mesures de flux solides et de la courantologie) et à l'échelle du banc ou du tronçon (mesures des surfaces de dépôts et de zones végétalisées par analyse d'image, mesures des évolutions bathymétriques). Ces mesures ont ainsi directement permis de comprendre certains processus impactant la dynamique des sédiments fins comme le transport éolien (Deng et al., 2023b) mais ont aussi été très utiles pour le montage et le calage des modèles numériques.

En complément des mesures de terrain, des expériences de laboratoire ont été réalisées au laboratoire HHLab (INRAE RiverLy) pour la compréhension de la formation des bancs de galet (Thèse S. Gupta sur le canal à pente variable) et pour l'étude de la dynamique des dépôts lors d'un écoulement débordant (Stage de L. Boisson) avec des conditions maîtrisées (débit, apport solide, etc.)

Les développements numériques ont été réalisés à l'aide de logiciels numériques existants développés à INRAE (MAGE-ADISTS, cf. Guertault et al., 2016 ; Deng et al., 2023d) ou à EDF- (TELEMAC-MASCARET, cf. Li et al., 2023).

## **C.4 RESULTATS OBTENUS**

### **C.4.1 SOURCES DE SEDIMENTS FINS**

Un protocole de suivi de l'altération des marnes a été mis en place. Les suivis ont mis en évidence une grande variabilité temporelle, tant saisonnière qu'interannuelle, des exports sédimentaires (Ariagno et al., 2021). A l'échelle saisonnière, il existe un cycle d'hystérèse entre pluie et export sédimentaire qui suggère que les exports sont gouvernés par les intensités de pluie en début d'année, puis limités par la ressource en sédiments disponibles en fin d'année. A l'échelle interannuelle, le travail a montré que les exports sédimentaires annuels sont en premier lieu gouvernés par l'intensité des précipitations. Le second facteur de contrôle qui a

été mis en évidence est l'intensité de l'altération hivernale sous l'effet du processus de frost-cracking (Ariagno et al., 2023).

Les bilans sédimentaires réalisés entre les deux stations sur le site du Galabre montrent une saisonnalité marquée avec des périodes d'érosion et donc d'export en automne hiver pour des débits liquides élevés alors que du stockage semble avoir lieu en été lors d'évènements présentant des concentrations en MES très élevées. Cette tendance estivale au stockage de fines en été doit être confirmée pour un plus grand nombre d'évènements, ce nombre étant limité par la difficulté à mesurer correctement les gammes basses de débits liquides à la station aval. Il faudra aussi confirmer et éventuellement généraliser ce comportement sur d'autres bassins versants.

Il a également été mis en évidence que les mesures sismiques permettent une bonne estimation de l'énergie cinétique de la pluie, variable pertinente pour caractériser les processus d'érosion sur versant, en particulier le détachement de particules par la pluie (Bakker et al., 2022).

Une méthode d'échantillonnage des bancs intégrant une mesure complète de la granulométrie de l'échantillon et tout spécifiquement des sables a été développée (Deng et al., 2023c). Elle a permis de mettre en évidence que les stocks sont largement dominés par les sables (10 à 20% en masse) alors que les limons et argiles restent minoritaires (1-3% en masse). Aussi, si une variabilité locale peut apparaître, à l'échelle des rivières étudiées, il n'existe pas (ou très peu) de variabilité longitudinale (Deng et al., 2023d).

Les mesures réalisées sur les bancs ont montré une forte variabilité spatiale des contraintes critiques d'érosion et des taux d'érosion. Néanmoins, cette variabilité présente une organisation spatiale sous forme de transects perpendiculaires au lit mineur. L'humidité volumique des dépôts présente une corrélation significative avec leurs propriétés d'érosion qui reflète partiellement l'altitude des dépôts par rapport à la surface libre du lit mineur (Haddad et al., 2022).

Les appareils tels que le CSM ou l'EROMES permettant de multiplier le nombre de mesures in situ sont à privilégier pour bien caractériser la variabilité spatiale de l'érodibilité pour les dépôts de fines. Il serait intéressant de développer un système permettant la mesure d'érosion des fines sur une surface présentant des graviers. La mesure de l'humidité volumique des dépôts permet de définir les différentes zones de dépôts (saturée en eau, marginale et surfacique) où les mesures d'érodibilité doivent être effectuées.

#### C.4.2 MESURES DES FLUX

Un travail important autour de la mesure des flux de MES et de sables a été réalisé dans le cadre de ce projet. Concernant les MES, un réseau de mesure existe maintenant depuis plus de 20 ans permettant de discuter le bilan à l'échelle du bassin versant avec un flux moyen annuel à Grenoble autour de 1.5 Mt, et de suivre la dynamique des crues d'amont à l'aval. Un travail sur les incertitudes de mesure a aussi montré que les incertitudes sur les concentrations étaient d'au moins 20% pour un calage unique de la relation turbidité-concentration en MES. Il est par ailleurs fortement recommandé de vérifier cette relation turbidité-MES avec des prélèvements réalisés à chaque événement hydro-sédimentaire d'intérêt, idéalement avec un échantillonneur automatique asservi à la turbidité ou au niveau d'eau, ceci pour permettre le calage de relations spécifiques de chaque événement. Des méthodologies de calibration des turbidimètres ont été proposées pour une analyse systématique des flux de MES, y compris des sables (Camenen et al., 2023). Elles restent valables pour une hypothèse d'apports de qualité homogène (sources similaires) et d'un impact faible des débris végétaux sur la turbidité.

Enfin, de nombreux travaux ont aussi été réalisés pour évaluer directement les flux de sable en suspension avec :

- Une proposition de méthodologie pour l'optimisation des jaugeages solides avec divers préleveurs iso-cinétiques (US-P61, US-6, Bouteille de Delft ; Dramais et al., 2023)
- Des développements pour l'utilisation de la mesure acoustique (profileurs hydro-acoustiques horizontaux HADCP) afin d'établir une chronique continue des flux de sable en suspension et de leur granulométrie (thèse de J. Laible).

#### C.4.3 INTERACTION FINES-GRAVIERS

L'évolution de bancs de graviers a été reproduite sur des modèles physiques à échelle réduite. Alors que la forme des bancs est très bien reproduite d'une expérience à l'autre en présence de graviers seuls, l'introduction de sédiments fins semble perturber la stabilité du système et les géométries de bancs obtenues lors des différentes expériences similaires diffèrent. Des bancs libres peuvent apparaître et l'obtention d'un état stable est plus longue.

Une crue sans introduction de sédiments fins génère un aplatissement des bancs sous le pic de crue puis leur reformation lors de la décrue. L'évolution du système de bancs alternés sous une crue avec et sans sédiments en suspension a ensuite été étudiée. Il semblerait que la présence de sédiments fins en suspension ait une influence bien moindre que la modification de l'alimentation en sédiments grossiers. Par ailleurs, une modification, même relativement mineure, du forçage amont est bien plus impactante que le colmatage, même complet, du lit avant l'hydrogramme.

Les expériences de transport et de dépôt de sédiments fins sur un banc et/ou une plaine d'inondation ont mis en évidence deux mécanismes physiques principaux : (1) le transport diffusif dû aux structures turbulentes présentes à l'interface entre chenal principal et banc et/ou plaines d'inondation, qui est responsable de la formation de bourrelets proches de la berge du côté du banc ; (2) le transport advectif entre chenal principal et banc, qui est responsable de dépôts significatifs et étendus sur le banc. Le poids relatif de ces modes de transport varie le long du chenal, est fonction de l'importance de la crue (débit), et est évolutif au cours du temps. En effet, il y a une forte rétroaction des dépôts sur l'écoulement. Les dépôts de sédiments induisent notamment une variation des niveaux d'eau, une diminution des niveaux de turbulence entre chenal et banc, ainsi que la diminution des transferts advectifs entre chenal et banc. La prise en compte de cette dynamique spatio-temporelle et des phénomènes de rétroactions des dépôts sur l'écoulement complexifie la modélisation des dépôts.

#### C.4.4 METHODES POUR CARACTERISER ET SUIVRE L'EVOLUTION DES BANCS

Plusieurs méthodologies ont été mise en place dans le cadre du suivi des bancs de la Combe de Savoie : (1) Orthophotos et Lidar, (2) Placettes peintes, (3) Chaînes d'érosion, et (4) Carroyages. Ces méthodologies sont complémentaires en termes de résultats et peuvent servir d'exemple dans les choix des outils à mettre en place dans le cadre de suivis sur d'autres rivières en cours de restauration.

Des développements méthodologiques supplémentaires sont nécessaires en traitement d'image (analyse orthophotos et levés Lidar) pour automatiser de manière performante, et dans toutes circonstances, l'extraction des bancs. Même dans le cas relativement simple de rivières endiguées (case de l'Arc et Isère), il existe encore de nombreuses difficultés pour délimiter automatiquement les bancs autour de confluences, d'annexes fluviales végétalisées ou tout simplement pour exclure des chenaux secondaires en eau au moment de la mesure.

Une validation manuelle experte reste encore nécessaire. Cependant, une première base de données de bancs de graviers a pu être mise en place incluant une estimation des volumes ; des travaux sont toujours en cours pour estimer les liens entre ces caractéristiques physiques et la dynamique de ces bancs et/ou leur végétalisation.

#### C.4.5 MODELISATION DES FLUX

Un modèle numérique unidimensionnel de l'Arc et de l'Isère a pu être développé lors de ce projet et a permis de caractériser la dynamique des sédiments très fins (argiles et limons) et des sables sur l'Arc et l'Isère. Ainsi, si les bancs de l'Isère sont mis en eau pour des occurrences plus faibles que pour l'Arc permettant ainsi une reprise des stocks de surface plus aisée, les contraintes y restent trop faibles, même pour des occurrences rares, pour remettre en suspension les stocks de subsurface. Seul un sapement de berge (typiquement en amont des bancs) peut reprendre des stocks de subsurface (processus non pris en compte dans le modèle 1D). A l'inverse, sur l'Arc, des stocks de subsurface importants peuvent être remis en suspension lors de crues rares. Aussi, nous avons pu observer un équilibre rapide des stocks de sédiments très fins sur l'ensemble du système avec des échanges très faibles entre le lit et l'écoulement, négligeables par rapport au flux. Sur l'Isère, une tendance au dépôt apparaît, en particulier pour les sables. Une difficulté pour la simulation des sables reste la méconnaissance des conditions aux limites amont, due à l'absence de mesure en continu.

Des modèles hydro-morphodynamiques bidimensionnels développés sur des tronçons de rivière kilométriques ont permis d'améliorer notre compréhension des interactions et rétroactions complexes entre la dynamique des sédiments fins sur les bancs, les processus de charriage et de mobilité des bancs de graviers (Bel, 2020 ; Haddad, 2023), ainsi que la dynamique spatio-temporelle de la végétation (recrutement, croissance, mortalité ; Li et al., 2022, 2023). Les résultats obtenus avec ces types de modèles numériques démontrent ainsi leur capacité à être utilisés pour traiter des questions de recherche ou opérationnelles.

#### C.4.6 MESURES DE RESTAURATION

Les observations réalisées sur l'Isère en Combe de Savoie depuis les travaux de restauration de 2017 illustrent parfaitement la complexité des processus de transport solide et de croissance de la végétation, et permettent de décrire à travers ce cas d'étude à quel point un projet de restauration (défini par des objectifs, des suivis, des analyses...) doit s'appuyer sur des étapes itératives. Au début de chaque projet de restauration, il est nécessaire de bien clarifier les objectifs de gestion :

- Favoriser le renouvellement de la végétation et des habitats, ainsi que leur diversité,
- Limiter les exhaussements : pour des raisons environnementales, de sûreté.

Une fois les objectifs décrits de manière quantitative et qualitative, il convient de mettre en œuvre les protocoles de mesure nécessaires pour suivre la pérennité/l'évolution de cette restauration, et au besoin adapter dans un second temps les modes de gestion.

Un exemple qui peut être donné pour illustrer cette démarche d'adaptabilité, est le suivi et le contrôle du dépôt de sédiments fins sur les bancs de graviers de l'Isère en Combe de Savoie.

Par ailleurs, il faut noter que les objectifs peuvent entrer en conflit les uns avec les autres. En Combe de Savoie par exemple, le développement de la végétation est souhaité (objectif de favoriser la végétation pionnière) mais devra être contenu dans le temps (par l'érosion naturelle ou des travaux) pour ne pas entraîner d'effet peigne et de nouveaux dépôts massifs de sédiments fins lors des crues (objectifs de sûreté). D'où la nécessité d'un suivi conséquent,

les premières années après restauration pour bien comprendre les nouvelles dynamiques en jeu et adapter si besoin le suivi et la gestion aux nouvelles connaissances.

## C.5 DISCUSSION

Les objectifs initiaux de ce projet ont pour la majeure partie été réalisés même si toutes les publications envisagées ne sont pas encore finalisées. Plusieurs verrous restent à franchir sur la compréhension des échanges entre limons, sables et lit de graviers en particulier en phase de décrue où une partie de la fraction fine peut être capturée par les grossiers. La modélisation numérique de tels phénomènes où la porosité du lit peut varier en temps et en espace reste un défi. Expérimentalement, des efforts restent aussi nécessaires pour la mesure en continu des sables et graviers et ainsi mieux alimenter les modèles numériques. Enfin, les liens entre dépôts de fines et l'installation de la végétation restent encore méconnues et nécessitent encore des recherches.

## C.6 CONCLUSIONS

Le projet DEAR avait pour but de mieux comprendre les interactions entre les sédiments fins et les bancs de graviers non végétalisés et végétalisés.

Les interactions entre dépôts de fines et croissance de la végétation forment un important défi de recherche. En particulier, puisque la rétroaction se fait dans les deux sens (les dépôts peuvent influencer sur l'installation de la végétation et la végétation augmente le potentiel de dépôt) et que cette dynamique est aussi sensible au transport et dépôt des sédiments grossiers, il est difficile de dire si la stabilisation des bancs est d'abord due à un excès de dépôts de fines, à la croissance de la végétation pionnière, voire du fait d'une hydrologie trop faible pour maintenir un équilibre dynamique pour une configuration morphologique de rivière donnée (largeur, pente, contrainte latérale, apports solides, ...).

La construction de modèles numériques est envisageable mais il est nécessaire dans ce cas de disposer de données de calage nombreuses si l'on souhaite disposer de modèles numériques de qualité pour la compréhension des phénomènes voire pour la prédiction de scénarios hydrologiques et scénarios de gestion. Les phénomènes en jeu sont complexes, soumis à des variabilités spatiales et temporelles importantes. Il est donc nécessaire de réaliser un suivi spécifique à chaque site d'étude et cohérent avec les enjeux qui lui sont propres.

## C.7 REFERENCES

Les références en bleu sont du consortium ; les références directement liées au projet sont présentées en section E.2

- Allain-Jegou, C. (2002) PhD, univ. Grenoble 1  
Collins, A. L. & Walling, D. E. (2007). *River Res. Appl.* 23:429-450  
Crosato A. & Mosselman E. (2009). *Water Resour. Res.* 45(W03424): 1-14  
[Deng J. et al. \(2023d\). En révision à Environ. Fluid Mech.](#)  
[Dramais G. et al. \(2023\). Soumis à Environ. Fluid Mech.](#)  
[Dupuis, V. et al. \(2016\). Environ. Fluid Mech. \(1573-1510\): 1-21](#)  
Gibson S., et al. (2010). *J. Geotech. and Geo-environ. Eng.*, 136(2): 402-406  
Gray, J. R. & Gartner, J. W. (2009). *Water Resour. Res.*, 45: 1-20  
[Guertault, L. et al. \(2016\). J. Hydraulic Eng. 142\(10.1061\):1-9](#)  
[Jaballah, M. et al. \(2015\). Adv. Water Res. 81: 103-113](#)  
Jourdain C., et al. (2020). *Earth Surf. Proc. Land.* (10.1002/esp.4776)  
Juez, C. et al. (2018). *Earth Surf. Proc. Land.* 43: 271-284  
[Le Bouteiller, C. & Venditti, J.G. \(2014\). Geoph. Res. Let. 41 \(11\): 3876-3883](#)

Le Bouteiller, C. & Venditti, J.G. (2015). *Water Resour. Res.* 51 (4): 2901-2922  
 Marttila, H. & Klove, B. (2014). *Hydrol. Proc.* 28: 4756-4765  
 Misset, C. et al. (2019). *Earth Surf. Proc. Land.* 44: 1722-1733  
 Misset, C. et al. (2021). *Catena*, 196:104916.  
 Mooneyham, C. & Strom, K. (2018) *Water Resour. Res.* 54: 323-344  
 Navratil, O. et al. (2010). *Hydrol. Proc.* 24: 1318-1332  
 Navratil, O. et al. (2011). *J. Hydrology* 398: 246-259  
 Némery, J. et al. (2013). *Hydrol. Proc.* 27: 2498-2508  
 Nuñez-Gonzalez, F. (2016). *Water Resour. Res.* 52: 9306-9324  
 Perret E. et al. (2018). *Earth Surf. Proc. Land.* (10.1002/esp.4322)  
 Perret E. et al. (2022). *J. Hydraulic Eng.* (10.1061/JHEND8.HYENG-13101)  
 Serlet, A. et al. (2018). *Earth Surf. Proc. Land.* (10.1002/esp.4349)  
 Vercruyse, K. et al. (2017). *Earth-Science Rev.* 166: 38-52  
 Wendling, V. et al. (2016). *Catena*, 41: 66-72  
 Wood, P. & Armitage, P. (1997). *Environ. Manag.* 21: 203-2017  
 Wright, S. A. et al (2010). *Water Resour. Res.* 46(W10538): 1-18  
 Zong, L. & Nepf, H. (2010). *Geomor.* 116: 363-362

## D LISTE DES LIVRABLES

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
12/2021	111	Methodological guide for in-situ measurements of fine sediment characteristics in gravel bed river and impact on their sedimentation and erosion potential	Rapport	EDF (M. Jodeau), IGE	
	112	Data set on fine sediment characteristics in alpine rivers		INRAE (B. Camenen)	
	12	Report/publication on the total fine sediment flux in alpine rivers and its distribution between main and secondary channels.	Base données BDOH, thèse J. Deng	INRAE (B. Camenen), EDF, IGE	
	131	Report/publication on laboratory experiments on infiltration and exfiltration of fine particles in a gravel bed	Thèse S. Gupta	INRAE Lyon (C. Berni)	
	132	Report/publication 1DV modelling of the fine sediment dynamics from the gravel bed to the water column	-	EDF (K. El Kadi A.)	Action 1.3 réduite de fait d'une thèse Cifre non obtenue; livrable abandonné
07/2022	211	Report/publication on the effects of roughness on the deposit dynamics over floodplain using laboratory experiments	Rapport stage Boisson	INRAE (S. Proust)	
10/2022	212	Report/publication on the deposit dynamics over gravel bars using photo analysis and multiple in-situ measurements	Thèse Deng + articles Deng et al. (2023)	INRAE (B. Camenen)	
	221	Report/publication on the control of gravel bed mobility on the fine sediment trapping and fluxes (field experiments)		IGE (G. Nord), INRAE	
	222	Report/publication on fine sediment dynamics in an alternate bar system (laboratory experiments)	Thèse S. Gupta	INRAE (C. Berni)	

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
	231	Report on the construction and calibration of numerical models at the laboratory and field scales	Rapport Bell, theses Li et Haddad	EDF (P. Tassi, N. Claude)	
	232	Report on developments on source terms (implementation of fine sediment infiltration) in the numerical code TELEMAC-MASCARET (OpenSource)	Logiciel ( <a href="https://gitlab.pam-retd.fr/otm/telemac-mascaret/-/tree/vegetation">https://gitlab.pam-retd.fr/otm/telemac-mascaret/-/tree/vegetation</a> )	EDF (P. Tassi, N. Claude)	Action 2.3.2 réduite de fait d'une thèse Cifre non obtenue; partie des développements abandonné
	233	Report/publication on the impact of hydrology, sediment supply, bed morphology, and vegetation extend on the formation and erosion of deposits over gravel bars	Thèse Li	EDF (P. Tassi, N. Claude)	
06/2020	311	Report/publication on the analysis of the SSM dynamics along the Arc-Isère river system	Articles Antoine et al. (2020) et Thollet et al., (2021); Rapport De Keyser	IGE (J. Némrery), INRAE	
03/2020	312	Report on the technical tool APRIM to elaborate fine sediment budget	Rapports (Vergne, Bekale, Coutrix)	INRAE (L. Pénard)	
	313	Report/publication on the characterisation of gravel bar characteristics and dynamics using image analysis	Article Deng et al. (2023ab)	INRAE (L. Pénard)	
09/2020	32	Report/publication and computational tool on uncertainty analysis on fine sediment fluxes	Rapport Jouzeau	INRAE (J. Le Coz)	
10/2022	331	Report on developments of the numerical code Mage-AdisTS (OpenSource)	Thèse Deng	INRAE (B. Camenen)	
10/2022	332	Report/publication on the development, calibration and validation of AdisTS on event scale and long-term periods	Thèse Deng	INRAE (B. Camenen)	
12/2019	42	Website on the project including links to publications and data		INRAE (B. Camenen)	
06/2023	43	Methodological guide on river management to limit fine sediment deposits on gravel bars	Rapport	EDF (E. Valette), INRAE, IGE	

## D.1 MANUSCRITS DE THESE

- Ariagno, C. (2022). Suivi et modélisation de l'altération physique des marnes de Draix et de son impact sur l'érosion. Univ. Grenoble-Alpes / INRAE ; soutenue en déc. 2022 ;
- Deng, J. (2022). Dynamique des sédiments fins dans les systèmes de bancs de galets alternés d'une rivière de montagne aménagée. Univ. Lyon / INRAE; soutenue en nov. 2022;
- Gupta, S. (2023). Laboratory experiments on fine sediment erosion and deposition in an alternated bar system and its impact on bar morphodynamics. Univ. Lyon / INRAE; soutenance prévue en déc. 2023 ;

- Haddad, H. (2022). Dynamique des dépôts de sédiments cohésifs dans les rivières à graviers : approche combinant suivi in situ et modélisation numérique. Univ. Grenoble-Alpes / IGE, EDF ; soutenue en juin 2022 ;
- Li, J. (2022). Etude numérique de la biomorphodynamique des bancs alternés dans les rivières à graviers. Univ. Tours / EDF R&D; soutenue en nov. 2022.

## **D.2 RAPPORTS DE STAGE**

- Vassor, T. (2022). Quantification de la charge sableuse en suspension : élaboration d'une méthode de mesure combinant prélèvements et jaugeages. INRAE
- Pavaux, A. (2022). Quantification de la charge sableuse : comparaison de préleveurs et estimation des incertitudes de mesure de sable en suspension. Master1, INRAE
- Hérault, A. (2022). Impact de l'état initial d'un lit de gravier sur sa morphodynamique sous une crue. INRAE
- Dequatre, L. (2022). Évaluation de l'intérêt de combiner turbidimètres optique et acoustique dans la mesure des concentrations de matières en suspension en présence de sable. Master 2, ENSE3 Grenoble. IGE
- Safdar, S. (2021). Erosion et transfert de sédiments dans un bassin de méso-échelle. M2 Ecole Centrale Nantes. IGE
- Montariol, J. (2021). Création d'un modèle numérique hydrodynamique bidimensionnel d'un tronçon du Galabre. Master 2, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg. IGE
- Boisson, L. (2021). Transfert et dépôt de sédiments en suspension sur les plaines d'inondations : Étude en canal de laboratoire. Engineering school report, Polytech'Tours / INRAE.
- Piednoir, T. (2021). Evaluation du potentiel de reprise des stocks de sédiments fins dans une rivière alpine. Engineering school report, Polytech'Tours / INRAE.
- Coutrix, M. (2020). Extraction automatique à partir de données 3D par méthode de contours actifs : application aux bancs de alternés sur l'Arc et l'Isère. Master 2 report, University of Strasbourg / INRAE.
- Deville-Cavellin, L. (2020). Validation d'une mesure de la suspension de sable par pompage. Master 2 report, Toulouse III University / INRAE.
- Hosseinzadeh, A. (2020). Analysis of the relationships between discharge suspended solid concentration and turbidity for a wide variety of watersheds in OZCAR network, Master 2 report ENSE3, Grenoble / IGE.
- Jouzeau, P. (2020). Quantification des incertitudes sur les flux particulières dues aux courbes de tarage turbidité – MES. Master 1 report, Nice-Sophia Polytech / INRAE.
- Woelffl, T. (2020). Dynamique des sédiments fins en rivières alluviales : étude des propriétés d'érosion et de dépôt des sédiments fins du lit. Master 2 Sciences de l'Eau, Aix Marseille. IGE
- Bekale, R. (2019) Développement d'un module de segmentation de MNT Lidar et interfaçage avec QGIS. Master 2 report University of Bourgogne / INRAE.
- De Angelis, R. (2019). Validation d'une mesure de la suspension de sable par pompage. Engineering school report, ENSE3, Grenoble / INRAE.
- De Keyser, J. (2019) Sediment transport dynamics in an alpine river (Isère, France). Master 2 report, BOKU-Autriche / IGE.

Gupta, S. (2019). Estimation of the dynamics of suspended particles in Arc and Isère rivers using 1D numerical modelling. Master 2 ENSE3, Grenoble / INRAE.

Vergne, T. (2019). Segmentation automatique de bancs de sédiments dans un plugin QGIS pour la caractérisation de leur granulométrie de surface. Master 2 report, ENSICAEN / INRAE.

## E IMPACT DU PROJET

### E.1 INDICATEURS D'IMPACT

#### *Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)*

		Publications multipartenaires	Publications monopartentaires
International	Revue à comité de lecture	8	9
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	0	1
	Communications (conférence)	7	13
France	Revue à comité de lecture	1	0
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	0	0
	Communications (conférence)	2	6
Actions de diffusion	Articles vulgarisation	0	0
	Conférences vulgarisation	0	0
	Autres	0	3

#### *Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)*

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	0
Brevet internationaux en cours d'obtention	0
Brevets nationaux obtenus	0
Brevet nationaux en cours d'obtention	0
Licences d'exploitation (obtention / cession)	0
Créations d'entreprises ou essaimage	0
Nouveaux projets collaboratifs	0
Colloques scientifiques	1 (restitution projet, 13-14 oct. 2022)
Autres (préciser)	0

## E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Les publications mono-partenaires sont présentées en noir alors que les publications multipartenaires sont présentées en bleu. Sont indiqués en gras les personnes impliquées dans le projet ANR DEAR

### E.2.1 REVUES A COMITE DE LECTURE (INTERNATIONAL)

1. **Antoine, G., Camenen, B., Jodeau, M., Némery, J. & Esteves M.** (2020). Downstream erosion and deposition dynamics of fine suspended sediments due to dam flushing. *J. Hydrology*. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124763
2. **Thollet, F., Rousseau, C., Camenen B., Boubkraoui S., Branger, F., Lauters, F. & Némery J.** (2021). Long term high frequency sediment observatory in an alpine catchment (Arc-Isère Rivers, French Alps). *Hydrological Processes*, doi: 10.1002/hyp.14044
3. Perret, E., **Camenen, B., Berni, C., El kadi Abderrezzak, K. & B. Renard B.** (2022). Inception motion of cohesionless particles: an evaluation of the critical bed shear stress and its uncertainty. *Journal Hydraulic Engineering*, 149 (4-04023002): 1-14, doi: 10.1061/JHEND8.HYENG-13101
4. **Haddad, H., Jodeau, M., Legout, C., Antoine, G. & Droppo, I. G.** (2022). Spatial variability of the erodibility of fine sediments deposited in two alpine gravel-bed rivers: The Isère and Galabre. *Catena*, 2022, 212, 1-13, doi: 10.1016/j.catena.2022.106084
5. **Haddad H., Legout C. & Jodeau M.** (2023). Spatial variability of erodibility of fine sediments deposited in gravel river beds: from field measurements to 2D numerical models. *Journal of Soils and Sediments*, doi: 10.1007/s11368-023-03438-6
6. Laible, J., **Camenen, B., Le Coz, J., Pierrefeu, G., Lauters, F. & Dramais, G.** (2023). Comparison of grain size distribution measurements of sand-fine sediment mixtures using laser diffraction systems. *Journal Soils & Sediments*, 23: 2310-2325, doi: 10.1007/s11368-023-03470-6
7. **Deng, J., Camenen, B., Legout, C. & Nord, G.** (2023). Estimation of fine sediment stocks in alpine rivers including the sand fraction. *Sedimentology (sous presse)*, doi: 10.1111/sed.13132
8. **Camenen, B., Dramais, G., Laible, J., Le Coz, J., Lauters, F. & Pierrefeu, G.** (2023). Quantification of continuous sand flux time-series downstream of a dam during a flushing event. *Environmental Fluid Dynamics (accepté)*.
1. Perret, E., **Berni, C., & Camenen, B.** (2020) How does the bed surface impact low-magnitude bedload transport over gravel-bed rivers? *Earth Surface Processes & Landform*, 45(5):1181-1197. doi: 10.1002/esp.4792
2. **Ariagno, C., Le Bouteiller, C., van der Beek, P., and Klotz, S.** (2021). Sediment export in marly badland catchments modulated by frost-cracking intensity, Draix-Bléone Critical Zone Observatory, SE France, *Earth Surf. Dynam.* doi: 10.5194/esurf-2021-49
3. **Bakker, M., Legout, C., Gimbert, F., Nord, G., Boudevillain, B. & Freche, G.** (2022). Seismic modelling and observations of rainfall. *Journal of Hydrology* 610 (127812): 1-16, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127812
4. **Li, J., Claude, N., Tassi, P., Cordier, F., Crosato, A. & Rodrigues S.** (2022). Effects of vegetation patch patterns on channel morphology: A numerical study. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 127(5). doi: 10.1029/2021JF006529

5. **Deng, J., Pénard, L., Depret, T. & Camenen, B.** (2023a). Fine sediment dynamics over a gravel bar. Part 1: Validation of a new image-based segmentation method. *Catena*, 1-11. doi: 10.1016/j.catena.2023.106963
6. **Deng, J., Camenen, B. & Pénard, L.** (2023b). Fine sediment dynamics over a gravel bar. Part 2: Impact of hydro-meteorological conditions on fine sediment deposit evolution. *Catena*, 1-14. doi: 10.1016/j.catena.2023.106978
7. **Ariagno, C., Pasquet, S., Le Bouteiller, C., van der Beek, P. & Klotz, S.** (2023) Seasonal dynamics of marly badlands illustrated by field records of hillslope regolith properties, Draix-Bléone Critical Zone Observatory, South-East France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1- 14. doi: 10.1002/esp.5564
8. **Li, J., Claude, N., Tassi, P., Cordier, F., Crosato, A. & Rodrigues, S.** (2023). River restoration works design based on the study of early-stage vegetation development and alternate bar dynamics. *River Research Application*, doi: 10.1002/rra.4188
9. **Deng, J., Camenen, B., Piednoir, T., & Pénard, L.** (2023d). Fine stock dynamics along an engineered Alpine river system. *Environmental Fluid Dynamics* (accepté)

#### E.2.2 OUVRAGES OU CHAPITRES D'OUVRAGE (INTERNATIONAL)

1. **Camenen B.** (2019). Arc-en-Maurienne, dans *Alpine river portraits*. Édité par Böck, K. & Ressar K (anglais/allemand). 4 p.

#### E.2.3 COMMUNICATIONS (CONFERENCE INTERNATIONALE)

1. **Legout C., Droppo I.G., Coutaz J., Bel C., Haddad H., Antoine G., Jodeau M.** (2019). Erosion and sedimentation dynamics of fine-grained cohesive sediment in cobble bed alpine rivers. EGU, Geophysical research abstracts, Vienne EGU2019-7071.
2. **Camenen, B., Thollet, F., de Angelis, R., Buffet, A., Dramais G., Valette, E. & Zanker, S.** (2020). An estimation of the sand suspension in alpine rivers during a dam flushing event. Proc. River Flow conference, July 2020, Delft, The Netherlands
3. **Recking, A., Lauters, F., Zanker, S., Regazzoni, M., Geay, T., Camenen, B., Brunet, L. & Fontaine F.** (2020). Measurement of sand transport with a submerged pump: presentation of the results of a test campaign carried out on the Isère River in July 2019. Proc. River Flow conference, July 2020, Delft, The Netherlands
4. **Haddad H., Jodeau M., Antoine G., Claude N., Legout C.** (2020). Fine sediment deposits in gravel bed rivers: sensitivity analysis to particle properties using a 2D hydrodynamic and sediment model. Proc. River Flow conference, July 2020, Delft, The Netherlands
5. **Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Pierrefeu, G. & Lauters, F.** (2022). Establishing time series of flux and grain size of suspended sand in rivers using an acoustic method. European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Vienna, Austria, April 2022.
6. **Camenen, B., Deville-Cavellin, L., Thollet, F., Bonnefoy, A., Fretaud, T. & Pierrefeu, G.** (2022). Evaluation of a peristaltic pump for sand suspension sampling. Proc. 39th IAHR Word Congress, Grenada, Spain, June 2022. 9 p., doi: 10.3850/IAHR-39WC2521716X2022191
7. **Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Pierrefeu, G. & Lauters, F.** (2022). Determination of flux and concentration of suspended sand time series using an acoustic method. Proc. 39th IAHR Word Congress, Grenada, Spain, June 2022. 8 p., doi: 10.3850/IAHR-39WC2521716X2022899

1. **Deng J., Camenen, B., Drevet, T. & Pénard, L.** (2020). Evaluation of the deposit dynamics on a gravel bar after different hydrologic events. Proc. River Flow conference, July 2020, Delft, The Netherlands
2. **Pénard, L., Drevet, T., Vergne, T., Deng, J. & Camenen, B.** (2019). Image-based fine sediment detection on gravel bars surface. 11th RCEM symposium, Auckland, New Zealand, Nov. 2019.
3. Perret, E., **Berni, C. & Camenen, B.** (2019). Improving bedload rate prediction in gravel-bed rivers accounting for bed stability and large bedforms. 11th RCEM symposium, Auckland, New Zealand, Nov. 2019.
4. **Bel, C., Claude, N., Jodeau, M., Haddad, H., Tassi, P.** (2019). Modelling of fine sediment dynamics in an Alpine gravel-bed river reach: a reservoir flushing case in the Isère River, France. 11th RCEM symposium, Auckland, New Zealand, Nov. 2019.
5. **Bel, C., Claude, N., Jodeau, M., Haddad, H., Tassi, P.** (2019). Modelling the fine sediment dynamics in a gravel-bed river reach with TELEMAC-2D and SISYPHE. 26th annual Telemac-Mascaret Users conference, Toulouse, France, Oct. 2019.
6. **Bel, C., Jodeau, M., Claude, N., Tassi, P.** (2020). Two-dimensional modelling of hydro-morphodynamic processes in a gravel-bed river: new insights from in situ measurement progress and interoperability applications. Proc. 10th River Flow conference, Jul. 2020.
7. **Deng, J., Piednoir, T., Pénard, L. & Camenen, B.** (2022). Estimation of fine sediment stocks in Alpine rivers. European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Vienna, Austria, April 2022.
8. **Boisson, L., Berni, C., Proust, S. & Camenen, B.** (2022). Experimental study on suspended sediment deposits over floodplains. Proc. 39th IAHR Word Congress, Grenada, Spain, June 2022. 5 p., doi: 10.3850/IAHR-39WC2521716X2022703
9. **Deng, J., Piednoir, T., Pénard, L. & Camenen, B.** (2022). Estimation of fine sediment stocks in Alpine rivers. Proc. 39th IAHR Word Congress, Grenada, Spain, June 2022. 9 p., doi: 10.3850/IAHR-39WC2521716X2022681
10. **Gupta, S., Berni, C. & Camenen, B.** (2022). Dynamics of forced alternate gravel bars under unsteady flow: an experimental investigation. Proc. 39th IAHR Word Congress, Grenada, Spain, June 2022. 8 p., doi : 10.3850/IAHR-39WC2521716X2022231
11. Ariagno, C., Le Bouteiller, C., Van der Beek, P., and Klotz, S. (2021) Sediment export in marly badland catchments controlled by frost cracking intensity, Draix-Bléone CZO, SE France, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-2913, doi: 10.5194/egusphere-egu21-2913, 2021
12. Ariagno, C., Le Bouteiller, C., and van der Beek, P. (2022): Seasonal dynamic of marls sediments illustrated by field records on hillslopes properties, Draix-Bléone CZO, SE France., EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-2614, doi: 10.5194/egusphere-egu22-2614, 2022.
13. Ariagno, C., Le Bouteiller, C., Van der Beek, P., and Klotz, S.(2021) Sediment export in marly badland catchments controlled by frost cracking intensity, Draix-Bléone CZO, SE France. OZCAR-TERENO conference, Strasbourg, 2021

#### E.2.4 REVUES A COMITE DE LECTURE (FRANCE)

1. **Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., Frétaud, T. & Pierrefeu, G.** (2022). Comment prélever les sédiment en suspension dans les cours d'eau? La Houille Blanche, 108:1, 2072783, doi: 10.1080/27678490.2022.2072783

#### E.2.5 COMMUNICATIONS (CONFERENCE FRANCE)

1. **Camenen, B., Deville-Cavellin, L., Thollet, F., Bonnefoy, A., Fretaud, T. & Pierrefeu, G.** (2021). Evaluation d'une pompe péristaltique pour l'échantillonnage d'une suspension sableuse. Proc. colloque Hydrométrie 2021, SHF, Montpellier, Nov. 2021. 10 p.
2. **Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Pierrefeu, G. & Lauters, F.** (2021). Développement d'une station de mesure en continu des flux de sable dans l'Isère à Grenoble. Proc. colloque Hydrométrie 2021, SHF, Montpellier, Nov. 2021. 4 p.
1. **Bel, C., Jodeau, M., Claude, N., Tassi, P.** (2021). Modélisation de la dynamique des sédiments fins sur les bancs de graviers de l'Isère en Combe-de-Savoie. TSMR – CFBR 2020, Saclay, France, Mar. 2021.
2. **Camenen, B., & Deng, J.** (2021). Evolution de l'hysteresis entre débit et concentration le long d'un tronçon de rivière. TSMR – CFBR 2020, Saclay, France, Mar. 2021.
3. **Deng, J., Pénard, L. & Camenen, B.** (2021). Evaluation de la dynamique des dépôts de sédiments fins sur un banc de galets après différents événements hydrologiques. TSMR – CFBR 2020, Saclay, France, Mar. 2021.
4. **Gupta, S., Berni, C. & Camenen, B.** (2021). *Formation de bancs de gravier alternés en canal expérimental avec la méthodologie de lit travaillé.* TSMR – CFBR 2020, Saclay, France, Mars 2021.
5. **Camenen, B., Thollet, F. & Le Coz, J.** (2021). Faut-il tenir compte des sables dans la mesure des flux sédimentaire en rivière par turbidimétrie? Proc. colloque Hydrométrie 2021, SHF, Montpellier, Nov. 2021. 9 p.
6. **Ariagno, C., Le Bouteiller, C., Van der Beek, P., and Klotz, S.** (2022) Dynamique saisonnière de l'érosion d'un petit bassin versant : Le rôle de l'altération et des intensités de précipitation. Journées de la Modélisation des Surfaces Continentales, Grenoble, 2022.

#### E.2.6 AUTRES ACTIONS DE DIFFUSION (RAPPORTS)

1. **Camenen, B., Buffet, A., Thollet, F., de Angelis, R. & Pénard, L.** (2019). Expériences de terrain sur le site Arc-Isère pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses. Rapport Irstea/EDF-CIH, 60 p.
2. **Camenen, B., Bonnefoy, A., Deville-Cavellin, L., Thollet, F., Sigaud, D. Deng, J. & Pénard, L.** (2020). Expériences de terrain sur le site Arc-Isère pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses. Rapport Irstea/EDF-CIH, 75p.
3. **Bel, C.** (2020). Etude et modélisation de la dynamique des sédiments fins sur les bancs de graviers de l'Isère en Combe-de-Savoie. Rapport EDF R&D-LHSV 6125-3311-2020-02553-FR.

### E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

Plusieurs logiciels ont pu être développés au cours du projet :

- Le logiciel DeFI sur l'analyse d'image pour en déterminer les surfaces de dépôts de sédiments fins sur les bancs de galet a été calibré et validé et mis en valeur par l'intermédiaire de deux publications (Deng et al., 2023a,b)
- Le code de calcul hydrosédimentaire 1D Mage-AdisTS a pu être développé et validé au cours du projet pour une application en rivière alpine (Deng et al., 2023d)

- Plusieurs développements ont été réalisés sur le code de calcul hydro-sédimentaire 2D Telemac-Gaia pour la modélisation de la dynamique des sédiments fins (Bel et al., 2019) et pour l'interaction avec la végétation pionnière (Li et al., 2022, 2à23)

## E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Deng Junjian	H	junjian.deng@inrae.fr	05/2023	Ingénieur	France	1 an	INRAE Lyon	Doctorant	01/11/2019	30/11/2022	CDD	EPST (INRAE) GE (EDF)	Postdoc Ingénieur	oui	oui
Gupta, Shashank	H	shashank.gupta@inrae.fr	05/2023	Master	France	2 ans	INRAE Lyon	Doctorant	01/11/2019	31/01/2023					
Laslier, Marianne	F	marianne.laslier@u-picardie.fr	05/2023	Doctorat	France	3 ans	INRAE Lyon	Post-doctorante	01/10/2019	31/08/2020	CDI	ERP (Univ. Amiens)	Maitresse de conférence	non	oui
Ariagno, Coline	F	Coline.ariagno@inrae.fr		Master	France	0 an	INRAE Grenoble	Doctorante	01/11/2019	31/12/2022	CDD	ERP (Univ. Rennes)	Postdoc	non	oui
Haddad, Hanna	M	hanna.haddad@edf.fr	05/2023	Master	France	1 an	EDF-LNHE	Doctorant	10/02/2019	30/06/2022	CDI	GE (CNR)	Ingénieur	non	oui
Bel, Coraline	F	Coraline.bel@edf.fr	05/2023	Doctorat	France	5 ans	EDF LNHE	Post-doctorante	15/01/2019		CDI	GE (EDF)	Ingénieure	oui	oui