



HAL
open science

Les flux hydro-sédimentaires au coeur des interactions climat-société

Margot Chapuis

► **To cite this version:**

Margot Chapuis. Les flux hydro-sédimentaires au coeur des interactions climat-société. Géomorphologie. Université Côte d'Azur, 2025. <tel-05118739>

HAL Id: tel-05118739

<https://hal.science/tel-05118739v1>

Submitted on 18 Jun 2025

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Les flux hydro-sédimentaires au cœur des interactions climat-société

Margot CHAPUIS

UMR 7300 ESPACE

**Mémoire présenté en vue de l'obtention
de l'Habilitation à Diriger les Recherches
en Géographie
à l'Université Côte d'Azur
Soutenu le : 01/04/2025**

Devant le jury, composé de :
Gilles Arnaud-Fassetta, PU, Université Paris Cité
Pascale Biron, Professeur, Concordia University
Dennis Fox, PU, Université Côte d'Azur (garant)
Hervé Piégay, DR CNRS, ENS Lyon
Pierre-Gil Salvador, PU, Université de Lille
Laurence Vidal, PU, Aix-Marseille Université

HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES

Les flux hydro-sédimentaires au cœur des interactions climat-société

Margot CHAPUIS
Volume 1

Jury :

Gilles Arnaud-Fassetta, PU, Université Paris Cité

Pascale Biron, Professeur, Concordia University

Dennis Fox, PU, Université Côte d'Azur (garant)

Hervé Piégay, DR CNRS, ENS Lyon

Pierre-Gil Salvador, PU, Université de Lille

Laurence Vidal, PU, Aix-Marseille Université

Titre

Les flux hydro-sédimentaires au cœur des interactions climat-société

Résumé

L'étude couplée des flux hydro-sédimentaires, sur l'unité territoriale que représente un bassin versant, suppose d'analyser les relations de réciprocité entre fluctuations de l'hydrosystème et occupation du territoire (société et/ou biocénose). Cette démarche systémique nécessite d'adopter une pluralité d'approches pour capturer à la fois le « régime ordinaire » du cours d'eau et les conséquences d'un événement extrême, ou encore les trajectoires des hydrosystèmes en contexte de changement climatique. Nous tentons ainsi de capturer certains aspects des interactions climat-société, pour comprendre à la fois les processus physiques (chroniques pluriannuelles, événements extrêmes), et leurs conséquences sur les hydro-éco-systèmes et sur les logiques d'aménagement du territoire associé. En nous appuyant sur plusieurs exemples localisés dans des cours d'eau de montagne soumis à un climat alpin et/ou méditerranéen, nous définissons dans un premier temps le cadre théorique, méthodologique et géographique qui sous-tend notre démarche de recherche, en balayant notamment les méthodologies récentes qui peuvent être employées en géomorphologie fluviale dans le cadre d'une activité d'observation des processus physiques en lien avec le transport sédimentaire. Dans la partie 2, nous présentons nos principales réalisations, qui se structurent en 3 axes : 1/ nous proposons une lecture des territoires étudiés en prenant pour point d'entrée les flux hydro-sédimentaires, et suggérons de considérer ces flux hydro-sédimentaires comme un proxy des interactions climat-société à l'échelle des bassins versants. 2/ Nous caractérisons les transferts sédimentaires en Roya depuis 2016 : ce bassin versant a connu une crue qualifiée de millénale en 2020, que nous avons pu capturer à partir de traçages RFID et d'un suivi par sismique passive. 3/ Nous abordons la restauration et la gestion des cours d'eau, et soulignons l'importance d'une approche couplée entre géomorphologie et écologie pour mieux capturer la variabilité des cours d'eau, notamment en tresses. La partie 3 présente nos perspectives, en particulier via la présentation d'un projet structurant entamé en 2024 portant sur le continuum terre-mer dans une approche transdisciplinaire. La partie 4 conclut l'exposé en soulignant l'intérêt de l'approche géographique dans l'étude des flux hydro-sédimentaires.

Mots-clefs

Flux sédimentaires, bassin versant, hydrosystème, hydro-éco-système, géomorphologie fluviale, traçage RFID, continuum terre-mer, hydrologie torrentielle, climat méditerranéen, Roya, Alpes-Maritimes, Alpes françaises du Sud, rivières en tresses, restauration des cours d'eau

Title

Sediment fluxes and hydrology, a key component of the climate-society interactions

Abstract

Coupling the study of sediment fluxes and hydrology, within the relevant spatial unit that corresponds to catchment scale, implies to analyze the reciprocal relationships between hydrosystem fluctuations and land use (society and/or biocenosis). This systemic approach requires to adopt multiple disciplines' points of view to capture both the « ordinary regime » of the river and the consequences of an extreme event, or the trajectory of the fluvial system in the context of climate change. We aim at deciphering some aspects of the climate-society interactions, to understand both physical processes (pluri-annual series, extreme flood events) and their consequences on hydro-eco-systems and on land use planning strategies. Based on several examples located in mountain streams under alpine and/or mediterranean climates, we first define the theoretical, methodological and geographical contexts that frame our research approach, presenting recent methodologies in fluvial geomorphology that enable to observe physical processes linked to sediment transport. Section 2 relates our achievements, that can be split in 3 research directions: 1/ we suggest analyzing the catchment through the entry of coupled hydro- and sediment fluxes, as a proxy of climate-society interactions. 2/ We relate our 8-years study of sediment transfers through the Roya valley, a catchment that experienced a 1000 years return period flood in 2020 we were able to monitor through RFID tracking and passive seismology. 3/ We focus on river restoration and management and stress the need to undertake a coupled geomorphological and ecological approach to better capture the spatial and temporal variability of rivers, especially braided rivers. Section 3 describes our research perspectives, notably through the example of the systemic approach underlying a consortium project that started in 2024, which aims at assessing sediment transfers with a source-to-sink approach. Section 4 concludes this manuscript by insisting on the relevance of using a geographical approach to study river sediment fluxes.

Keywords

Sediment fluxes, catchment, hydrosystem, hydro-eco-system, fluvial geomorphology, RFID tracking, source-to-sink, mountain stream hydrology, mediterranean climate, Roya, Maritime Alps, Southeastern France, braiding rivers, river restoration

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dennis Fox qui a accepté d'être mon garant, ainsi que les membres du jury et les rapporteurs, y compris anonymes, qui ont bien voulu prendre le temps d'évaluer ce travail.

La recherche est un exercice collectif : c'est évidemment grâce aux interactions quotidiennes ou plus ponctuelles que les idées vont, viennent, s'échangent et prennent une autre dimension. Dans le désordre et tout en sachant que cette liste ne réussira pas à être exhaustive, merci donc à mes commensaux, mes collègues géographes de Nice et d'ailleurs, mes étudiants évidemment, ainsi qu'aux membres des différentes communautés professionnelles avec lesquelles j'ai pu agir au cours de ces années passées et qui m'ont nourrie grâce à nos échanges formels ou non. La période covid m'a permis, s'il en était besoin, de constater à quel point « faire de la recherche dans son coin » n'était pas ma vision de la discipline !

Un grand merci également à mes différentes familles, selon la granularité considérée. Une petite mention spéciale à Bastien et Céline, qui m'ont précédée dans l'exercice et nécessairement inspirée, et à Barbara, ma compagne d'aventures ! Enfin, par son humour chronique, son rire contagieux et son soutien indéfectible, JR est indispensable.

Table des matières

1	Positionnement théorique, méthodologique et géographique.....	9
1.1	Identification des manques de connaissances fondamentales.....	9
1.2	Positionnement théorique et objets d'étude.....	11
1.3	Positionnement méthodologique.....	13
1.4	Positionnement géographique.....	15
2	Réalisations.....	19
2.1	Les flux hydro-sédimentaires, un proxy des interactions climat-société à l'échelle du bassin versant ?.....	19
2.1.1	Problématique.....	19
2.1.2	Cadre conceptuel.....	20
2.1.3	Méthodologie.....	24
2.1.4	Résultats.....	26
2.1.5	Discussion : développement de modèles conceptuels.....	31
2.1.6	Conclusion.....	37
2.2	Transferts sédimentaires dans un bassin versant à régime montagnard sous influence méditerranéenne (Roya, Alpes-Maritimes, France).....	39
2.2.1	Contexte.....	39
2.2.2	Méthodologie.....	55
2.2.3	Dynamique sédimentaire des frayères en Roya : apports d'un suivi par RFID passive 62	
2.2.4	Transport solide de l'ensemble de la gamme granulométrique : éléments de connaissance issus d'une opération pluriannuelle de traçage sédimentaire, discussions et perspectives de recherche.....	69
2.2.5	Etude des flux sédimentaires en Roya : éléments de connaissance issus du suivi par sismique passive, discussions et perspectives de recherche.....	72
2.2.6	Discussion.....	76
2.3	Gestion et restauration des corridors fluviaux en contexte alpin et méditerranéen : un couplage entre géomorphologie et écologie.....	87
2.3.1	Cadre théorique.....	87
2.3.2	Cadre géographique.....	87
2.3.3	Cas d'étude sur le Drac : restauration morpho-écologique des cours d'eau en tresses : de la nécessité de prendre en compte l'hétérogénéité géomorphologique.....	87
2.3.4	Cas d'étude sur les cours d'eau maralpins : dynamiques paysagères à l'échelle des 150-200 dernières années.....	92
2.3.5	Conclusion : de la nécessité de coupler géomorphologie et écologie : l'essor de la biogéomorphologie et son intérêt pour la gestion et la restauration des corridors fluviaux.....	98

3	Perspectives	99
3.1	Le continuum terre-mer, une approche systémique et transdisciplinaire pour une gestion durable des territoires	99
3.1.1	Contexte et objectifs scientifiques	99
3.1.2	Méthodologie	101
3.1.3	Résultats attendus	103
3.2	Perspectives de recherche	109
3.2.1	Montage de projets et direction de la recherche	109
3.2.2	Principes et pistes de valorisation de la recherche.....	112
3.2.3	Réflexions sur les pratiques de vulgarisation, une approche complémentaire pour (rendre) un public sensible à son environnement	113
3.2.4	L'exploration de nouveaux terrains d'étude et de disciplines connexes	114
3.2.5	L'instrumentation long terme, ou le caractère opérationnel d'une recherche fondamentale	115
3.2.6	La profondeur temporelle des actions de gestion des corridors fluviaux	116
4	Conclusions.....	119
	Références bibliographiques	121
	Liste des figures	133
	Liste des tableaux	137

1 Positionnement théorique, méthodologique et géographique

Je précise dans un premier temps les questionnements qui ont guidé ma recherche en faisant le lien avec la structure du manuscrit. Je précise ensuite le cadre de mes recherches : mon positionnement théorique, mon positionnement méthodologique et enfin mon positionnement géographique.

1.1 Identification des manques de connaissance fondamentales

La recherche française en géomorphologie fluviale, et en particulier celle des cours d'eau à charge grossière, est actuellement très dynamique, structurée autour de quelques pôles particulièrement actifs à l'échelle métropolitaine, qui bénéficient à l'ensemble de la communauté. Elle bénéficie d'une part du contexte réglementaire qui s'est structuré de manière significative depuis une trentaine d'années (Directive Cadre sur l'Eau et GEMAPI notamment), mais aussi de catastrophes marquantes à l'échelle des territoires, qui ont permis un portage politique des problématiques associées à une gestion durable de ces cours d'eau qui aille au-delà d'une logique de surenchères en termes d'infrastructures de protection contre les crues (crue du Rhône de 2003, crues de la Durance de 1994 puis 2008, crues de la Nartuby de 2010 et 2014...). En parallèle, la spécialisation poussée des personnels techniques des collectivités territoriales a fait remonter des questionnements opérationnels précis au monde académique : les besoins exprimés sur le volet de l'ingénierie fluviale ont poussé à une collaboration forte entre les « gestionnaires de cours d'eau » et les « chercheurs ».

Plus récemment, les contraintes exercées sur la ressource en eau, toujours plus en tension tant en termes de quantité que de qualité, ont également poussé l'ensemble de la communauté « de l'eau » à décroiser les approches pour tendre vers une gestion systémique, intégrée et pluridisciplinaire des bassins versants. A ce titre, je propose de considérer les flux hydro-sédimentaires comme étant à l'interface entre le (les variations du) climat et la société.

Je ne dresserai pas un inventaire des questionnements qui peuvent émerger concernant la gestion des cours d'eau à charge grossière du sud-est de la France ; je choisis plutôt de résumer ci-après les quelques grandes questions fondamentales qui ont orienté mes actions de recherche depuis ma prise de poste :

- Analyser certaines relations de réciprocité entre fluctuations des hydrosystèmes et modalités d'occupation de l'espace (que ce soit par la biocénose ou la société humaine), et leurs conséquences en termes de planification territoriale
- Caractériser les dynamiques (hydro-)sédimentaires à l'échelle du tronçon et du bassin versant, à différentes échelles temporelles (séries pluriannuelles vs. événements extrêmes vs. influence des changements d'occupation du sol à l'échelle historique)
- Mieux comprendre les processus physiques liés au transport sédimentaire, et leurs conséquences sur les hydro-éco-systèmes, afin notamment d'évaluer et de quantifier le succès des opérations de restauration hydromorphologique des cours d'eau, et particulièrement les cours d'eau en tresses.

Pour tenter d'éclairer ces questions, le présent manuscrit est structuré en 4 parties.

Dans la partie 1, je précise mon positionnement théorique et présente le contexte méthodologique et géographique de mes activités de recherche menées depuis 2015. A partir d'une approche géomorphologique basée sur l'observation (acquisition de données de terrain), j'étudie le fonctionnement de cours d'eau dynamiques à charge grossière en contexte alpin (montagnard) et sous influence méditerranéenne.

Je m'appuie essentiellement sur des exemples basés dans les Alpes françaises du Sud : en effet, les cours d'eau maralpins sont peu connus, en partie du fait de leur caractère excentré. A titre d'exemple, l'événement du 02/10/2020 (tempête Alex) a mis en relief les caractéristiques des cours d'eau maralpins (crues éclair, transport sédimentaire intense) Cet événement exceptionnel a souligné la nécessité de comprendre le fonctionnement particulier des cours d'eau montagnards en domaine méditerranéen, dans une perspective de développement de stratégies d'adaptation aux changements climatiques, qui soient accessibles aux gestionnaires et aux habitants de ces territoires : j'ai ainsi décidé de profiter de ma localisation géographique pour approfondir notre compréhension des spécificités de ces cours d'eau.

Dans la partie 1, je regroupe mes réalisations en termes de recherche. Les travaux sont regroupés en 3 sous-parties qui reprennent les 3 grandes questions présentées ci-avant.

- Dans un premier temps (sous-partie 2.1), je replace mes travaux dans un cadre cohérent, qui est à mon sens défini par deux pôles, climat d'un côté et écosystème de l'autre : les flux hydro-sédimentaires me semblent constituer un proxy de ces interactions climat-société. Cette vision des flux hydro-sédimentaires est particulièrement adaptée pour développer des modèles conceptuels des flux hydro-sédimentaires à l'échelle d'un bassin versant. Ces modèles permettent de scénariser les interactions entre différents compartiments au sein de systèmes en évolution, ce qui est particulièrement intéressant lorsqu'on s'intéresse aux dynamiques de changement au sein d'un système (par exemple, un bassin versant soumis au changement climatique ou à un événement extrême).
- Dans un second temps (sous-partie 1.1), je me concentre sur les travaux que j'ai menés dans le bassin versant de la Roya. En effet ce territoire est particulièrement représentatif de mon positionnement géographique et méthodologique, puisqu'il s'agit d'un bassin versant influencé à la fois par les climats alpins et méditerranéens, et pour lequel je tente de caractériser et quantifier les flux sédimentaires grossiers depuis 2016. Ce bassin a été durement touché par la tempête Alex évoquée précédemment : cela en fait en outre un excellent laboratoire à taille réelle pour y étudier les dynamiques de changements. Ces changements s'emboîtent tant dans une dimension spatiale que temporelle, qu'ils soient liés à des événements exceptionnels voire extrêmes, au dérèglement climatique, ou au changement des pratiques et de vécu au sein des territoires concernés. L'approche géomorphologique de quantification du transport sédimentaire grossier est ici une clef d'entrée pour aborder ensuite d'autres disciplines, dans une logique systémique à l'échelle de l'unité spatiale que représente le bassin versant. Il s'agit aussi de régionaliser les connaissances acquises à échelle ponctuelle (site d'étude) ou à l'échelle de la vallée, pour dégager des stratégies de gestion à l'échelle inter-valléenne (échelle de la rivière méditerranéenne).
- Dans un troisième temps (sous-partie 1.1), j'illustre via deux exemples en quoi la gestion et la restauration des corridors fluviaux bénéficie d'un couplage entre géomorphologie et écologie : le premier exemple est basé sur un cas d'étude « faunistique » (macro-invertébrés aquatiques en lien avec l'activité géomorphologique dans un cours d'eau

restauré), l'autre sur un cas d'étude « floristique » (dynamiques de végétation en lien avec les dynamiques sédimentaires à l'échelle historique).

Enfin dans la partie 1, je présente mes perspectives de recherche, d'abord en présentant un projet à peine démarré qui s'appuie sur une approche systémique et transdisciplinaire pour approfondir la notion de continuum terre-mer, puis en dessinant les contours de ma pratique de recherche pour la suite de ma carrière. Je conclus ce manuscrit dans la partie 1, en insistant sur l'intérêt de l'approche géographique dans l'étude des flux hydro-sédimentaires.

1.2 Positionnement théorique et objets d'étude

Mes actions de recherche s'inscrivent résolument en géomorphologie fluviale, dans le champ de la géographie physique qui constitue un cadre théorique idoine pour travailler sur des objets à différentes échelles de temps et d'espace, cadre particulièrement judicieux pour étudier les hydrosystèmes (Rhoads, 2004 ; Dufour et Lespez, 2020). Plus généralement, le cadre thématique dans lequel je pense m'inscrire est précisé dans la section 2.1.2.

Je travaille ainsi à la croisée des disciplines « naturalistes » suivantes : géologie et géomorphologie structurales, sédimentologie, hydrologie, hydraulique (notamment hydraulique torrentielle), biogéographie, géographie de l'environnement, mais aussi à l'interface avec les sciences humaines qui s'avèrent être un cadre d'étude particulièrement intéressant pour étudier les pressions anthropiques qui s'exercent sur un espace (Bergeret et al., 2015 ; Serrhini-Naji, 2021 ; Thibaut et al., 2023).

Pour préciser le cadre de mes travaux en géomorphologie fluviale, je mobilise les concepts d'approche systémique (Cholley, 1950 in Battiau-Queney, 2022 ; Schumm, 1977 ; Amoros et Petts, 1993 ; Gautier et al., 2009), de socio-écosystème (Liu et al., 2007 ; Dufour et al., 2017), de continuité terre-mer via le concept de *source-to-sink* (Anthony et Julian, 1999 ; Sømme et al., 2009) ou encore de continuité sédimentaire (Fryirs et al., 2007) ou de connectivité sédimentaire (Cossart, 2014).

Ceci fait appel à de nombreux compartiments au sein de l'hydrosystème, qui sont résumés de manière non exhaustive dans Devreux, 2023 (cf. Figure 1). Dès lors, une approche transdisciplinaire est à mobiliser pour étudier leurs interactions : nous y reviendrons.

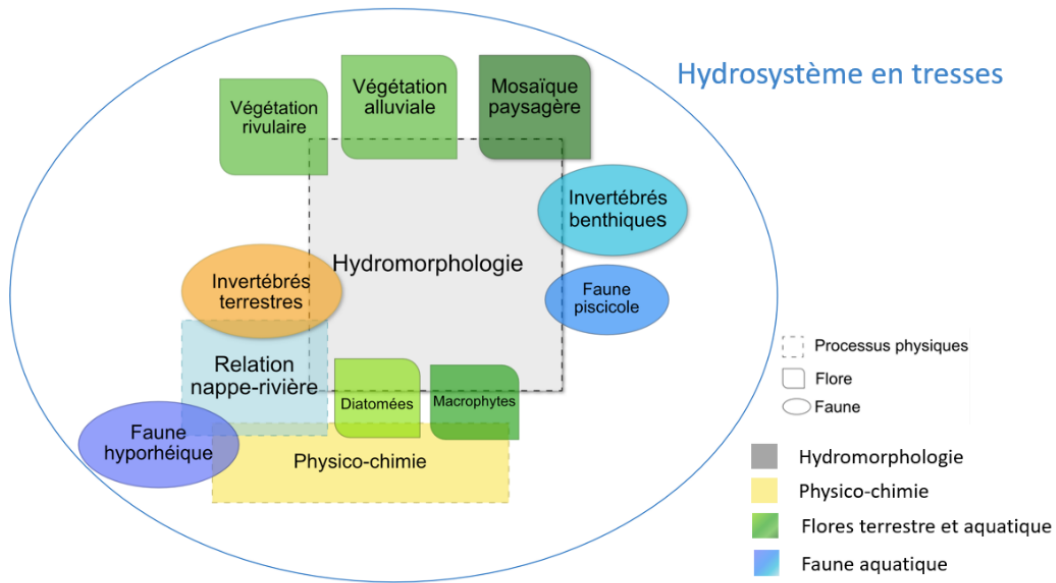


Figure 1. Compartiments classiquement étudiés au sein de l'hydrosystème fluvial.

Adapté depuis Devreux, 2023

De nombreux travaux ont pointé l'interrelation entre géomorphologie fluviale et écologie, qui fait récemment émerger le champ de la biogéomorphologie fluviale (Swanson, 1980 ; Gregory and Gurnell, 1988 ; Belletti et al., 2015 ; Gurnell et Bertoldi, 2024) (cf. Figure 2). Avec un ancrage dans le champ de la géomorphologie fluviale, mes recherches se proposent d'approfondir certains aspects de la relation où la géomorphologie influence l'écologie, que ce soit sur le comportement faunistique ou sur celui floristique. En particulier je m'intéresse à la variabilité géomorphologique des systèmes fluviaux dans le temps et l'espace, et à ce titre c'est plutôt le lien avec la variabilité des compartiments de la biocénose dans le temps et l'espace qui m'intéressera.

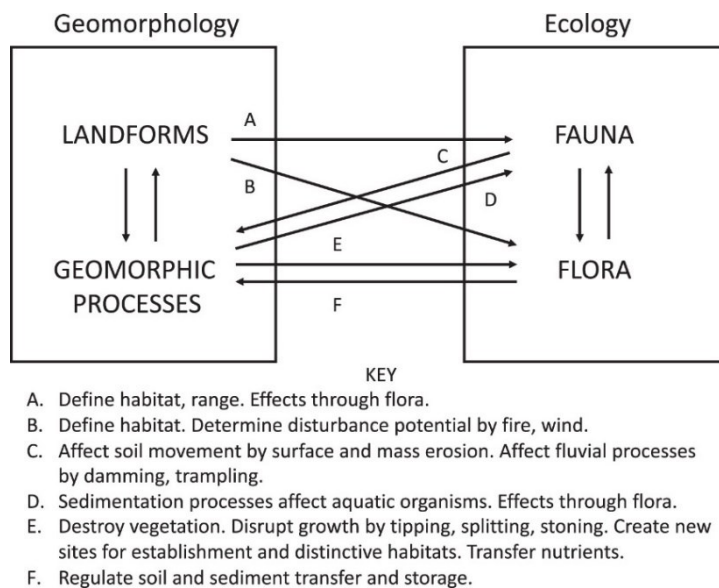


Figure 2. Interrelations entre géomorphologie et écologie.

Source : Swanson, 1980 in Viles, 2022.

J'ai à cœur d'étudier des hydrosystèmes impactés par les activités humaines, dans une démarche de recherche au service de la société. Je m'intéresse donc aux relations de contrainte réciproque entre l'hydrosystème et le socio-écosystème au sein d'un bassin versant, en intégrant évidemment les facteurs de contrôle que constituent les influences climatiques alpines/montagnardes et/ou méditerranéennes sur mes systèmes d'étude.

A ce titre également, je tiens à mener une recherche fondamentale ancrée dans des questionnements opérationnels du territoire. Ceci nécessite d'être à l'écoute des besoins exprimés par la communauté des gestionnaires, et de prendre le temps de faire le lien entre le monde académique et le reste de(s) communauté(s) scientifique(s) et/ou des structures de gestion territoriale. Nous touchons là à la place que le/la chercheur/se prend au sein de la société, notion qui sera en particulier abordée à la section 3.2.3.

En ce qui concerne plus spécifiquement le bassin versant de la Roya, j'ai dès le départ voulu travailler à l'échelle du bassin versant, ce qui est cohérent avec ma démarche évoquée ci-avant. Cependant dans ce cas cela constituait une difficulté supplémentaire dans la mesure où peu de données étaient disponibles, et encore moins harmonisées, entre les parties française et italienne. Le développement de cette vision transfrontalière est un de mes objectifs de travail à part entière et constitue, il me semble, une démarche particulièrement « géographique » même si évidemment orientée vers la compréhension des flux sédimentaires.

1.3 Positionnement méthodologique

Préalablement à ma prise de poste en 2015, j'avais identifié qu'une difficulté de la communauté scientifique était de disposer de données de terrain fiables pour alimenter les modélisations (numériques ou physiques) toujours plus nombreuses. La voie de l'observation est généralement considérée comme relativement ingrate : outre l'effort logistique et souvent physique, il faut en effet plusieurs années pour constituer un corpus de données qui permette une prise de recul suffisante sur les processus pour dépasser le cadre local de leur acquisition/application. Bien qu'ayant des compétences en modélisation (hydraulique et hydrosédimentaire notamment), j'ai choisi de saisir toutes les opportunités de développer des suivis de terrain, en pensant me tourner vers des aspects de modélisation dans un deuxième temps (si les suivis de terrain n'étaient pas concluants par exemple).

J'ai donc très rapidement basé ma recherche sur des données de terrain originales, acquises à partir d'outils classiques en géomorphologie fluviale (suivis topographiques, échantillonnages granulométriques...) ou d'outils plus récents (traçage sédimentaire par RFID passive, puis RFID active), mais aussi d'outils empruntés à d'autres disciplines (capteurs sismiques, échantillonnages biologiques...). Les ressources humaines présentes sur site m'ont poussée à choisir de ne pas m'engager dans des développements méthodologiques trop lourds que je ne pourrais maintenir sur le temps long ; cependant c'est le déploiement d'outils encore récents dans des contextes « atypiques » qui fait ma spécificité. En effet je contribue à évaluer les limites d'application de certains outils (RFID passive en contexte torrentiel très actif ; sismique passive pour évaluation de la charge grossière en contexte rocheux...). J'ai couplé cette approche de terrain à l'utilisation de différents outils informatiques (programmation, SIG...) qui viennent renforcer mon approche quantitative. Là encore, les ressources humaines sur site m'ont incité à choisir plutôt les collaborations pour ce qui relevait des aspects de modélisation hydrologique, hydraulique ou hydrosédimentaire (notamment : collaborations P. Brigode et R. Yassine, UniCA).

Les outils que je mobilise ne sont pas nécessairement novateurs, mais c'est leur utilisation conjointe, dans une démarche qui balaie une large gamme de disciplines allant des sciences humaines aux géosciences en passant par l'hydraulique, qui souligne mon appartenance à la communauté des géographes. Ce qui constitue probablement une spécificité de mon approche dans le paysage académique français actuel est ma triple compétence en géomorphologie, en hydrologie et en hydraulique, tout en ayant adopté les approches systémiques et transdisciplinaires des géographes. Cela me permet notamment de faire « le pont » entre la communauté des hydrauliciens/hydrologues/modélisateurs (Société Hydrotechnique de France par exemple) et la communauté des géographes/géomorphologues/naturalistes (AFGP, CNFG) tout en facilitant mes interactions avec les différents gestionnaires/acteurs des hydrosystèmes.

Ce positionnement méthodologique basé sur de l'instrumentation de terrain est en général relativement onéreux, mais est encore plus consommateur de main d'œuvre. A ce titre, mes recherches ont nécessairement dû s'appuyer sur plusieurs projets financés (cf. sous-partie 3.2).

1.4 Positionnement géographique

Comme évoqué dans la partie 1, du fait de ma localisation géographique et de ma conviction que la géographie physique se nourrit d'un ancrage territorial fort qui suppose d'être « présent sur place », la plupart de mes terrains d'étude sont naturellement situés dans les Alpes françaises du Sud. Ceci s'ajoute au fait que la communauté académique des géomorphologues fluviaux est quasi absente de la Région Sud-Provence-Alpes-Côte d'Azur. Le besoin territorial exprimé est par ailleurs renforcé par le caractère excentré des cours d'eau maralpins, qui jusqu'à récemment (la tempête Alex d'octobre 2020) ne bénéficiaient pas de l'intérêt de la communauté.

Pour un bref aperçu des caractéristiques physiques des cours d'eau étudiés (cours d'eau à charge grossière à forte énergie, sous influence alpine et/ou méditerranéenne), on pourra se reporter aux différents portraits des cours d'eau du Var, du Verdon, de la Durance ou encore du Paillon (Chapuis 2019a, Chapuis, 2019b, Chapuis, 2019c *in* Muhar et al. (éds), 2019 ; Chapuis et al., 2019b *in* Carcaud et al. (éds), 2019). Concernant la Roya et la Vésubie, le « Retour d'expérience technique » post-Alex (respectivement ONF-RTM et al., 2023a ; ONF-RTM et al., 2023b), d'un point de vue de l'aléa torrentiel, constitue désormais une référence concernant la présentation des bassins versants d'un point de vue topographique, géologique et géomorphologique. On y trouve également le recensement des crues historiques sur chacun des deux bassins versants, l'estimation expertisée des débits caractéristiques de crue associés, ainsi que la documentation réglementaire associée au risque inondation sur chaque bassin versant à la date de rédaction de ces deux volumes.

Le cadre géographique dans lequel se situe ce travail est celui des bassins versants soumis à influence alpine et/ou méditerranéenne. Je rappelle ici les caractères essentiels de ces cours d'eau (cf. Figure 3, Figure 4 et Figure 5) :

- Caractéristiques physiographiques
 - Pentes raides
 - Sols peu épais
 - Couvert végétal faible



(a) Paillon en amont de Nice (France). Cliché juin 2017.



(b) Roya à Vintimille (Italie). Source : <http://f.hikr.org/files/247235l.jpg>

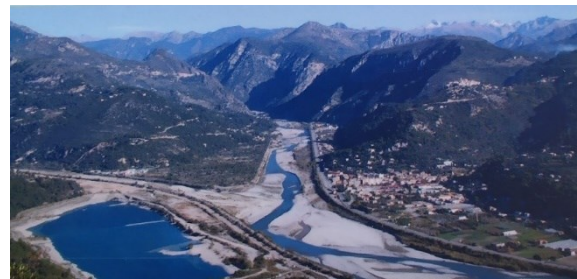
Figure 3. Paysages maralpins typiques des bassins versants étudiés. (a) Le Paillon. (b) La Roya à Vintimille.

- Climat et hydrologie
 - Forte variabilité infra-annuelle des débits, avec des extrêmes hydrologiques qui peuvent balayer jusqu'à 3 ordres de grandeur (débits d'étiage < 1 m³/s, débit de crue > 1000 m³/s pour un même cours d'eau)

- Crues-éclair (temps de montée de crue < 2 h sur certains systèmes très réactifs)
- Ecoulements torrentiels : régime hydraulique des rivières (pente < 1,5%), mais souvent sous régime hydraulique des rivières torrentielles (pente comprise entre 1,5% et 6%) (cf. classification de Bernard, 1925 *in* Meunier, 2023 ; Bernard, 1927 *in* Meunier, 1989)
- Morphodynamique des lits
 - Charge grossière prédominante ($D_{50} = 45-90$ mm)
 - Fourniture sédimentaire abondante, en général non limitante, et connectivité sédimentaire en général forte
 - Cours d'eau (très) dynamiques, à forte énergie
- Impacts liés à l'activité humaine
 - Changement des modalités d'occupation du sol à l'échelle historique (souvent depuis le Moyen Âge)
 - Occupation dense des fonds de vallées, par ailleurs souvent (très) contraints latéralement
 - Infrastructures de production hydroélectrique, avec notamment des effets de discontinuité (latérale, longitudinale) qui affectent les flux sédimentaires et la biocénose.



(a) Confluence Var-Estéron en amont de Nice en 1945.

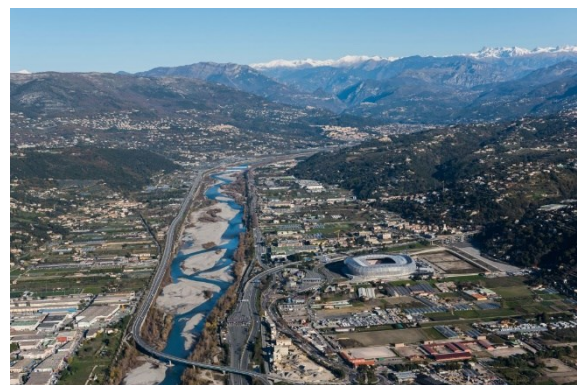


(b) Confluence Var-Estéron en amont de Nice en 2002.

Source : © Conseil Général des Alpes-Maritimes, Parc naturel départemental des Rives du Var
 Figure 4. Confluence Var-Estéron en amont de Nice en 1945 (a) et 2002 (b).



(a) Centrale de Paganin, Roya, France. Cliché mai 2016.



(b) Le Var immédiatement en amont de Nice. © SMIAGE

Figure 5. Exemples d'aménagements anthropiques typiques des systèmes étudiés : infrastructures de production hydro-électriques (a) et endiguements (b).

Si la Roya constitue un terrain d'étude privilégié (cf. sous-partie 1.1), j'ai à cœur de développer une connaissance applicable à l'échelle régionale des Alpes du Sud. Plus généralement, les

terrains étudiés se situent dans le quart sud-est de la France entre les Cévennes et les Alpes du Sud (cf. Figure 6), jusque dans les Alpes italiennes (cf. Devreux, 2023).

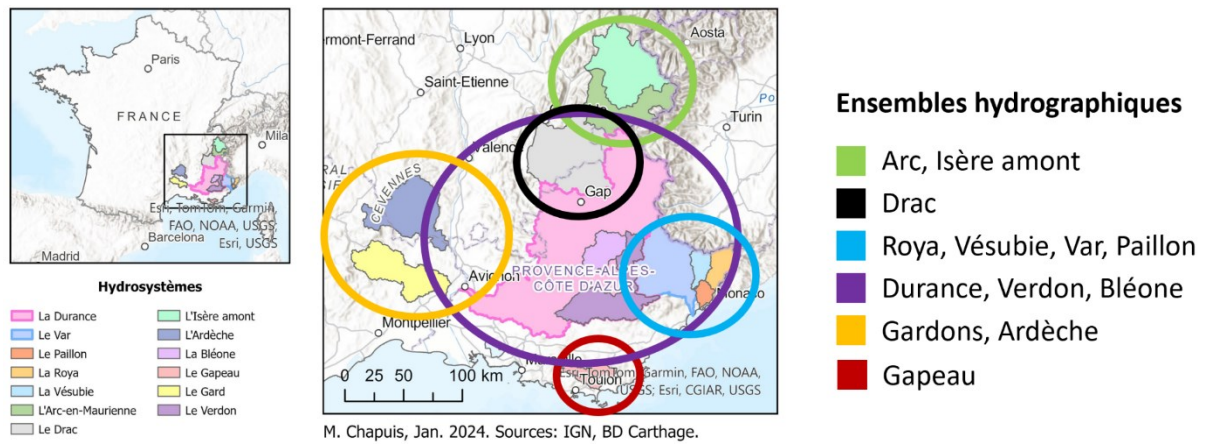


Figure 6. Dimension régionale des hydrosystèmes étudiés.

2 Réalisations

Dans cette partie je décompose les trois directions qui ont structuré mes recherches jusqu'à présent : 1/ analyser les interactions climat-société à l'échelle du bassin versant, 2/ quantifier les dynamiques sédimentaires en Roya et 3/ gérer et restaurer les corridors fluviaux.

2.1 Les flux hydro-sédimentaires, un proxy des interactions climat-société à l'échelle du bassin versant ?

Dans cette première sous-partie, je propose de considérer les flux hydro-sédimentaires comme un proxy des interactions climat-société, en analysant certaines relations de réciprocité entre fluctuations des hydrosystèmes et modalités d'occupation de l'espace (que ce soit par la biocénose ou la société humaine), et leurs conséquences en termes de planification territoriale. Ceci me permet notamment de replacer l'ensemble de mes travaux dans un cadre cohérent.

2.1.1 Problématique

Avec la part croissante des enjeux liés à l'eau et à aux sédiments dans les décisions d'aménagement du territoire et dans le débat public, il nous semble utile de proposer une réflexion sur la place du binôme « eau et sédiments » dans le bassin versant. En effet, bien que sujet « grand public », l'eau et les sédiments deviennent vite un sujet technique. Ces deux éléments, en général considérés séparément, constituent deux ressources stratégiques en voie de raréfaction qui font émerger de vives tensions à différentes échelles territoriales (pour exemple, sur le sable à l'échelle mondiale : Le Monde, 2022¹ ; sur l'eau à l'échelle nationale : Le Monde, 2023² ; Le Monde, 2024³).

Sans s'attarder sur l'aspect crucial que revêtent ces deux ressources pour les sociétés et la biocénose, nous proposons donc ici de considérer les flux hydro-sédimentaires comme un proxy des interactions entre les effets du climat et les sociétés humaines, en prenant comme définition du terme « proxy » la notion d'intermédiaire, de relais, ou encore d'agent de substitution (le Robert, *en ligne*⁴). Nous ajouterons à cette liste les termes d'interface et de « nexus » (Géoconfluences, 2023), qui selon les contextes peuvent s'avérer pertinents.

Nous définissons tout d'abord le cadre conceptuel dans lequel nous nous inscrivons, présentons rapidement la méthodologie et le cadre géographique avant d'arriver à la présentation des résultats issus de diverses études qui sont ici réanalysées à la lumière du sujet. La discussion est enfin l'occasion de développer un argumentaire sur l'intérêt de considérer les flux hydro-sédimentaires comme une interface entre climat et écosystèmes.

¹ Valo, 2022. https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/04/26/le-sable-une-ressource-strategique-exploitee-sans-frein_6123653_3244.html [consulté le 05/08/2024]

² Seingier, 2023. https://www.lemonde.fr/le-monde-et-vous/article/2023/12/12/florence-habets-notre-societe-s-est-fragilisee-par-rapport-a-la-ressource-en-eau_6205421_6065879.html [consulté le 05/08/2024]

³ Valo, 2024. https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/08/28/la-degradation-des-ecosystemes-aquatiques-s-accelere_6297289_3244.html [consulté le 28/08/2024]

⁴ Le Robert, *en ligne*. Proxy. Dictionnaire le Robert, <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/proxy> [consulté le 05/08/2024]

2.1.2 Cadre conceptuel

2.1.2.1 Cadre thématique

Nous nous plaçons ici au sein d'un territoire délimité topographiquement (le bassin versant) : au-delà du système fluvial défini par Schumm (1977), qui se place dans une démarche d'analyse des « processus physiques », nous adoptons plutôt la notion d'hydrosystème tel que défini par Amoros et Petts (1993), qui intègre les notions de temporalité et d'écosystèmes en interaction. L'hydrosystème ainsi défini présente une variété de biotopes (composante physico-chimique, abiotique : ici principalement eau et sédiments) et de biocénoses (composante biotique : flore, fonge, faune y compris êtres humains). Notons cependant dès à présent que cette approche écosystémique pêche généralement à être pleinement définie à méso-échelle : l'écosystème (et/ou, si l'on intègre le fait que les sociétés humaines et leurs activités contribuent à façonner les espaces, l'anthrome (ou biome anthropique) (Ellis et Ramankutty, 2008)) est en effet défini soit à l'échelle planétaire (biosphère), soit à l'échelle du biotope, de l'habitat, c'est-à-dire à un espace restreint aux caractéristiques relativement uniformes. Au sein de la Zone Critique⁵, l'approche géographique, intégratrice des différentes échelles spatio-temporelles et adoptant un caractère explicitement situé, contraint par les activités et sociétés humaines, apparaît ainsi comme complémentaire aux approches développées par les écologues, qui ont toutefois su renouveler leur approche historique en intégrant les notions de trajectoire et d'impacts de l'activité humaine (Dufour et Lespez, 2020).

Depuis presque une dizaine d'années, nos travaux visent à étudier les flux hydro-sédimentaires dans les bassins versants actifs du Sud-Est de la France. Ces études s'inscrivent dans le champ de la géomorphologie fluviale, qui suppose d'analyser les relations de réciprocité et de contrainte entre les fluctuations de l'hydrosystème d'une part, et l'occupation du territoire (société et/ou biocénose) d'autre part. La présente méta-analyse de travaux réalisés se propose de venir prudemment compléter certaines propositions héritées de la pensée de géomorphologues français (Bravard et Piégay, 2000 ; Provansal et Leveau, 2006 ; Neboit, 2010 ; Cossart, 2018 ; Dufour et Lespez, 2020), en adoptant en particulier un angle d'analyse qui fait appel à la notion de contrainte réciproque au sein du binôme eau-sédiments, puis comme interface pour l'étude des relations entre climat et sociétés.

2.1.2.2 Cadre méthodologique et conceptuel

Nous l'avons évoqué (section 2.1.2.1), nos travaux prennent place au sein d'un hydrosystème qu'il convient de définir avant toute chose : le bassin versant constitue l'échelle technique pertinente (Chapuis et Collomb, 2012) pour appréhender le système de contraintes nécessaire à l'étude visée, ce qui n'empêche pas, par la suite, de travailler sur un tronçon d'étude plus réduit pour répondre précisément à la question posée. A plus large échelle spatiale, nos travaux s'inscrivent lorsque c'est possible dans une approche *source-to-sink* (Anthony et Julian, 1999 ; Ballantyne, 2002 ; Sømme et al., 2009 ; Cossart, 2014), qui vise à intégrer l'ensemble du système depuis les lignes de crête jusqu'à l'exutoire maritime (cf. Figure 7).

⁵ <https://www.ozcar-ri.org/fr/la-zone-critique/quest-zone-critique/> [consulté le 11/01/2024]

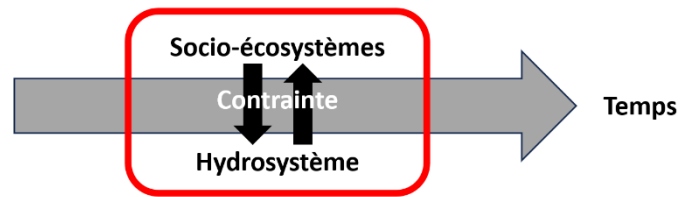


Figure 7. Cadre conceptuel d'étude. Le cadre rouge représente l'approche source-to-sink d'un point de vue « physique », ou encore l'approche systémique et interdisciplinaire qui sous-tend l'étude.

La notion de « socio-écosystème », telle que définie par Berkes et al., 2002 (in Dufour et Lespez, 2020), permet d'intégrer les composantes biotiques et abiotiques évoquées précédemment (section 2.1.2.1), tout en faisant référence à la notion écosystémique. En relation avec la dimension temporelle introduite par Amoros et Petts (1993), les relations de réciprocité et de contrainte entre les fluctuations de l'hydrosystème et les socio-écosystèmes (cf. Figure 7) sur le périmètre d'étude sont analysées en intégrant leur caractère (méta-)stable dans le temps : la question posée doit identifier le plus en amont possible le cadre de sa validité temporelle. Par exemple, le recensement des crues des torrents alpins (Pichard, 1999), intégré dans les chronologies de crues du bassin durancien entre 1200 et 1990 (Sivan et al., 2009) illustre la grande variabilité temporelle des épisodes de crue dans ce type de système, et donc celle des épisodes de transport sédimentaire, tant en fréquence qu'en intensité. De manière similaire, les fluctuations glaciaires dans les Alpes pendant le Petit Âge Glaciaire (cf. Figure 8) ont montré leur influence sur la production sédimentaire, en augmentant la disponibilité sédimentaire à l'aval de la zone englacée, et, sous réserve du transport de ces matériaux, peuvent contribuer à alimenter le réseau hydrographique en sédiments (Ballantyne, 2002 ; Cossart, 2014 ; Berthet, 2016 ; Guillon et al., 2022).

Enfin, d'un point de vue thématique plus spécifique, l'étude des flux hydro-sédimentaires nécessite d'intégrer la notion de (dis-)continuités sédimentaires telle que décrite par Fryirs et al. (2007) ou encore Cossart (2014).

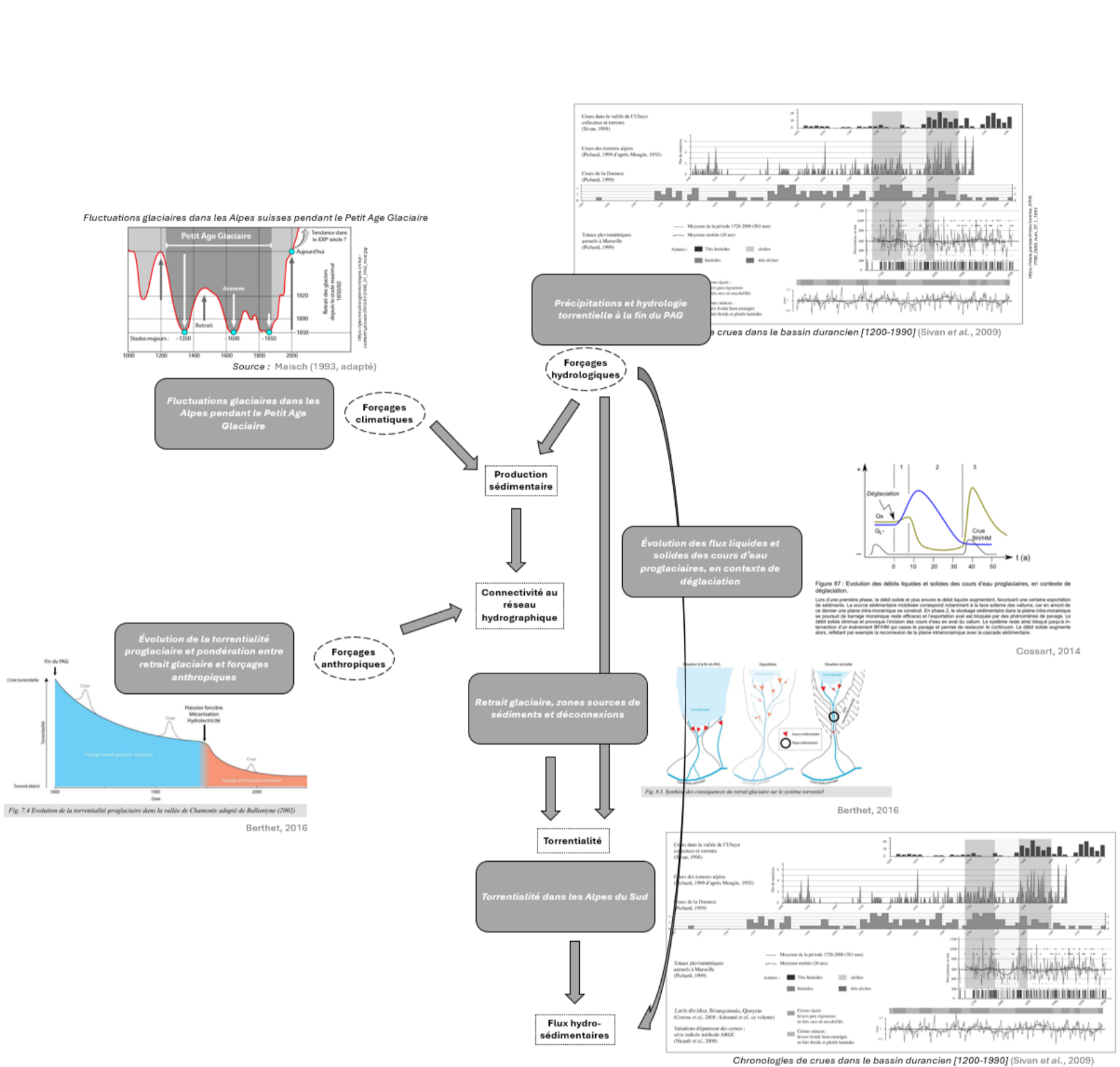


Figure 8. Schéma visant à expliciter la complexité et la variabilité spatiale et temporelle des différents forçages à intégrer dans le cadre d'une étude sur les flux hydro-sédimentaires dans les bassins versants.

2.1.2.3 Système de contraintes induit

Ces études supposent de dépasser des contraintes théoriques aussi bien que techniques. Concernant les contraintes théoriques, nous devons composer notamment avec la grande variabilité hydrologique des systèmes étudiés : l'influence méditerranéenne et/ou montagnarde conduisent ces systèmes à présenter un « régime ordinaire » très différent des événements exceptionnels, voire extrêmes qui peuvent survenir (Bravard et Petit, 1997 ; Chapuis et Collomb, 2012). A cela il faut ajouter l'éventuelle variabilité hydrologique induite par l'exploitation humaine des ressources hydriques, très fréquente dans ces systèmes à forte énergie : citons notamment les éclusées, et plus généralement les contraintes d'exploitation des ouvrages hydro-électriques. Une deuxième contrainte théorique réside dans la prise en compte des multiples « compartiments » que suppose cet objet d'étude (cf. Figure 9, issue de la Figure 1) : par exemple nous devons à la fois considérer le volet hydrologique et le volet sédimentaire, mais aussi suivant l'étude, la biocénose vs. les aménagements anthropiques... Il est dès lors indispensable de recourir à une approche systémique qui, si elle est riche d'enseignements, est nécessairement chronophage.

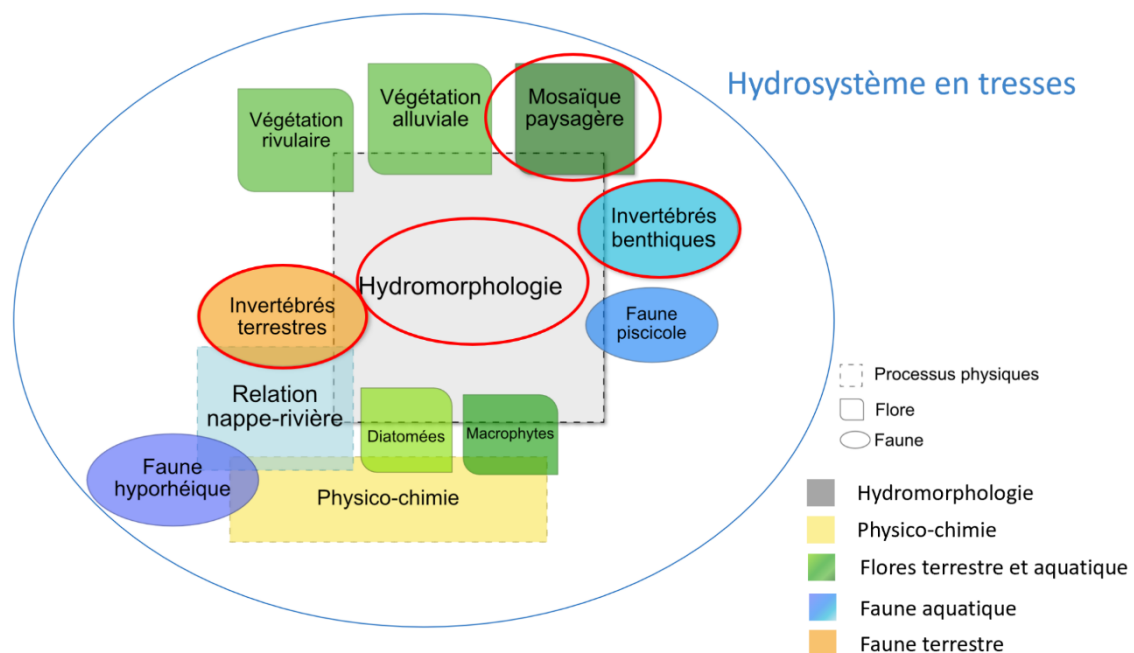


Figure 9. Illustration des différents compartiments des cours d'eau en tresses étudiés in Devreux (2023).

Le deuxième type de contraintes que nous devons dépasser est d'ordre technique, opérationnel. Par exemple, la réglementation impose une période d'intervention dans le lit des torrents de montagne en raison du frai des truites fario, limitée entre le 15 avril et le 15 octobre⁶ ; couplé aux contraintes hydrologiques (périodes de hautes eaux en contexte montagnard, avec des crues de fonte qui se poursuivent régulièrement jusqu'à mi-juin et qui empêchent une intervention en toute sécurité dans le lit), cela conduit à des plages très limitées pour le travail de terrain. Un autre exemple de contrainte technique réside dans la nécessité d'utiliser une instrumentation

⁶ <https://www.ardeche.gouv.fr/Actions-de-L-Etat/Environnement.-risques-naturels-et-technologiques/Eau-et-assainissement/Reglementation-et-police-de-l-eau/Les-travaux-en-riviere-et-l-entretien-des-cours-d-eaux> [consulté le 10/01/2024]

différente pour chaque type de donnée « de base », tant du point de vue hydrologique que sédimentaire : en effet les capteurs et protocoles seront différents suivant si l'on veut mesurer les hautes eaux ou les basses eaux, les Matières En Suspension (MES) ou la charge grossière. Là encore, ces contraintes, en plus d'être chronophages, supposent des compétences techniques multiples et des ressources financières démultipliées.

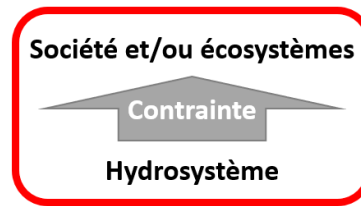
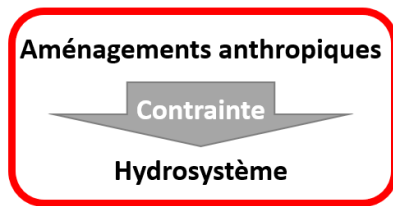
2.1.3 Méthodologie

Pour approfondir notre compréhension des flux hydro-sédimentaires dans les cours d'eau à forte énergie, nous avons choisi de déployer nos efforts sur le périmètre Sud-Est de la France. La pluralité des systèmes étudiés (cf. Figure 6) vise à capturer, à terme, ce qui fait la spécificité hydro-sédimentaire de ces hydrosystèmes influencés à la fois par un contexte méditerranéen et montagnard.

Ces hydrosystèmes peuvent être regroupés en cinq grands domaines dont le découpage reste géographiquement cohérent :

- Cours d'eau des Alpes du Nord : le système Arc-Isère
- Cours d'eau de transition Alpes-du-Nord/Alpes-du-Sud : le Drac
- Les torrents maralpins, sous influence montagnarde et/ou méditerranéenne : Roya, Vésubie, Var, Paillon
- La Durance, une rivière torrentielle des Alpes du Sud, et certains de ses affluents : le Verdon, la Bléone
- Les rivières cévenoles : Gardons et Ardèche.

Notons que tous ces hydrosystèmes, bien que sous différentes influences climatiques (cf. Chapuis et Collomb, 2012), ont la particularité de présenter des enjeux forts en termes de gestion des flux hydro-sédimentaires. Nous proposons ici de réanalyser certains de nos travaux en prenant soit le point de vue des aménagements anthropiques comme agents de contrainte sur l'hydrosystème, soit comme l'hydrosystème comme agent de contrainte sur la société et/ou les écosystèmes (cf. Figure 10).



- Impact des aménagements hydro-électriques sur l'évolution des zones de frayères en Roya (Chapuis *et al.*, 2019a)
- ■ Évolution du tressage suite à des opérations de restauration sur des rivières en tresses (Devreux *et al.*, 2022a)
- Interactions socioécologiques entre flux hydro-sédimentaires, usages associés au cours du temps et milieux (frise chronosystémique: d'après Serrhini Naji, 2021, in Chapuis *et al.*, 2023)
- ■ Aménagements hydro-électriques et extractions (Chapuis, 2019a, 2019b et 2019c)
- ■ Définition d'indicateurs morphologiques et écologiques de « bonne santé » des rivières en tresse (Devreux *et al.*, 2022b ; Devreux *et al.*, 2023)
- Variabilité des cours d'eau intermittents méditerranéens (Chapuis, 2019b)
- Effets d'une crue d'occurrence pluri-centennale en Roya: sur la ressource en eau et sur l'occupation du bassin versant (Liébault *et al.*, 2024; Piton *et al.*, 2024)
- Gestion pluri-annuelle des flux sédimentaires en Savoie (Chapuis *et al.*, 2015)
- ■ Spécificités hydro-sédimentaires dans les Cévennes (Chapuis *et al.*, 2023)

Figure 10. Systèmes de contraintes associés aux travaux menés. Le périmètre spatial des études associées est rappelé par le codage couleur, en relation avec les ensembles hydrographiques identifiés dans la Figure 6.

La grande variabilité des échelles spatiales et temporelles à considérer implique d'utiliser une pluralité d'outils, issus de disciplines différentes, ce qui suppose des compétences variées tout autant que pointues pour les opérateurs. Sans entrer dans le détail, nous pouvons regrouper les outils utilisés en deux grandes familles, très complémentaires : l'instrumentation de terrain vs. les outils informatiques (cf. Figure 11). Notons que l'instrumentation de terrain utilise aussi des outils informatiques, mais dont la complexité d'utilisation « directe » est en général moindre bien qu'elle reste toujours technique. Le volet programmation est ici distingué des volets SIG et modélisation en cela qu'il peut être utilisé en pré-traitement/traitement « pur » de données brutes.

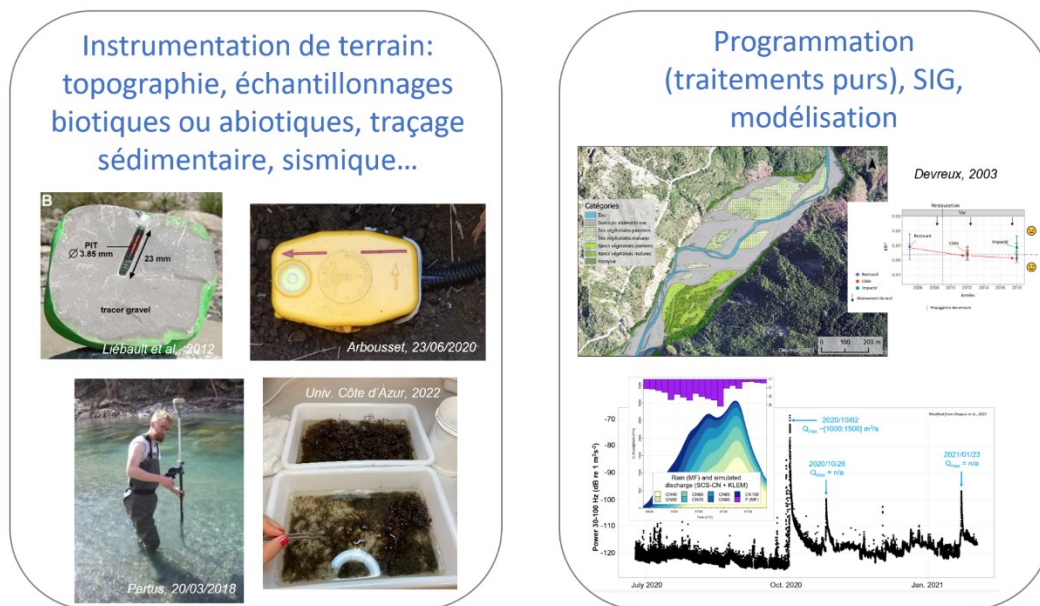


Figure 11. Une pluralité d'outils issus de disciplines différentes, pour une approche complémentaire entre instrumentation de terrain et outils informatisés.

2.1.4 Résultats

Nous rappelons en tête de chaque sous-section les travaux menés à Université Côte d'Azur auxquels se réfèrent les résultats évoqués.

2.1.4.1 Contraintes induites par les aménagements anthropiques sur les hydrosystèmes

Etude de l'influence des aménagements hydro-électriques sur l'évolution des frayères de truites (Chapuis et al., 2019a)

Le caractère torrentiel de la Roya (Alpes-Maritimes, exutoire à Vintimille en Italie) et l'occurrence d'intenses crues éclair, typiques du régime méditerranéen, en font un système fluvial particulièrement actif du point de vue hydromorphologique. L'étude portait plus précisément sur l'évolution morphosédimentaire des frayères à truites, en intégrant la possible influence des éclusées sur leur dynamique. A cet effet, nous nous concentrons ici sur un site d'étude en particulier (aval de Breil-sur-Roya), dont le sous-bassin drainé correspond environ aux 2/3 du bassin versant total du fleuve, et pour lequel un suivi topographique avait été réalisé entre mars 2018 et avril 2019. Le matériel sédimentaire des zones de frai était suivi par traçage RFID passif, de même que l'ensemble de la gamme granulométrique présente dans le lit. Plus de 800 traceurs ont ainsi été déployés sur 3 sites différents entre mars 2018 et avril 2019.

Deux épisodes de crue peu intenses ont été suivis en 2018 et 2019. Malgré cette hydrologie limitée ($< Q_2$), les deux campagnes de suivi ont mis en évidence une remobilisation importante du matériel du lit, et un renouvellement total du matériel constitutif des frayères. Les analyses suggèrent un contrôle hydraulique de l'emplacement de la frayère et un renouvellement régulier du matériel qui la compose : cette mobilité fréquente du matériel sédimentaire des frayères en garantit ainsi la qualité pour le frai. Ces résultats sont par ailleurs confirmés sur un autre site ne subissant pas d'éclusée (St Dalmas-de-Tende), où les zones de frai sont également de bonne qualité. Ainsi la mobilité fréquente du matériel sédimentaires est observée pour des crues « ordinaires » (de fréquence de retour infra-annuelle), mais également, au moins en partie, lors des éclusées.

Quand on considère les contraintes induites par des aménagements sur les hydrosystèmes, cette étude représente un exemple particulier et atypique : les aménagements hydro-électriques constituent certes, comme pour d'autres hydrosystèmes, des contraintes (dérivation des débits, infrastructures dans le lit mineur...). Mais dans ce cas précis, du fait notamment des caractéristiques morphologiques du cours d'eau (forte pente, gamme granulométrique du matériel sédimentaire dans le lit) et des modalités de gestion des éclusées (débits, fréquence), la gestion des ouvrages hydro-électriques ne semble pas être un inconvénient pour la qualité du matériel des zones de frai : cela aurait plutôt un effet positif, comme cela peut parfois survenir (Kondolf et al., 2013).

Evolution du tressage à la suite d'opérations de restauration sur des rivières en tresses

(Devreux et al., 2022a)

De nombreux cours d'eau sont altérés par les activités anthropiques. Pour atteindre le bon état requis par la DCE, certains nécessitent une restauration afin de ne pas aggraver les menaces pesant sur les écosystèmes (disparition d'espèces, écosystème en déséquilibre) et les sociétés (risque d'inondation, glissement de terrain, rupture de digue etc.). A partir d'un diagnostic de la dynamique hydromorphologique de tronçons restaurés sur six rivières en tresses (Bléone, Drac, Durance, Var, Roya et Mareta (Italie)), nous avons analysé l'évolution spatiale et temporelle du tressage sur des couples « tronçon restauré vs. tronçon cible » grâce à deux types d'indicateurs hydromorphologiques : la largeur de la bande active (W^*) et le caractère plus ou moins actif de la tresse (Bed Relief Index : BRI^*) (Piégay et al., 2009, Liébault et al., 2013). Nous avons ainsi caractérisé l'évolution à long terme du fonctionnement des hydrosystèmes, pour aboutir à une approche régionale et à un retour d'expérience des opérations de restauration (opérations d'abaissement de seuils transversaux à vocation de stabilisation du fond du lit et/ou d'adduction d'eau).

L'étude a permis de discriminer l'état des hydrosystèmes en tresses avant vs. après restauration, qui sont donc manifestement réactifs à ces contraintes. Ceci met en évidence, en creux, les contraintes (morphodynamiques ici) induites par ce type d'aménagements anthropiques (mise en place de seuils, abaissement ou suppression de ceux-ci) sur les hydrosystèmes en tresses.

Plus particulièrement, le jeu de données analysé suggère que le temps de résilience des hydrosystèmes étudiés peut être plus long que ce qui est attendu (Lake, 2013) : dans le cas du Mareta, plus d'une dizaine d'années, en l'absence de crue morphogène pendant cette période. Ceci suggère que, bien qu'étant considérés comme « dynamiques » et « réactifs », ces systèmes en tresses continuent à réagir d'un point de vue morphologique aux aménagements anthropiques dont ils font l'objet même après plusieurs années : le système de contraintes induit à un instant t continue de produire un effet même après suppression dudit système de contraintes (effet de relaxation) et souligne la nécessité de retours d'expérience sur plusieurs années lors d'opérations de restauration (Habersack et al., 2007).

2.1.4.2 Contraintes induites par les fluctuations de l'hydrosystème sur la société et/ou sur les écosystèmes

Variabilité spatio-temporelle des rivières en tresses : définition d'indicateurs morphologiques et écologiques pertinents en contexte dynamique

(Devreux et al., 2022b ; Devreux, 2023 ; Devreux et al., 2023 ; Devreux et al., submit.)

Les cours d'eau en tresses des Alpes ont été exploités pendant des décennies pour leurs ressources, et profondément modifiés. Mais au-delà des impacts des activités anthropiques sur ces hydrosystèmes, par ailleurs bien documentés du point de vue des modifications morphologiques (par exemple dans les Alpes du Nord : Peiry et al., 1994), l'objectif est ici de pointer que les fluctuations de l'hydrosystème peuvent induire des contraintes sur les écosystèmes, par exemple sur les communautés des invertébrés aquatiques. Ceci est par ailleurs particulièrement significatif dans les rivières intermittentes (Datry et al., 2023). Or les rivières en tresses telles que le Drac, sont elles aussi particulièrement sujettes à des variations hydrologiques et morphologiques. Les variations spatio-temporelles des flux hydro-sédimentaires dans ces cours d'eau en tresses font qu'il est nécessaire, pour les décrire, de définir des indicateurs qui prennent en compte le caractère méta-stable des formes du lit. En retour, ces formes du lit constituent des habitats à méso-échelle pour les macro-invertébrés benthiques, dont l'évaluation de l'état des communautés doit, également, incorporer cette variabilité spatiale et temporelle des habitats. Nous avons ainsi élaboré un protocole d'échantillonnage basé sur 4 échelles spatiales emboîtées (station, macro-, méso- et micro-échelle) et utilisé à la fois une approche hypothético-déductive et une approche BACI (*Before-After-Control-Impact*: Marteau et al., 2022) sur les traits biologiques et écologiques des invertébrés benthiques. Nous avons pu démontrer d'une part l'intérêt de prendre en compte la diversité des chenaux dans le protocole d'échantillonnage, et d'autre part qu'en l'absence de crue morphogène post-restauration, la morphologie du cours d'eau a moins d'effet sur la composition des communautés que la variabilité inter-annuelle des communautés. Nous illustrons donc que les fluctuations de l'hydrosystème, ici liées à la morphodynamique fluviale, peuvent induire des contraintes sur les écosystèmes (en tresses).

Variabilité spatio-temporelle des rivières intermittentes méditerranéennes : peut-on composer avec l'« espace de liberté » nécessaire au cours d'eau ?

(Chapuis et al., 2019b)

Le cours d'eau du Paillon est un exemple de cours d'eau intermittent qui, soumis à un régime méditerranéen, présente des contrastes hydrologiques remarquables : le lit est à sec la majeure partie du temps, et des crues-éclair, intenses, surviennent de manière irrégulière (de Saint Seine, 1995). Lorsque c'est le cas, le cours d'eau est capable de transporter de fortes charges sédimentaires et génère une mobilité latérale qui peut s'avérer destructrice. Pour accompagner l'urbanisation de la vallée et ces épisodes intenses, mais imprévisibles et peu fréquents, le cours d'eau a été historiquement endigué dans sa traversée de Nice. Ainsi la largeur de bande historiquement active du cours d'eau en tresses, qui correspond approximativement à son « espace de liberté » nécessaire pour assurer, notamment, sa capacité d'évacuation des eaux en crue (Piégay et al., 2005), est passée de plus d'un kilomètre de large à moins de 100 m de large dans sa partie endiguée. Mais surtout, pour exploiter au maximum un espace très précieux (Kondolf et al., 2013), le Paillon a été recouvert sur une longueur de plus de 2 km. Ceci correspond à une catastrophe annoncée, car il surviendra nécessairement un épisode de crue qui dépassera la capacité d'évacuation du chenal : une rupture de la couverture pour évacuer l'eau et les matériaux charriés est prévisible.

Cette exploitation du lit du cours d'eau, ordinairement à sec, constitue un exemple de la complexe cohabitation entre la société et l'hydrosystème : bien que permettant une continuité urbaine très utile au quotidien, le choix de recouvrir le Paillon constitue un risque accru en cas de rupture de la couverture et illustre la difficulté d'habiter un bassin de risque en zone méditerranéenne.

[Effets d'une crue d'occurrence pluri-centennale en Roya \(tempête Alex du 02 oct. 2020\) sur l'occupation du fond de vallée, les versants et la ressource en eau](#)

(Liébault et al., 2024 ; Piton et al., 2024)

La tempête Alex du 02 oct. 2020 a essentiellement impacté deux bassins versants des Alpes-Maritimes : la Roya et la Vésubie (ONF-RTM et al., 2023a ; ONF-RTM et al., 2023b). Les précipitations extrêmes (temps de retour compris entre 500 et 1000 ans en 24 h sur la Roya ; CEREMA, 2021) ont généré une explosion de la bande active (dont la largeur a été plus que multipliée par deux sur la Roya), générant une métamorphose fluviale d'un style en seuil-mouille vers un style tressé sur la quasi-totalité du linéaire.

La période de retour de l'événement peut être qualifiée différemment suivant le paramètre observé (précipitations, débits, morphologie, débordements) et le secteur considéré (français ou italien). Pour la Roya, nous pouvons proposer la synthèse présentée dans le Tableau 1, et renvoyons le lecteur aux références indiquées pour plus de précision.

Les réponses morphologiques à cet événement exceptionnel ont souligné la cascade sédimentaire à l'œuvre au sein du réseau hydrographique, et ont mis en évidence un rôle modéré de la connectivité aux versants, par opposition au rôle essentiel des remaniements des stocks en fond de vallée. Les érosions de terrasses alluviales dans la formation du lit post-crue ont ainsi été évaluées comme déterminantes. Le recrutement de bois flottant depuis les ripisylves et son transport jusqu'à l'embouchure en Méditerranée (Piton et al., 2024) ont mis en évidence une connectivité longitudinale qui souligne, du point de vue du bois flottant également, l'importance de l'approche *source-to-sink* pour de tels événements, qui suppose en sus ici une approche transfrontalière.

En parallèle des effets morphologiques de la tempête Alex sur les versants, le lit et le fond de vallée, l'impact sur la ressource en eau a été critique. En effet, immédiatement après l'événement, une baisse drastique du niveau de la nappe a été observée dans la basse vallée (SMIAGE, 2020), ce qui a généré des contraintes d'exploitation significatives. Or cette exploitation représente une ressource essentielle pour alimenter plus de 350 000 personnes sur le périmètre de la Riviera franco-italienne (Andora (SV), Vintimille, Monaco, Menton). Il est probable que suite aux modifications morphologiques observées dans le lit, le régime d'échange entre la nappe et la rivière a été singulièrement altéré, via le colmatage de certaines zones du lit, auparavant dépourvues de dépôts de sédiments fins conséquents (Genevier et Ibba, 2020 ; Regione Liguria, 2021). Notons que pour étudier ces échanges nappe-rivière, l'élaboration d'un modèle hydrogéologique pour expliquer le fonctionnement de l'hydrosystème est un préalable indispensable (BRGM, 2020), et demande ensuite à être validé.

En parallèle de cet effet sur la ressource en eau, critique pour la société humaine, la tempête Alex a profondément affecté les écosystèmes : nous l'avons vu avec le recrutement de grandes quantités de bois flottant issus des ripisylves (Piton et al., 2024), mais également au niveau des populations piscicoles. En effet, avant crue, les populations de truites étaient très structurées génétiquement, avec à l'aval de la partie française une proportion importante d'allèles natifs

(Méditerranéens), a contrario d'une zone amont caractérisée par une forte proportion d'allèles exogènes (Atlantiques). Cette structuration se retrouve globalement après crue, mais avec une très faible proportion d'individus purs méditerranéens trouvés à l'aval en comparaison des individus d'origine Atlantique, ce qui suggère de mettre en place des mesures de gestion spécifiques, via une limitation du rempoissonnement pour favoriser le maintien et le retour progressif de la souche méditerranéenne (Blanchet, 2022).

Un événement d'une telle intensité illustre la cascade de processus climatiques, hydrologiques, géo- et hydro-morphologiques, et leurs effets sur les sociétés (infrastructures, bâti, ressource en eau...) et les écosystèmes (ripisylve, populations piscicoles). Dans ce cas de figure, c'est le phénomène torrentiel qui a été particulièrement remarquable, et donc, plus que la fraction « eau », c'est la fraction sédimentaire qui s'est trouvée au centre de ce nexus. A ce titre, cet événement illustre donc particulièrement bien la dimension de « *proxy* » que revêtent les flux sédimentaires dans les interactions climat-société.

Tableau 1. Synthèse des périodes de retour correspondant à la tempête Alex du 02/10/2020 en Roya, en fonction du paramètre considéré (précipitations, débits, morphologie, débordements).

Paramètre	Secteur	Période de retour	de	Source	Remarque
Précipitations sur 3 h, sur 24 h	français	> 1000 ans		CEREMA, 2021	
Débits	français	100-500 ans		Payrastre et al., 2022	Tous les instruments de mesure ont été détruits lors de l'événement
	italien	n.r.		Regione Liguria, 2021	Les instruments de mesure ont été endommagés lors de l'événement
Morphologie	français	600-1000 ans		Piton et al., 2021	En tous cas pas une telle morphogénèse depuis 70 ans (Liébault et al., 2024)
	italien	n.r.		Regione Liguria, 2021	Des désordres ont été observés, limités à la bande active endiguée (ripisylve, bancs fluviaux médians)
Débordements	français	n.p.		ONF-RTM 2023a et al.,	Phénomène torrentiel avec transport de sédiments
	italien	200 ans		Regione Liguria, 2021	Phénomène d'inondation

n.p. : non pertinent

n.r. : non renseigné

2.1.5 Discussion : développement de modèles conceptuels

Au-delà des résultats directement issus des travaux présentés ci-avant, et qui ont généralement fait l'objet d'une ou plusieurs publications dans des revues spécialisées, nous souhaitons ici mettre en avant la démarche sous-jacente, qui nécessite un temps bien plus long que celui des publications « classiques » : celle de développer des modèles conceptuels des flux hydro-sédimentaires à l'échelle d'un bassin versant. En cela, nous proposons une relecture des connaissances acquises « individuellement », pour produire une méta-analyse des différents travaux menés.

Ces modèles conceptuels évoqués sont presque nécessairement amenés à évoluer au fur et à mesure de l'accumulation de connaissances sur un bassin versant (Crozat et al., s.d. ; Calvet, 2006), car la complexité des objets étudiés et l'aspect pluri- voire trans-disciplinaire ne permet pas, d'entrée de jeu, de capturer toutes les spécificités du système. Ces modèles conceptuels développés sont ainsi largement *évolutifs*, qu'ils se placent à l'échelle régionale ou à l'échelle d'un bassin versant « strict », i.e. respectant l'unité *source-to-sink*.

Nous proposons d'illustrer ce que peuvent être ces modèles conceptuels via deux exemples : à l'échelle régionale, en nous appuyant sur l'étude des spécificités hydro-sédimentaires des Cévennes par rapport à d'autres bassins versants sous régime méditerranéen ou des « Alpes-du-Sud » (Chapuis et al., 2023). Puis, à l'échelle du bassin versant, en prenant l'exemple de l'élaboration continue d'un modèle conceptuel des flux hydro-sédimentaires en Roya, tout d'abord en régime ordinaire (Chapuis et al., 2022a), puis en intégrant un réajustement du modèle suite à la survenue d'une crue extrême, qui a permis d'ancrer la première version du modèle dans un cadre temporel plus large (Chapuis et al., 2022b ; Chapuis et Adnès, 2023).

2.1.5.1 A l'échelle régionale

Cet exemple s'appuie sur une étude menée à l'échelle régionale (SE de la France), dans le cadre du projet DHySed-7⁷. Ce projet, financé par la ZABR⁸ et l'AERMC⁹ entre 2021 et 2023 et qui s'appuie sur l'IR OZCAR¹⁰, avait pour objectif de cerner les spécificités hydro-sédimentaires des hydrosystèmes cévenols par rapport à d'autres bassins versants. Visant à faire le lien entre les caractéristiques climatiques cévenoles vs. méditerranéennes vs. « Alpes du Sud », et les enjeux de gestion des bassins versants, le projet illustre tout à fait le rôle d'interface, d'intermédiaire, joué par les flux hydro-sédimentaires entre climat et société.

Pointons que le terme d'épisode cévenol et d'épisode méditerranéen sont historiquement employés indifféremment (Météo France, 2023), ce qui contribue à interroger s'il existe des spécificités liées aux précipitations en région cévenole. Précisons donc que nous considérons qu'un épisode de précipitations est qualifié de « cévenol » lorsque le caractère orographique des précipitations est marqué, et que si l'effet orographique est limité, nous parlerons plutôt d'épisode méditerranéen.

Les climats cévenol et méditerranéen sont connus pour leurs violents systèmes orageux, qui apportent des précipitations intenses notamment à l'automne. Le transport sédimentaire consécutif à ces épisodes de précipitations intenses peut être notable, comme par exemple lors

⁷ <https://www.zabr.assograie.org/action/dhysed-7-identification-des-specificites-des-dynamiques-hydro-sedimentaires-dans-les-cevennes/> [consulté le 11/01/2024]

⁸ Zone Atelier Bassin du Rhône, <https://www.zabr.assograie.org/> [consulté le 11/01/2024]

⁹ Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, <https://www.eaurmc.fr/> [consulté le 11/01/2024]

¹⁰ Infrastructure de Recherche OZCAR, <https://www.ozcar-ri.org/fr/accueil/> [consulté le 11/01/2024]

des crues dans le bassin versant de la Lieure (affluent du Gardon de Saint-Jean Amont suite à la crue du 19/09/2020), où le cumul de pluie en 24 h a dépassé 600 mm (Météo France, s.d.(a)), ou encore lors des crues de la Cèze et de l'Ardèche le 09/09/2018 (Météo France, s.d.(b)) (cf. Figure 12).



(a) © P.-A. Ayrat



(b) © P.-A. Ayrat



(c) Cliché oct. 2018.



(d) © HyMeX

Figure 12. (a) et (b) Bassin versant de la Lieure, affluent du Gardon de Saint-Jean amont suite à la crue du 19/09/2020 – Cumul de pluie supérieur à 600 mm en 24h. In Chapuis et al., 2023. (c) et (d) Montclus sur la RD980, Valat de Boudouyre, un affluent de la Cèze. Débit estimé à 300 m³/s lors de la crue du 09/09/2018.

Le projet DHySed-7 s'est appuyé sur une mise en relation entre pluies, débits, érosion et transport sédimentaire pour évaluer les enjeux associés à la gestion du transport sédimentaires dans les hydrosystèmes cévenols (Gardons, Ardèche) par rapport à d'autres systèmes connus pour leur exposition aux intenses épisodes méditerranéens (Gapeau) et/ou leurs exports intenses de matériel sédimentaire (Bléone) (cf. Figure 13).

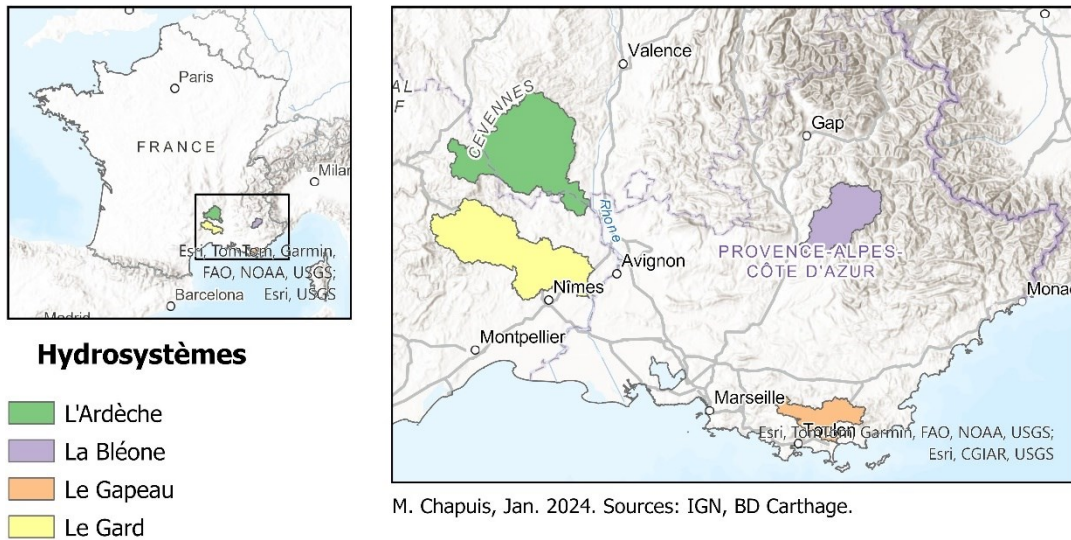
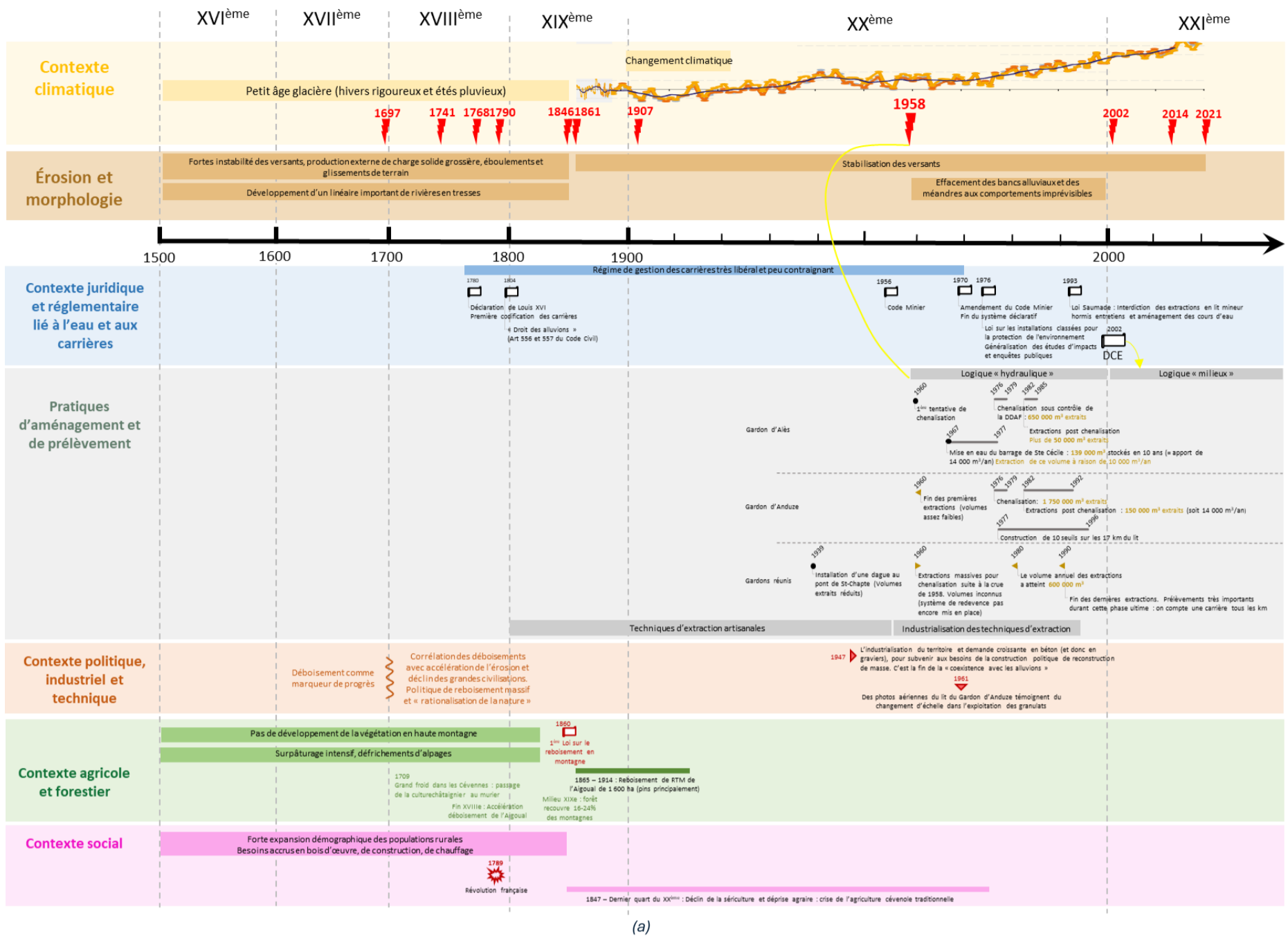
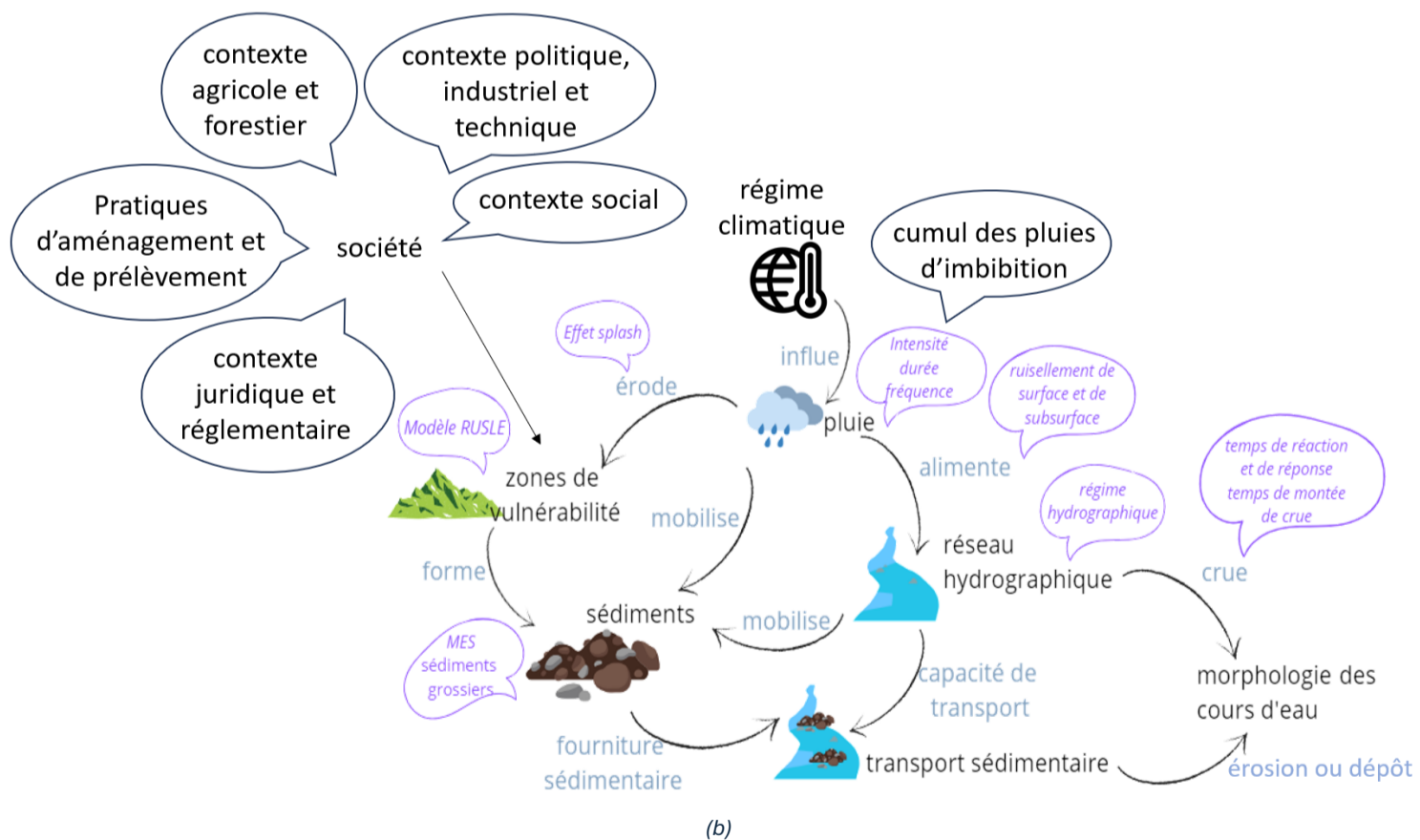


Figure 13. Les 4 bassins versants étudiés dans le cadre du projet DHySed-7.

Nous avons pu identifier d'un point de vue hydrologique que le bassin des Gardons se démarque, avec des cumuls depuis le début de la saison (pluies d'imbibition) et des intensités horaires plus élevés que les autres bassins versants de l'Ardèche, de la Bléone et du Gapeau. Bien que les résultats issus du volet sédimentaire soient très partiels, il ressort que « le domaine cévenol est caractérisé par des exports modérés de Matières En Suspension (MES) par rapport à d'autres bassins versants (Bléone notamment) lors des crues ordinaires. Il n'est cependant pas exclu que des pics d'export (MES, sédiments grossiers) aient lieu lors des événements exceptionnels, comme ce fut le cas lors de l'épisode exceptionnel du 19/09/2020 sur l'amont des bassins versants du Gardon et de l'Hérault » (Chapuis et al., 2023). Mais l'apport du projet réside surtout dans la mobilisation croisée d'outils issus des « sciences humaines » et des « sciences environnementales » (frise chrono-systémique, questionnaires, analyse de données, analyses de robustesse, instrumentation de terrain, imagerie...), qui permet de réellement aboutir à une vision transversale du continuum entre climat, pluie, débits, érosion, transport sédimentaire et relation des sociétés à l'hydrosystème (cf. Figure 14).



(a)



(b)

Figure 14. Exemples de productions réalisées dans le cadre du projet DHySed-7. (a) Frise chrono-systémique de l'histoire extractive des sédiments en Cévennes, depuis le XVII^{ème} siècle (modifié d'après G. Serrhini Naji, 2021). (b) Mind map des interconnexions entre climat, pluie, débits, érosion, transport sédimentaire et société (modifié d'après L. Petri, 2023).

A la suite des réflexions menées dans le cadre du projet, nous avons élaboré un modèle conceptuel du changement climatique sur le transport sédimentaire dans les Cévennes et ses conséquences sur les socio-écosystèmes, qui place effectivement la fraction sédimentaire à l'interface entre climat et sociétés (cf. Figure 15).

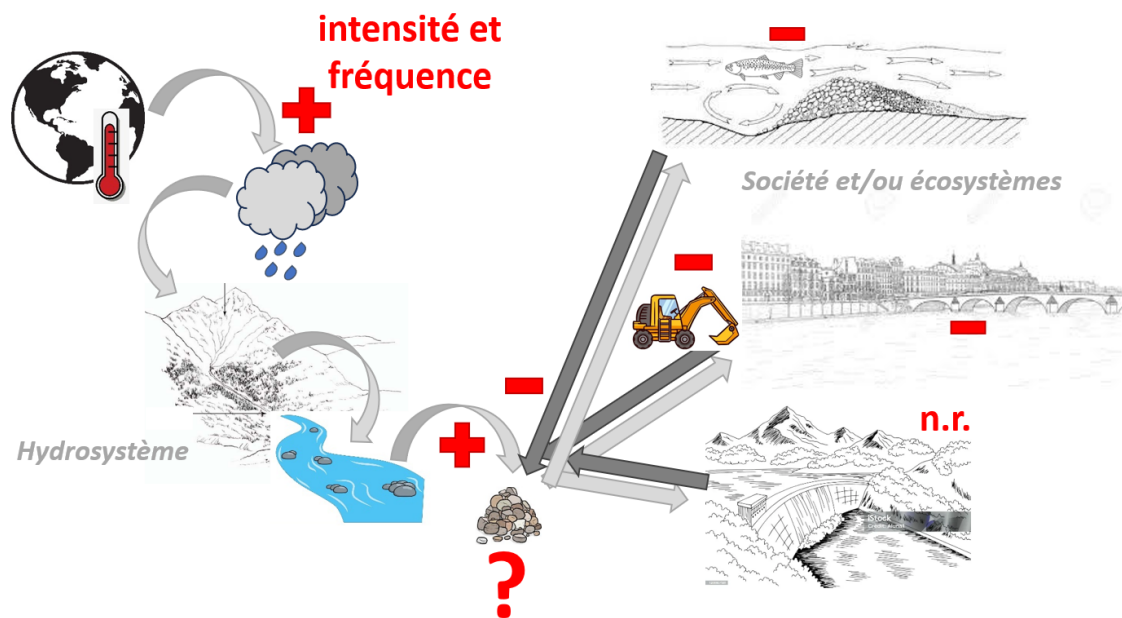


Figure 15. Modélisation conceptuelle du changement climatique sur le transport sédimentaire dans les Cévennes et influences croisées sur les socio-écosystèmes. Effet d'accentuation (+) vs. effet d'atténuation (-) vs. effet indéfini (?) du processus.

Cette modélisation se lit ainsi : le réchauffement global induit une augmentation de l'intensité et de la fréquence des précipitations sur le bassin versant ; dans les deux cas, cela devrait conduire à une augmentation du transport solide (+). Les populations piscicoles contribuent (probablement très modestement) à une stabilisation du matériel sédimentaire via la constitution de frayères (-). Les endiguements et ouvrages de franchissement contribuent à un déficit sédimentaire (-) tandis que les ouvrages transversaux (tancats en Cévennes) ont eu un effet de stockage du matériel sédimentaire (Martin, 2006), mais leur rôle actuel n'est pas documenté (n.r.). Les extractions massives ont occasionné une réduction drastique du matériel sédimentaire disponible pour le transport (-). Ainsi, les effets résultants sur le matériel sédimentaire disponible pour le transport dans le chenal sont multiples, et potentiellement antagonistes, ce qui illustre le caractère indéfini (?) des effets combinés du climat et des sociétés/écosystèmes sur le transport solide en Cévennes.

2.1.5.2 A l'échelle d'un bassin versant

A l'échelle du bassin versant de la Roya, nous pouvons illustrer comment l'élaboration d'un modèle conceptuel des flux hydro-sédimentaires peut être un processus continu, qui se nourrit des nouvelles connaissances acquises sur le périmètre d'étude (Crozat et al., s.d. ; Calvet, 2006).

Un premier modèle des flux hydro-sédimentaires a tout d'abord été élaboré en régime ordinaire (Chapuis et al., 2022a) (cf. Figure 16). Il a notamment servi de support pour élaborer une réflexion sur les priorités de gestion des flux sédimentaires en Roya italienne (Regione Liguria, 2021).

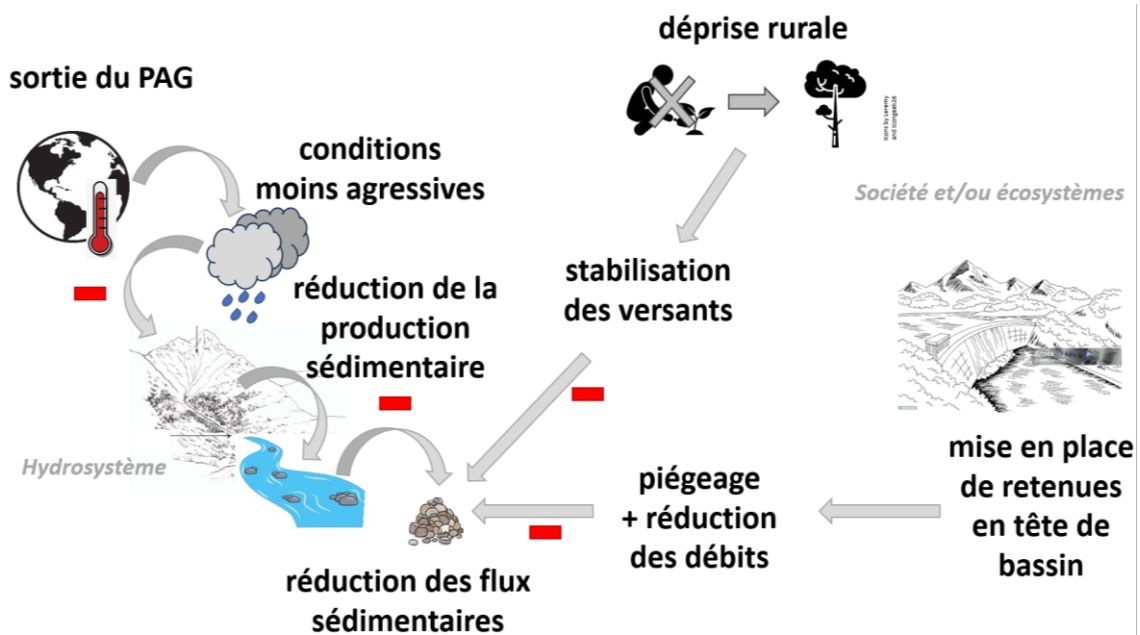


Figure 16. Modélisation conceptuelle de l'influence du changement climatique sur les flux hydro-sédimentaires en Roya suite à la sortie du Petit Âge Glaciaire (PAG). Effet d'accentuation (+) vs. effet d'atténuation (-).

Cette modélisation se résume ainsi : la sortie du PAG induit une réduction de la production sédimentaire (-), de même que la déprise rurale induit une révégétalisation des versants et donc ici leur stabilisation, donc une diminution de la production sédimentaire issue des versants (-). La mise en place de retenues en tête de bassin correspond à un piégeage des sédiments et à une réduction de des débits dans le chenal, donc là aussi cela correspond à une diminution du transport solide (-). Tous ces effets recensés tendent vers une même direction : la réduction du transport solide, d'où un système déficitaire, en déstockage, et l'observation d'une incision sur de larges portions du linéaire ainsi qu'un pavage du lit.

Suite à une crue d'occurrence pluri-centennale en Roya (tempête Alex du 02 oct. 2020 : Carrega et Michelot, 2021 ; CEREMA, 2021, Payrastré et al., 2022), ce modèle a fait l'objet d'un réajustement pour intégrer les enseignements que donnait la survenue d'un épisode aussi exceptionnel (Chapuis et al., 2022b ; Chapuis et Adnès, 2023 ; Liébault et al., 2024 ; Piton et al., 2024). A l'échelle internationale, aucun événement d'occurrence pluri-centennal n'avait jusqu'à présent pu être suivi dans le cadre d'un traçage sédimentaire. Ainsi, la nouvelle version du modèle conceptuel des flux hydro-sédimentaires en Roya s'inscrit dans un cadre temporel plus large, en venant compléter plutôt que questionner la première version (cf. Figure 17).

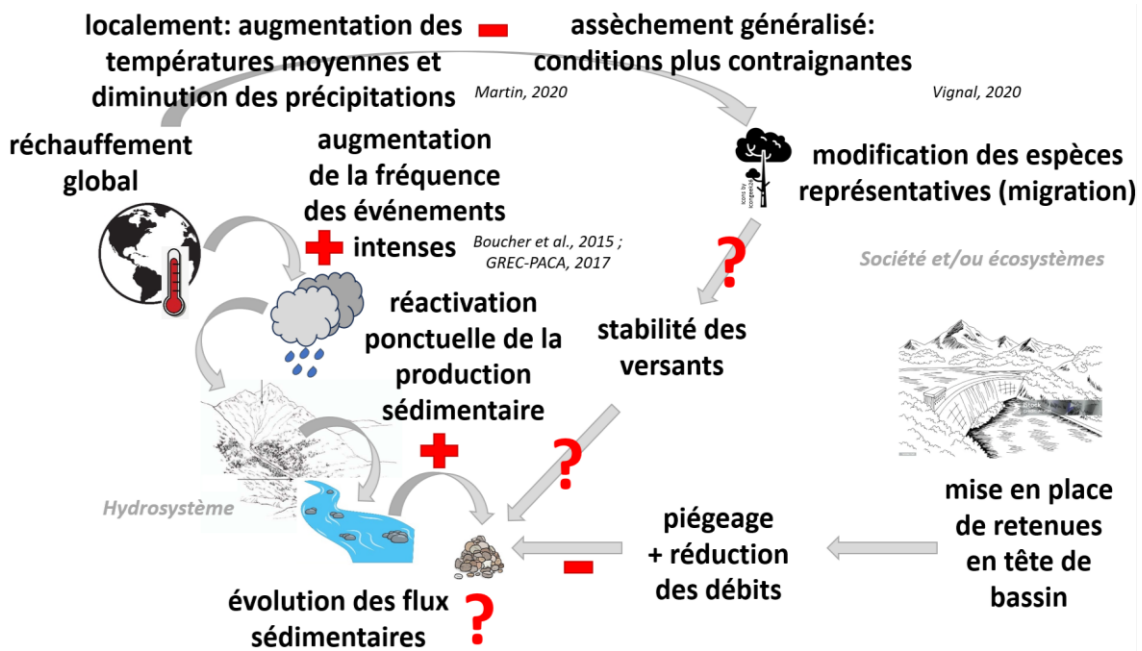


Figure 17. Réajustement du modèle conceptuel des flux hydro-sédimentaires en Roya suite aux précipitations de période de retour 1000 ans survenues le 02/10/2020. Effet d'accentuation (+) vs. effet d'atténuation (-) vs. effet indéfini (?).

2.1.6 Conclusion

En proposant de considérer les flux hydro-sédimentaires comme un proxy des interactions climat-société au sein d'un bassin versant, nous adoptons une approche transdisciplinaire et écosystémique au sein de la géomorphologie fluviale, qui nous pousse à étudier les processus physiques en jeu au sein de multiples compartiments, à l'aide d'outils variés, tout en dépassant les limitations spatiales d'une étude, nécessairement circonscrite à unité spatiale pertinente, en l'inscrivant dans un cadre régional. En évaluant les relations de réciprocité et de contrainte au sein des socio-éco-systèmes (cf. Figure 18) et les logiques d'aménagement du territoire associées, ces recherches présentent des déclinaisons opérationnelles souvent assez immédiates, ce qui permet de les ancrer à la fois dans un territoire et dans une temporalité qui intéresse les sociétés.

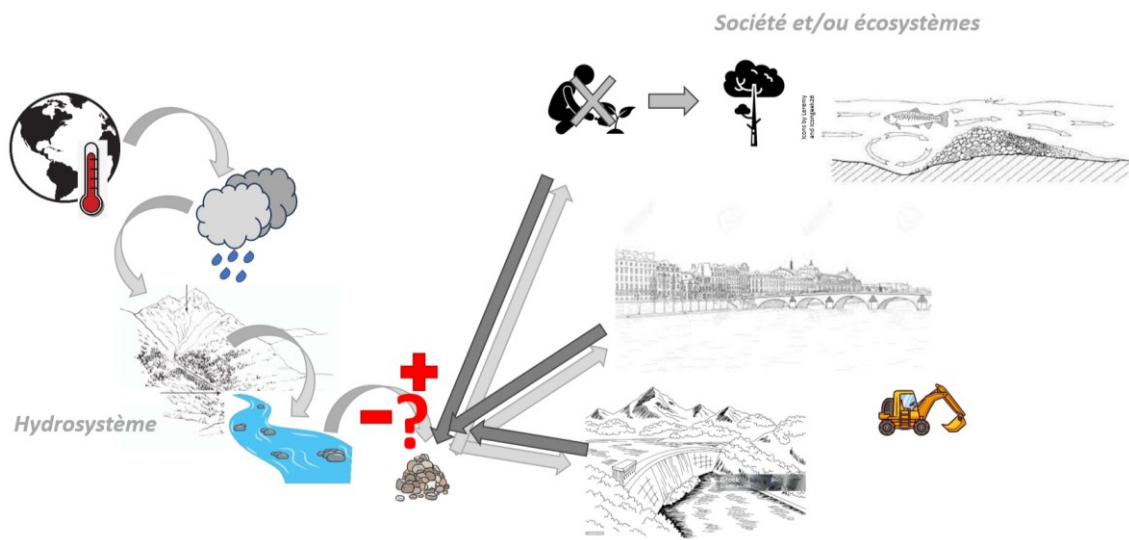


Figure 18. Les flux hydro-sédimentaires, un proxy des interactions climat-société à l'échelle d'un bassin versant : schématisation conceptuelle du système d'analyse utilisé en géomorphologie fluviale.

Par ces approches croisées, nous nous plaçons au cœur de la démarche géographique et tentons d'acquérir une vision systémique des territoires étudiés en prenant pour point d'entrée les flux hydro-sédimentaires. Nous proposons un balayage de méthodologies récentes qui peuvent être employées en géomorphologie fluviale pour capturer certains aspects des interactions climat-société sur l'unité territoriale que représente un bassin versant, dans une logique de compréhension des processus physiques (chroniques pluri-annuelles, événements extrêmes), de leurs conséquences sur les hydro-éco-systèmes et sur les logiques d'aménagement du territoire associé.

2.2 Transferts sédimentaires dans un bassin versant à régime montagnard sous influence méditerranéenne (Roya, Alpes-Maritimes, France)

Je présente ici mes recherches réalisées dans le bassin versant de la Roya, qui ont essentiellement visé à caractériser et quantifier les dynamiques sédimentaires, à différentes échelles spatiales et temporelles. En particulier l'occurrence d'une crue de période de retour millénaire sur la partie amont du bassin en 2020 a donné l'occasion unique de capturer un tel événement. Cette sous-partie présente tout d'abord le contexte et le bassin versant étudié, puis les méthodologies employées. Les résultats obtenus sont ensuite analysés suivant trois axes correspondant à trois stratégies de mesure : la dynamique sédimentaire des frayères à truites par RFID passive à une fréquence annuelle, le transport sédimentaire de l'ensemble de la gamme granulométrique par RFID active à l'échelle de l'ensemble du linéaire grâce à un suivi pluriannuel, puis par sismique passive pour une caractérisation en continu des flux sédimentaires. La discussion porte enfin sur le monitoring de terrain en contexte torrentiel puis sur la gestion des flux sédimentaires en Roya, qui incluent notamment la trajectoire du système après une crue extrême et en contexte de changement climatique.

2.2.1 Contexte

2.2.1.1 Contexte de l'étude

J'ai commencé à travailler sur le bassin versant de la Roya dès ma prise de poste en 2015 à l'Université Nice Sophia Antipolis, désormais Université Côte d'Azur, sur la suggestion conjointe de D. Fox (UniCA/ESPACE) et d'EDF, qui avaient déjà pris contact dans le cadre du montage du projet Interreg Alcotra Concert-Eaux (2017-2020).

Dans le cadre de la gestion de sa chaîne hydroélectrique, EDF avait identifié plusieurs points demandant un approfondissement des connaissances relatives au fonctionnement hydrosédimentaire de la Roya. Ces éléments avaient émergé à la suite d'un événement hydrologique majeur (crue de nov. 2014), d'études piscicoles récentes menées sur le cours d'eau en lien avec l'AAPPMA la Patraque de la Roya, et du renouvellement des titres administratifs des aménagements hydroélectriques. Ils se déclinaient en deux axes :

- Mieux comprendre le lien entre fonctionnement hydrosédimentaire et évolution de la faune piscicole, en particulier la constitution des surfaces de frayères potentielles
- Que faire des matériaux piégés dans les retenues d'altitude ?

A cela s'ajoutait d'autres problématiques qui émergeaient dans le cadre du montage du projet européen, relatifs aux flux sédimentaires grossiers à l'échelle du bassin versant, et notamment la question des enjeux associés à une exploitation intense de la fraction grossière sur la partie aval du bassin versant (partie italienne).

Ces éléments appelaient dans un premier temps à une **quantification des flux sédimentaires grossiers à l'échelle du bassin versant**, et dans un deuxième temps à **dégager une vision prospective du devenir de ces flux à moyen terme**, dans l'objectif ultime de **proposer des éléments pour un plan de gestion des sédiments à l'échelle du bassin versant**. Ainsi, après avoir défini ce que pouvait revêtir mon implication de ce futur projet européen, j'ai eu dès 2016 l'occasion d'encadrer le stage de S. Lejeune, financé par EDF. Cette étude préliminaire au projet européen Concert-Eaux visait en particulier à :

- Réaliser une synthèse des documents existants sur le transport solide en Roya
- Définir un protocole détaillé de mesures du transport solide à mettre en place dans le cadre du futur projet européen.

Par la suite, avec l'obtention du financement du projet Concert-Eaux (2017-2020) porté par D. Fox pour le CNRS, j'ai piloté le volet « transport sédimentaire » pour lequel j'avais défini les 3 axes de travail suivants :

- Préconisations concernant le devenir des matériaux curés issus des réservoirs
- Quantification des flux de sédiments actuels, évaluation de la disponibilité sédimentaire sur le bassin versant et caractérisation de l'évolution probable des flux
- Propositions de gestion des flux sédimentaires sur la Roya en vue de la mise en place d'un plan de gestion.

Nous proposons ci-après une présentation du bassin versant de la Roya, afin de synthétiser les éléments géographiques qui interviennent dans mes axes de recherche concernant les flux hydro-sédimentaires sur le bassin versant, et qui se déclinent en 3 axes :

- L'étude de la dynamique sédimentaire des frayères via un suivi par RFID passive
- L'étude du transport solide associé à l'ensemble de la gamme granulométrique, via un suivi par RFID active et passive
- L'étude des flux sédimentaires par sismique passive.

2.2.1.2 Présentation du bassin versant de la Roya

Contexte géographique général

Comme évoqué dans la sous-partie 1.4, le bassin versant de la Roya est soumis à la fois à une influence alpine « par l'amont » (le Nord) et une influence méditerranéenne « par l'aval » (le Sud), ce qui lui confère une variabilité hydrologique marquée. Il est par ailleurs caractérisé par des crues à cinétique rapide et une forte mobilité du lit dans les secteurs hors gorges. Pour tous ces éléments, il constitue un exemple typique des cours d'eau maralpins à charge grossière, dont les caractéristiques sont représentatives des cours d'eau de la Riviera méditerranéenne entre le fleuve Var et La Spezia (cf. Figure 19).

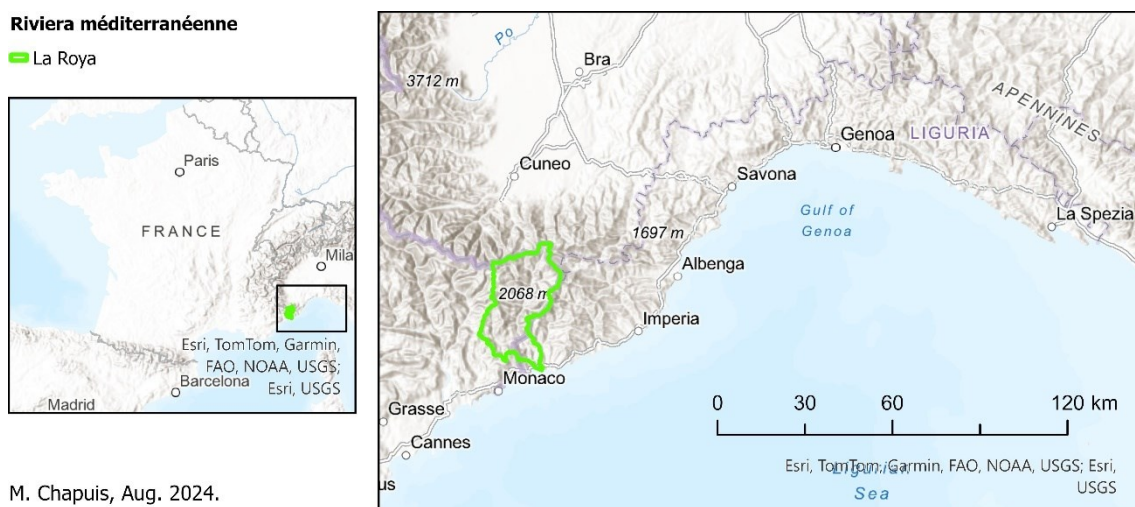


Figure 19. Le bassin versant de la Roya dans le cadre de la Riviera méditerranéenne.

Le caractère transfrontalier de la Roya rend son étude particulièrement intéressante, puisque l'occupation du sol est intimement liée à l'histoire géopolitique de la région. En effet presque 90% du bassin versant est actuellement en territoire français (cf. Figure 20 et ONF-RTM et al., 2023a), mais pour les communes de Tende et la Brigue, et les hameaux de Libre et Piène, ce rattachement est relativement récent (traité de Paris, 1947).

D'autre part, la Roya est un fleuve et constitue ainsi une unité topographique pertinente pour l'étude des transferts hydrosédimentaires (cf. notion de périmètre technique pertinent, Chapuis et Collomb, 2012 et notion de *source-to-sink*, cf. sous-partie 1.2). A cela s'ajoute la notion de connectivité sédimentaire, qui en contexte alpin est particulièrement critique pour expliquer dynamiques sédimentaires et paysages hérités des périodes glaciaires (maximum d'extension würmien en Roya : Saorge, cf. Blanchard, 1949 *in* ONF-RTM et al., 2023a). Enfin, tant son histoire que son cadre géopolitique actuel rendent cette étude riche du point de vue de l'approche géographique.

Topographie et organisation du réseau hydrographique

Le bassin versant de la Roya, d'une superficie de 671 km² (ONF-RTM et al., 2023a), est caractérisé par des reliefs très énergiques, et une dénivelée particulièrement marquée (presque 3 000 m en moins de 50 km, cf. Figure 20). La Roya prend sa source au niveau du col de Tende et son exutoire, la mer Méditerranée, est situé à Vintimille (IM, Italie) : sa direction générale d'écoulement est orientée selon un axe Nord-Sud. Son point culminant, le mont du Grand Capelet, est situé à 2 935 m d'altitude et sa pente moyenne est élevée, de l'ordre de 56% (ONF-RTM et al., 2023a). Le cours principal de la Roya, dont la morphologie est actuellement plutôt divagante dès que les contraintes latérales le permettent, est caractérisé par de nombreux passages en gorges et plus généralement une vallée en « V » très encaissée d'origine messinienne, à part dans de rares secteurs qui correspondent à des zones de divagation latérale où sont concentrées les zones d'habitation.

La Roya est une rivière torrentielle (pente comprise entre 1,5 et 6%, cf. classification de Bernard, 1925 *in* Meunier, 2023 ; Bernard, 1927 *in* Meunier, 1989) dont la branche principale fait une soixantaine de kilomètres de long. Malgré un indice de Gravelius de 2,15 (Tourade, 2018) qui souligne son caractère relativement allongé, le bassin versant présente des crues à cinétique rapide (crues éclair) qui sont en partie expliquées par ses versants escarpés. Parmi ses affluents principaux (cf. Figure 20), on notera en particulier la Bévéra : elle constitue le plus grand sous-bassin versant (160 km²) et conflue dans la plaine alluviale de la Roya à moins de 5 km en amont de Vintimille, dans une configuration typique de la Riviera méditerranéenne française, qui rappelle les Paillons à l'entrée de Nice ou encore la confluence Estéron-Var.

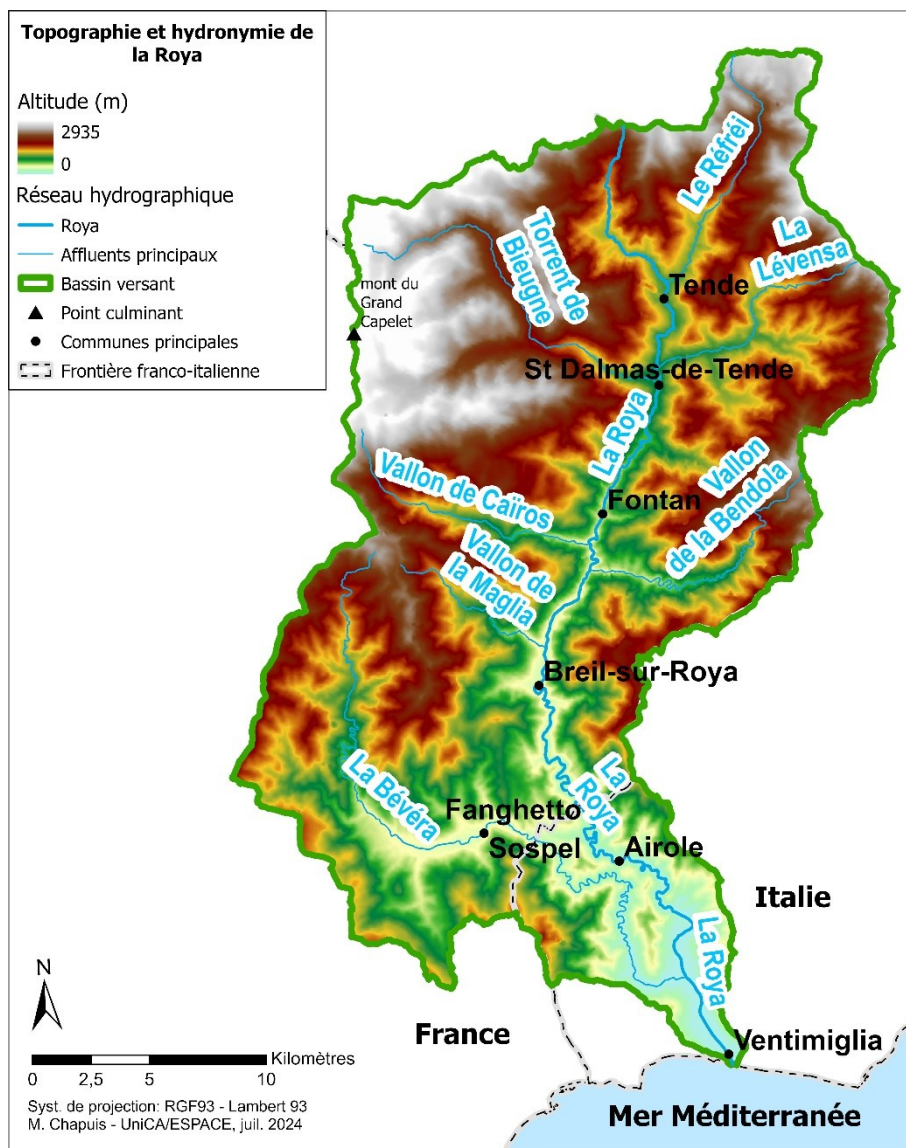


Figure 20. Topographie du bassin versant de la Roya et affluents principaux.

Sources : EGM (IGN et Eurogeographics) et BD Topage 2024

Climat

Avec une dénivelée de l'ordre de 3 000 m en moins de 50 km, le gradient climatique associé est abrupt : plus de 60 jours de gel au niveau de Tende¹¹ et presque aucun à Vintimille, des étés chauds et secs en bordure littorale mais des cumuls de précipitations qui augmentent avec l'altitude pour atteindre un peu plus de 1 000 mm annuels à Tende (source : Météo-France) : l'influence méditerranéenne à l'aval du bassin versant s'estompe pour laisser place à un climat montagnard à mesure que l'on progresse en altitude (et en latitude) (Vignal, 2020). La variabilité infra-annuelle des précipitations est forte, de même que la variabilité interannuelle (cf. Figure 21).

¹¹ https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=117&id_rubrique=39 Fiche climatologique de Tende (ID : 06163007, nom : TENDE_SAPC), donnée Météo-France [consulté le 29/07/2024]

Il est à noter que les précipitations sur la partie amont ont régulièrement pour origine les « retours d'Est » associés à la présence d'une goutte froide d'altitude en Méditerranée : « l'interaction entre l'air froid d'altitude et l'air relativement doux et humide de surface en Méditerranée donne naissance à des perturbations actives »¹², où les masses d'air chaud et humide formées dans le golfe de Gênes remontent par la plaine du Pô pour venir buter sur les premiers reliefs alpins, ici localisés au Nord et à l'Est du bassin. En hiver, cela correspond à de fortes chutes de neige, tandis que s'ils se produisent en été, ils peuvent donner lieu à des pluies particulièrement intenses.

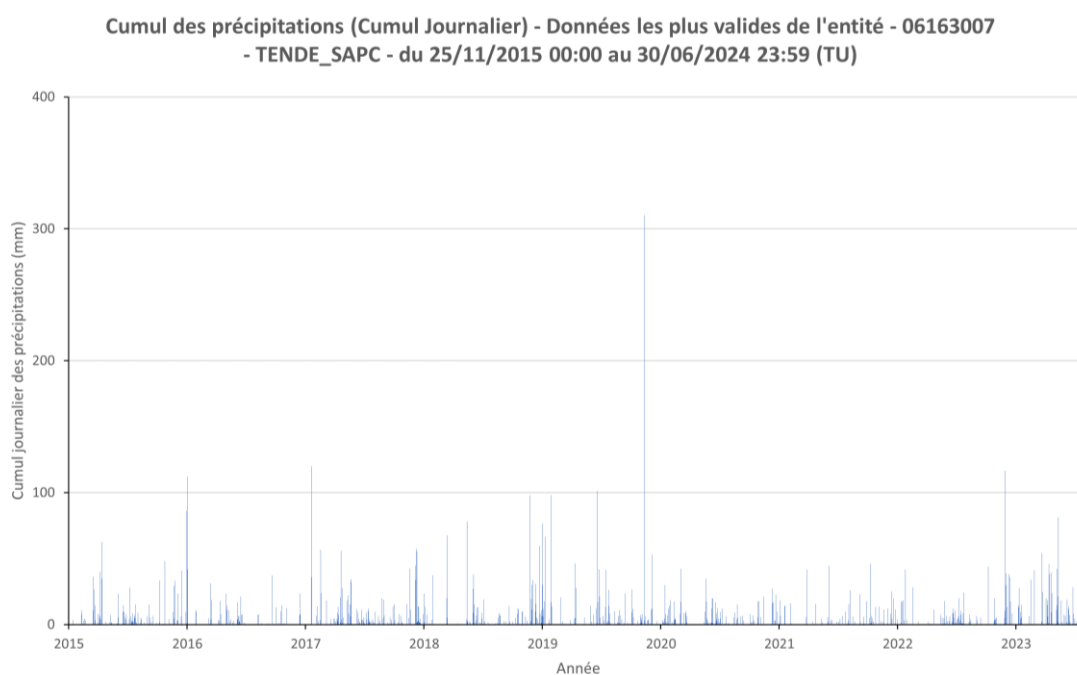


Figure 21. Cumul journalier des précipitations à Tende entre le 25/11/2015 et le 30/06/2024 (en mm).

On note la forte variabilité infra- et interannuelle des précipitations. Le pic observé correspond aux précipitations mesurées lors de la tempête Alex du 02/10/2020.

Source : HydroPortail, <https://www.hydro.eaufrance.fr>

Le bassin versant est historiquement faiblement équipé en termes de stations de mesures pluviométriques (cf. Tableau 2, Figure 22, et CEREMA, 2021). Dans le cadre des projets Concert-Eaux et Concert-Eaux OPERA, un effort d'instrumentation a été fait pour pallier ce déficit de données indispensables à toute étude hydrologique ou relative au transport solide, avec la mise en place de l'Observatoire de la Roya¹³ et un suivi en temps réel mis en place par le SMIAGE¹⁴ (non accessibles au grand public).

¹² <https://meteofrance.com/comprendre-climat/france/les-situations-meteorologiques-types-en-france> [consulté le 29/07/2024]

¹³ <https://observatoire-nappe-roya.com/> [consulté le 22/07/2024]

¹⁴ <http://supervision.smiage.fr> [consulté le 22/07/2024]

Tableau 2. Date de mise en service de quelques stations pluviométriques sur le bassin versant (non exhaustif).

Localisation	Producteur	Date de mise en service
Tende	Météo-France	25/11/2013
Airole	ARPAL	11/03/2013
Monte Maure	ARPAL	28/02/2001
Vintimille	ARPAL	22/10/2003

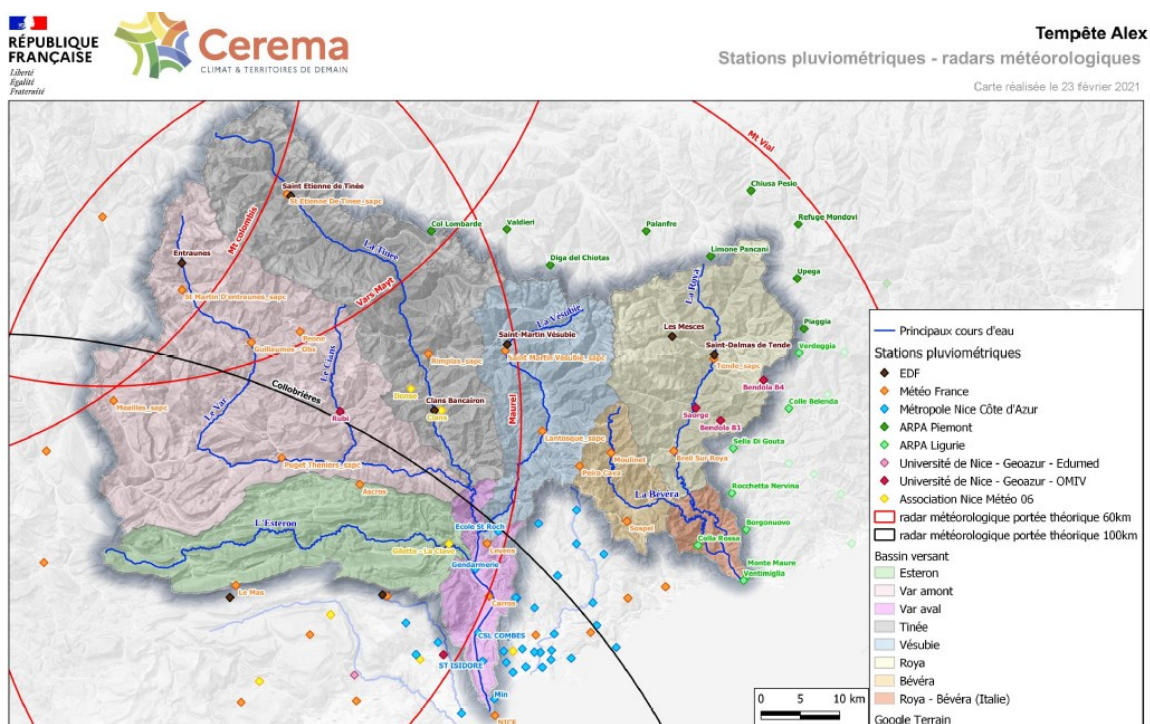


Figure 5: Cours d'eau, bassins versants et réseau de mesure pluviométrique

Figure 22. Instrumentation des bassins versants maralpins en termes de mesures pluviométriques.

Source : CEREMA, 2021

Géologie, géomorphologie et sensibilité des formations superficielles à l'érosion

La géologie du bassin versant de la Roya est particulièrement complexe (cf. Figure 23) et mérite d'être analysée en même temps que la géomorphologie (cf. Figure 24).

On notera en particulier :

- Les formations magmatiques et métamorphiques (essentiellement des migmatites) du socle cristallin de l'Argentera-Mercantour situées au Nord-Est du bassin versant, et les pélites permienes (couleurs orangé et rouge sur la Figure 23). Ces formations sont plus résistantes à l'érosion que les autres (lithofaciès du socle, en rose sur la Figure 24)
- A la pointe Nord, le massif du Marguaréis caractérisé par des formations karstiques (en rouge sur la Figure 24) qui jouent un rôle encore peu documenté dans l'hydrologie du bassin versant

- La séquence de flyschs (crétacé et éocène) au Nord-Est du bassin versant (lithofaciès de couverture, vaguelettes de couleur marron sur la Figure 24)
- Une large partie du bassin versant constituée de roches sédimentaires de couverture, de résistance variable (calcaires, marnes, cargneules, dolomies...) d'âges triasique, jurassique, crétacé et éocène
- A l'extrémité aval, au niveau de Vintimille, des poudingues déposés dans la ria pliocène, de manière postérieure à la crise messinienne (en orange sur la Figure 24).

On notera également, dans la partie Nord-Est du bassin versant, la séquence chronologiquement structurée des formations triasiques, jurassiques, crétacées et éocènes.

On peut considérer que les roches constituant ces formations superficielles sont globalement peu résistantes à l'érosion, exception faite des roches du socle primaire. Si l'on ajoute le caractère agressif du climat montagnard en tête de bassin, le potentiel de fourniture sédimentaire du bassin versant est a priori particulièrement élevé, d'autant que la connectivité sédimentaire est renforcée par le caractère escarpé des versants. Pour lutter contre l'érosion des sols, originellement peu épais, les versants sont dans leur très grande majorité structurés en terrasses (planches). A l'aval, la végétation de type méditerranéenne, relativement peu couvrante, ne vient pas particulièrement atténuer le caractère érosif des épisodes méditerranéens.

Il est donc attendu que le bassin versant de la Roya a un potentiel de fourniture sédimentaire important et que les matériaux issus des versants peuvent rejoindre le chenal principal ; quant à la gamme granulométrique des matériaux disponibles pour le transport, elle semble s'être déplacée vers la queue de la distribution par rapport à la situation « avant tempête Alex » : un apport et un transit importants de sédiments fins semblent plus fréquents qu'avant (problèmes de colmatage dans la basse vallée), tandis qu'il est difficile de statuer sur les blocs plurimétriques en transit dans le lit dans la mesure où ils ont, pour la plupart, été utilisés dans le cadre de la reconstruction.

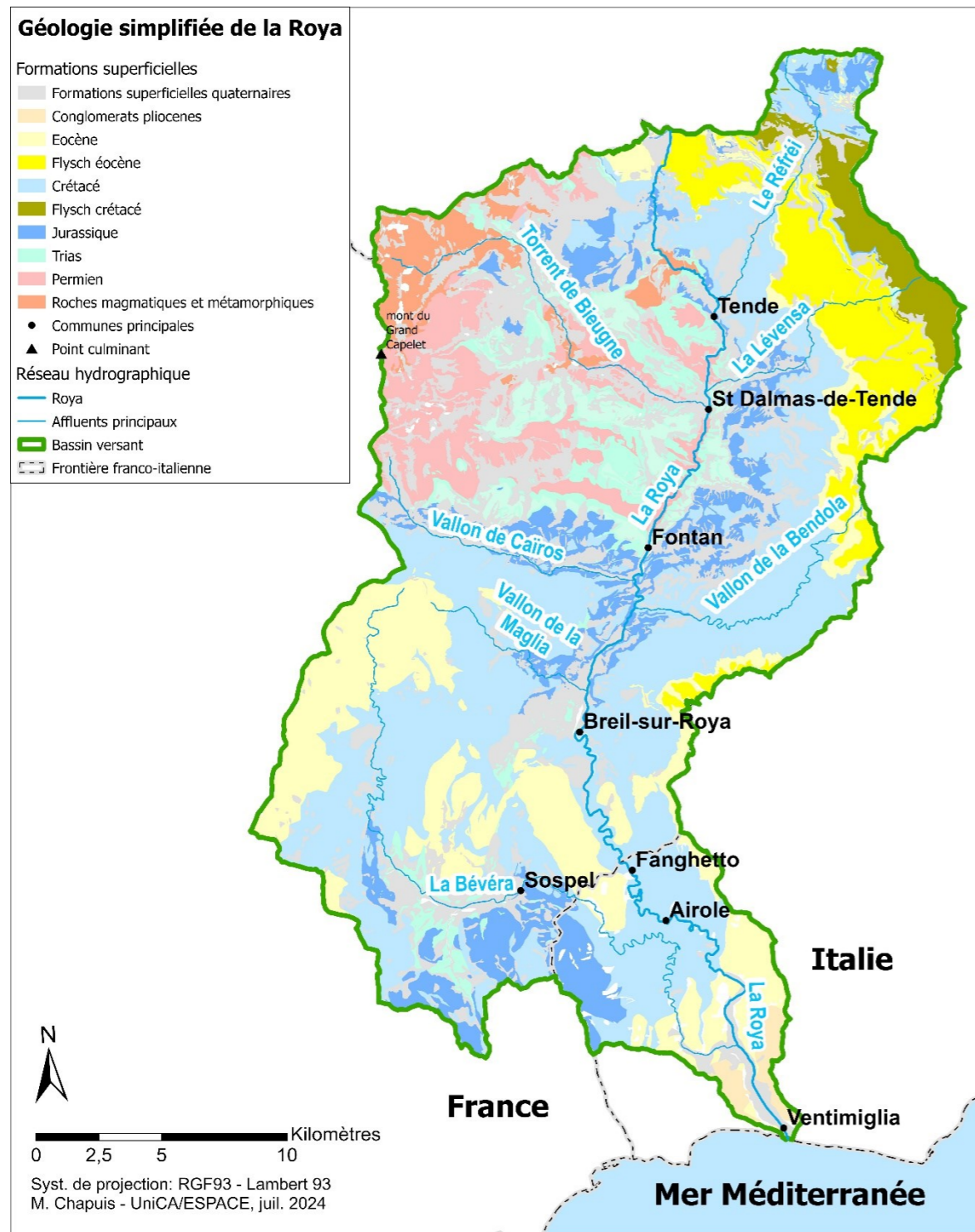
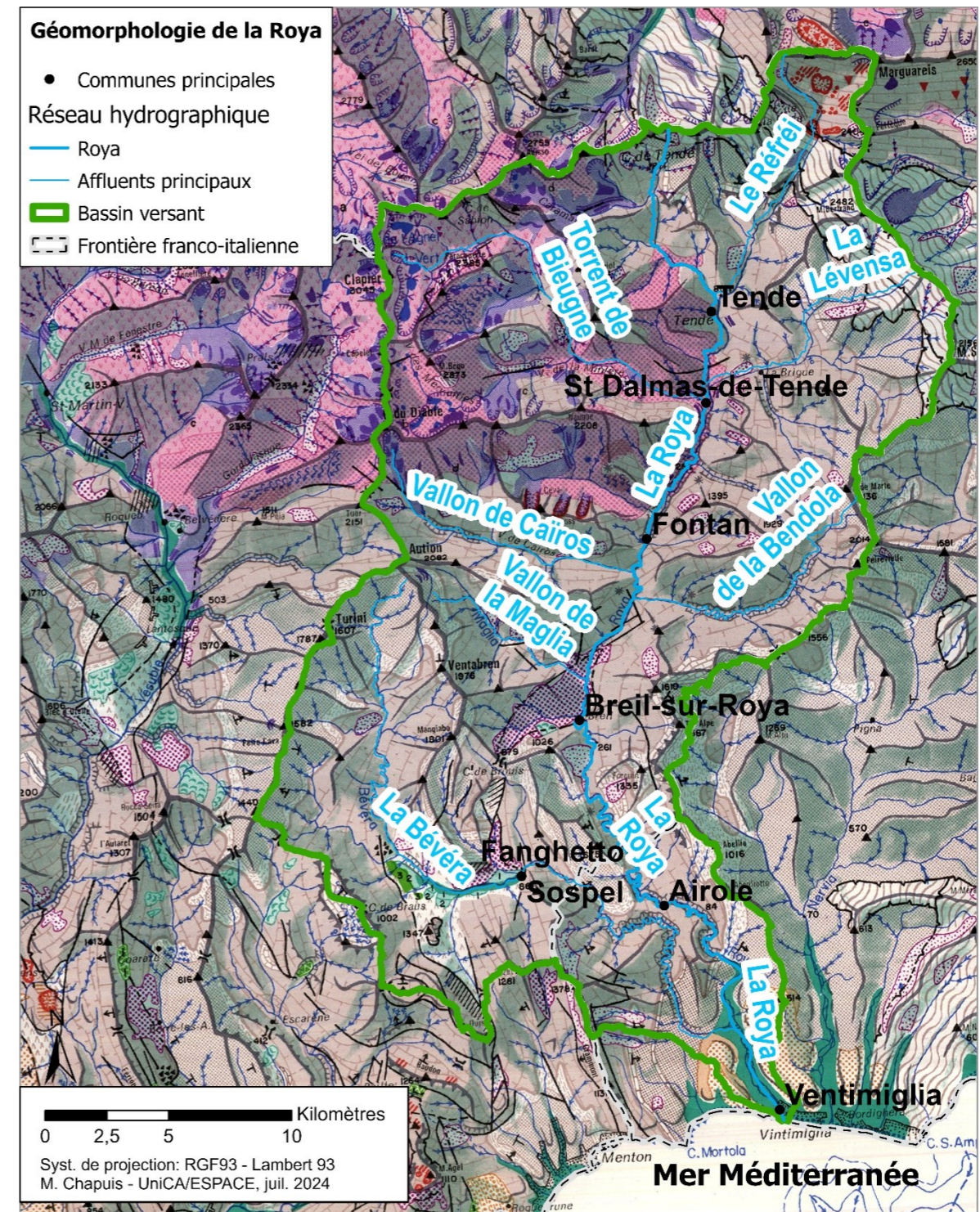


Figure 23. Géologie simplifiée du bassin versant de la Roya.

Sources : interprétation d'après la BD CHARM-50 (BRGM) pour la partie française ; pour la partie italienne, digitalisation et interprétation d'après le Carte Geologica Regionali (CGR) scala 1:25000 – Ventimiglia e Dolceacqua, données issues du geoportale della Regione Liguria : <https://srvcarto.regione.liguria.it/geoviewer2/pages/apps/ambiente-tematiche/index.html?canale=5> [consulté le 30/07/2024] ; EGM (IGN et Eurogeographics) et BD Topage 2024



Sources : Julian, 1977 ; EGM (IGN et Eurogeographics) et BD Topage 2024
Figure 24. Extrait de la carte géomorphologique du bassin versant de la Roya (Julian, 1977).

Pour le détail des figurés, on se reportera utilement au document en ligne https://www.persee.fr/doc/medit_0025-8296_1977_num_28_1_1709 [consulté le 05/08/2024]. Pour mémoire concernant la légende, et du Nord vers le Sud ici, les lithofaciès du socle sont de couleur rose, les lithofaciès de couverture et nappe sont de couleur marron, et les formations du néogène de couleur orange. Du Nord au Sud de nouveau, les formations karstiques sont indiquées en rouge, les formations d'origine glaciaire et fluvio-glaciaire en violet foncé, les formations cryo-nivales en fuchsia, et les formations alluviales ou les dépôts de versants sont indiquées en vert.

Hydrologie

Du fait de la double influence alpine et méditerranéenne (régime méditerranéo-nival), l'hydrologie de la Roya est typique des cours d'eau maralpains avec une forte variabilité infra-annuelle (cf. Figure 25), couplée à une forte variabilité inter-annuelle (cf. Tableau 3 et Figure 26).

Nous verrons un peu plus loin qu'une large partie du linéaire de la Roya est influencée par les aménagements hydroélectriques. A l'aval de Breil-sur-Roya, cela se traduit par exemple par des éclusées qui induisent des variations de débit infra-journalières de l'ordre de 2 m³/s.

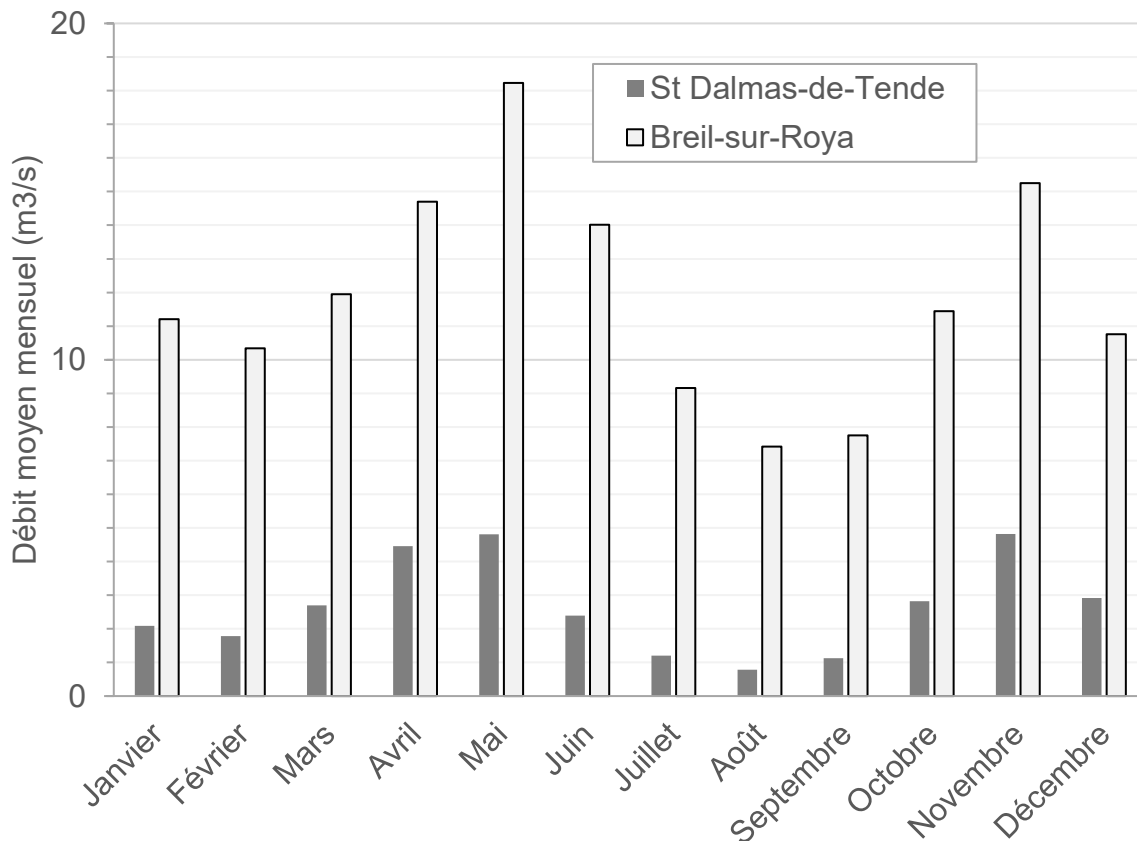


Figure 25. Débits moyens mensuels à St Dalmas-de-Tende (1985-2024, en gris) et Breil-sur-Roya (1969-2017, en blanc).

On notera le régime bimodal caractéristique des bassins versants sous influence montagnarde et méditerranéenne, tant en amont qu'en aval du bassin versant : hautes eaux au printemps (fonte) et à l'automne (épisodes orageux), couplées à un étiage d'été particulièrement sévère à St Dalmas. L'étiage hivernal est dû au stockage des précipitations sous forme neigeuse.

Source : HydroPortail, <https://www.hydro.eaufrance.fr>

Seule la station de St Dalmas-de-Tende permet le calcul de débits de crue instantanés caractéristiques (QIXnJ, cf. Tableau 3). Pour compléter notre compréhension des différences hydrologiques entre St Dalmas et Breil-sur-Roya, on notera que le module à Breil est 4 fois plus élevé qu'à St Dalmas (cf. Tableau 4).

Tableau 3. Débits (en m³/s) des périodes de retour caractéristiques à St Dalmas-de-Tende et Breil-sur-Breil. Les valeurs entre crochets correspondent à la gamme d'incertitude. Calculs CRUCAL réalisés le 24/04/2024 à 02:15 (TU) pour la station de St Dalmas, et le 24/01/2024 à 03:18 (TU) pour la station de Breil.

Station	Y661 4010		Y662 0003 01	
Nom	La Roya à Tende [Saint-Dalmas-de-Tende]		La Roya à Breil-sur-Roya [EDF]	
Grandeur calculée	QIXnJ	QmnJ	QmnJ	
Période de calcul	de 01/01/1985	- 20/05/1960	- 01/01/1969 - 31/12/2022	
Type de calcul	23/07/2024	23/07/2024		
Nb de pts retenus	Q-X	QJ-X	QJ-X	
	27	46	48	
Période de retour	Débit (m ³ /s)			
Biennale (médiane)	108 [79,7 ; 139]	43 [34,8 ; 52,9]	105	[85 ; 126]
Quinquennale	178 [139 ; 218]	71,4 [58,8 ; 86,4]	176	[144 ; 210]
Décennale	223 [172 ; 280]	90,7 [74,1 ; 111]	222	[181 ; 267]
Vicennale	266 [193 ; 349]	110 [86,1 ; 140]	267	[217 ; 322]
Cinquantennale	320 [215 ; 468]	134 [98,2 ; 185]	326	[262 ; 393]

Source : HydroPortail, <https://www.hydro.eaufrance.fr> [consulté le 30/07/2024]. Fiche de synthèse – Données hydrologiques de synthèse – Hautes-eaux.

Tableau 4. Valeur du module pour St Dalmas-de-Tende et Breil-sur-Roya.

Station	Période de mesure	Module (m ³ /s)
St Dalmas-de-Tende (Y661 4010)	20/05/1960 - 23/07/2024	2,93
Breil-sur-Roya (Y662 0003 01)	01/01/1969 - 31/12/2022	11,7

Source : HydroPortail, <https://www.hydro.eaufrance.fr> [consulté le 30/07/2024]. QJ-annuel, toutes eaux.

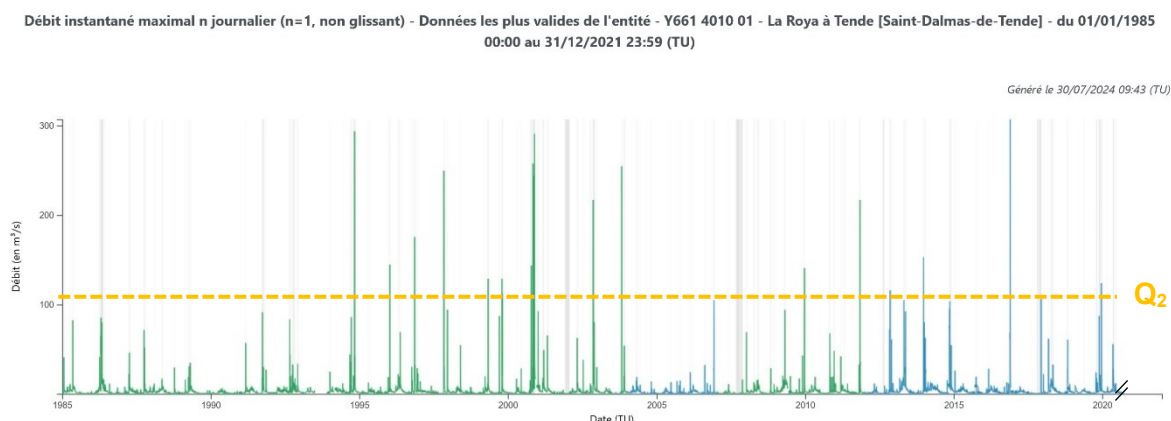


Figure 26. Débit instantané maximal à St Dalmas-de-Tende (1985-2021).

La chronique s'arrête ici à la crue du 02/10/2020, qui constitue le maximum connu sur le linéaire :
 $Q_{max} \sim [1000; 1500] \text{ m}^3/\text{s}$ à Breil (ONF-RTM et al., 2023a).

Source : HydroPortail, <https://www.hydro.eaufrance.fr>

Nous avons souligné que la Roya présente des crues à cinétique rapide (crues éclair). Une rapide analyse des temps de propagation sur le bassin entre St Dalmas-de-Tende et Airole (soient environ 30 km de linéaire) ou encore Tende et Breil (environ 20 km), a montré des temps de propagation du pic de crue de l'ordre de 45 min à 2h30. Sous toute réserve, notamment sur la structure spatiale des précipitations, ceci nous donne des vitesses virtuelles de propagation du pic de l'ordre de 2 à 10 m/s. L'analyse hydrologique couplée à celle des pics de l'activité sismique (cf. section 2.2.5) propose plutôt des valeurs basses vis-à-vis de cette gamme.

Aménagements anthropiques en lien avec la ressource en eau

Les aménagements anthropiques en Roya sont essentiellement liés aux infrastructures de production hydroélectrique (cf. Figure 27) : la retenue d'altitude principale est le barrage des Mesces, sur la Bieugne, à la confluence des vallons de la Minière et de Castérino¹⁵. Les autres ouvrages sur la branche principale sont essentiellement au fil de l'eau. La quasi-totalité du linéaire de la Roya, française puis italienne, est sous régime influencé. L'histoire transfrontalière du bassin versant explique par ailleurs la gestion complexe des ouvrages hydroélectriques (cf. Tableau 5).

¹⁵*Laissez-vous conter l'hydroélectricité en Roya et Bévéra*, Vpah Roya Bevera, s.d. : ouvrage en ligne. <https://www.calameo.com/books/004147876550f68dcb1e7> [consulté le 30/07/2024]

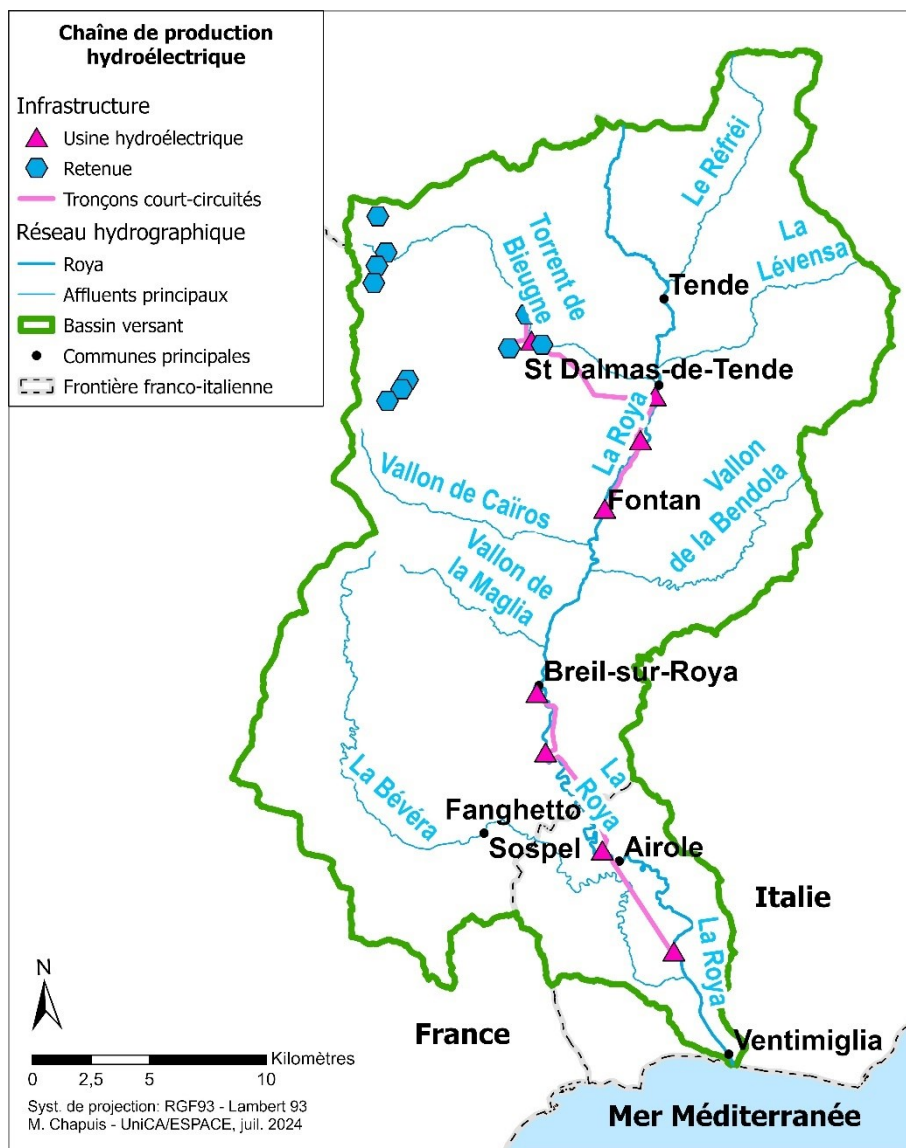


Figure 27. Chaîne de production hydroélectrique en Roya.

Sources : IGN, OpenStreetMap

Tableau 5. Mises en service des ouvrages de production hydroélectrique, depuis l'amont vers l'aval (cf. Figure 27).

Ouvrage	Date de mise en service	Pays
Barrage des Mesces	1917-1919	Italie
Usine de St Dalmas	1914	France*
Usine de Paganin	1917	France*
Usine de Fontan	1912	France
Usine de Breil	1927	France
Usine de Piène Basse	1912	France
Usine d'Airole	1948	Italie
Usine de Bevera	1948	Italie

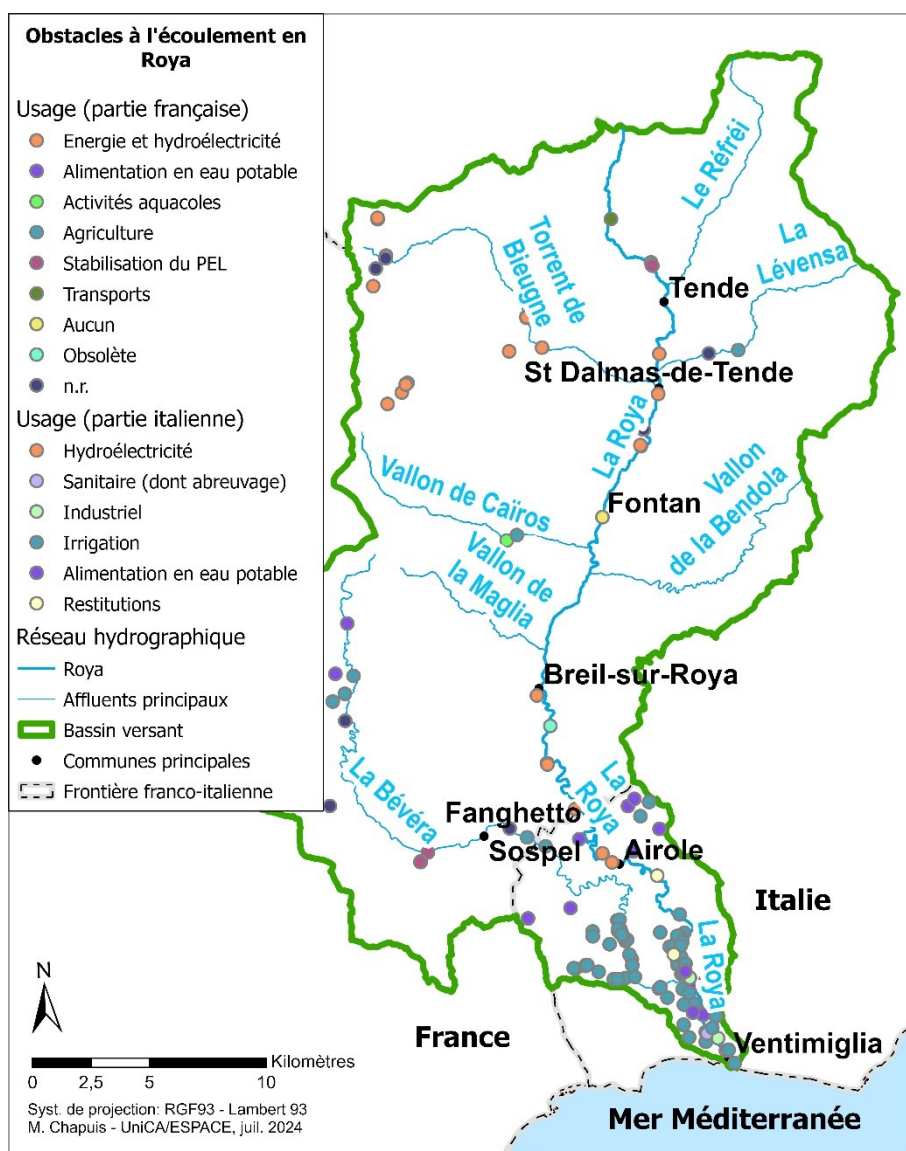
* Initialement Italie

Sources [consultées le 30/07/2024] :

<https://www.calameo.com/books/004147876550f68dcb1e7>

<https://www.tirrenopower.com/centrali-ad-acqua-fluente/>

Outre des prises d'eau à usage agricole, essentiellement pour l'irrigation, il est à noter que dans la basse vallée, un champ captant est dédié à l'alimentation en eau potable des communes de la CARF (Communauté d'Agglomération de la Riviera Française), de Vintimille et de Monaco (cf. Figure 28). Cette ressource en eau constitue un enjeu crucial pour le territoire : elle est à l'origine de la structuration du réseau d'acteurs autour du Protocole d'Intention franco-italien pour le bassin hydrographique du Fleuve Roya et de ses affluents en 2013, et plus généralement des projets européens associés : EUROBASSIN (2000-2006), EUR-EAU-PA (ou EUROBASSIN2 : 2010-2013), RiskNat (2009-2012), RiskNET (2013-2015), Concert-Eaux (2017-2020) et Concert-Eaux OPERA (2023-2024).



Occupation du sol, végétation et biodiversité

Occupation du sol et planification territoriale

La vallée des Merveilles, située dans la partie nord-ouest du bassin versant, revêt un intérêt patrimonial exceptionnel, avec des artefacts datant de 5 800 ans av. J.-C. ou ses célèbres gravures rupestres datées de 3 300 ans av. J.-C., qui attestent d'une présence humaine au moins ponctuelle dans le bassin versant¹⁶.

A l'heure actuelle, l'occupation du sol est aujourd'hui visiblement différente suivant que l'on se trouve dans la partie italienne ou française. En effet l'agriculture est toujours très présente côté italien, avec notamment une activité horticole et une culture de l'olivier. Ceci est d'ailleurs à relier à la densité des prises d'eau à usage agricole dans la basse vallée (cf. Figure 28).

A priori, le maintien d'une activité agricole peut avoir deux conséquences sur les flux sédimentaires :

- D'une part le couvert végétal est moins couvrant (limitation d'une couverture arborée, ou si c'est le cas, espacement plus important des canopées), ce qui peut théoriquement accentuer la dégradation des sols en cas de précipitations intenses. Mais la présence de planches (ou terrasses ou restanques) contribue à casser la pente et donc à limiter le départ des particules
- D'autre part les murets constituant les planches sont maintenus en bon état, et donc contribuent à limiter les départs de sol par ruissellement ; à noter qu'en cas de mouvement en masse, ces terrasses ne constituent pas une protection contre les glissements de terrain. En revanche, en l'absence d'entretien, par exemple en cas de développement d'un couvert forestier, le système racinaire peut contribuer à déstabiliser les ouvrages de soutènement et donc, à terme, favoriser leur ruine.

L'influence de l'occupation du sol sur la genèse des flux sédimentaires depuis les versants est donc à étudier plus finement, même si son influence est probablement à nuancer par rapport au régime des précipitations (intensité et fréquence) (cf. section 2.3.4).

Il est intéressant de noter qu'en plus des conditions climatiques et des temporalités associées à l'exode rural depuis le Moyen Âge, le contexte géopolitique a pu avoir un effet différent sur l'évolution de l'occupation du sol, suivant que l'on se situe à l'amont ou à l'aval du bassin versant. En effet la planification territoriale est complexe en raison du caractère très escarpé des terrains.

En termes de planification territoriale, justement, nous venons d'évoquer l'exploitation des fortes pentes sur le bassin dans une optique de production d'énergie hydroélectrique : la Roya est un exemple particulièrement poussé de cette optimisation énergétique. Un autre chantier de longue haleine sur le bassin versant a été lié à son statut de voie de communication historique (route du sel), ce qui en a très tôt fait une route royale (à l'origine de l'hydronyme).

Sans détailler l'histoire de cet axe de communication (pour cela, se reporter par exemple à l'ouvrage de Marcarini, 2016), nous pouvons retenir que le tracé d'une voie de communication routière en fond de vallée a représenté un enjeu important dès le XVI siècle et abouti en 1788. Le développement de la voie ferrée, initié en 1826 et abouti en 1928, a constitué un défi majeur, tant d'un point de vue technique que géopolitique puisque la remise en service après la guerre n'a eu lieu qu'en 1979. Plus récemment, la partie amont de la vallée de la Roya a été enclavée à partir de Breil suite à la tempête Alex de 2020, et depuis l'axe de communication Vintimille-Cuneo par

¹⁶ <https://fr.marittimemercantour.eu/histoire-et-culture/atlas-de-la-culture/25> [consulté le 31/07/2024]

le tunnel de Tende est interrompu pour une durée indéterminée. Ceci remet en lumière le caractère crucial des voies de communication pour l'activité de la vallée, principalement orientée vers le tourisme (notamment avec la vallée des Merveilles).

Végétation et outils de protection de la biodiversité

En ce qui concerne les caractéristiques de la végétation sur le bassin versant, on pourra se reporter au travail de Vignal, 2020, et notamment au chap. 2, duquel sont tirés les éléments suivants. Cette étude nous intéresse ici pour deux raisons : sa dimension régionale et sa dimension prospective.

Nous en retiendrons qu'avec le gradient altitudinal (et latitudinal) particulièrement marqué dans le bassin versant de la Roya, la grande diversité de milieux naturels est à l'origine d'une biodiversité importante (Médail et Diadema, 2006). Cette biodiversité résulte également des caractéristiques géologiques, des nombreuses pulsations climatiques et de la situation de carrefour biogéographique de ce territoire, entre influences méditerranéenne et alpine. En particulier, le territoire maralpin et ligure présente un nombre important d'espèces endémiques, qui sont en limite de répartition : le haut pays regroupe près de 50% des 106 espèces endémiques des Alpes-Maritimes. Ainsi le bassin de la Roya peut être considéré comme un point chaud local de la biodiversité (Médail et Quézel, 1999) au sein du bassin méditerranéen qui est lui-même point chaud de biodiversité (Myers et al., 2000) ! C'est d'ailleurs ce qui explique le grand nombre d'outils territoriaux de protection de la biodiversité (Andrieu, *comm. pers.*) sur ce territoire :

- Un parc national : le Parc National du Mercantour (France), dont la totalité de la zone cœur est inscrite au statut de Site d'Intérêt Communautaire Natura 2000
- Deux parcs naturels régionaux : Alpi Marittime et Alpi Liguri (Italie) qui bordent la Roya au Nord et à l'Est.
- Un réseau d'aires Natura 2000.

Concernant les milieux forestiers des versants, on trouvera en Roya des forêts de conifères de montagne tels que *Larix decidua*, *Pinus sylvestris*, *Abies alba*, *Pice Abies*, *Pinus mugo*, *Pinus uncinata* ou *Pinus cembra*. En termes de végétation basse, nous pouvons retenir deux espèces d'intérêt en haute altitude : *Saxifraga florulenta* (inféodé aux éléments rocheux des parois siliceuses du Mercantour), et *Senecio personii* (inféodé aux parois calcaires du Marguareis) (Médail et Diadema, 2006, *in* Vignal, 2020).

Concernant la végétation rivulaire et la végétation aquatique, on pourra se reporter à la fiche synthétique « la Roya » de la Maison Régionale de l'Eau (2018). Nous en reprenons ci-après les éléments essentiels.

A proximité du lit de la Roya, la végétation rivulaire est elle aussi influencée par le gradient altitudinal et climatique, mais également par la morphologie du cours d'eau. Dans les secteurs divagants de l'aval, on retrouvera des espèces pionnières dont les saules constituent l'essentiel de la strate arbustive (*Salix daphnoides*, *Salix fragilis*, *Salix triandra*, *Salix myrsinifolia*). Dans la haute vallée, le climat montagnard a une influence prépondérante, et on retrouvera des saulaies à saule drapé (*Salix eleagnos*) et saule pourpre (*Salix purpurea*), des peuplements à myricaire (*Myricaria germanica*) en cas d'apports de limons, ainsi que d'autres espèces souvent présentes en bordure de cours d'eau: aulne blanc (*Alnus incana*), peupliers blancs et noirs (*Populus alba et nigra*), merisier (*Prunus padus*), sorbiers (*Sorbus sp.*), robinier (*Robinia pseudoacacia*), érable *negundo* (*Acer negundo*), noisetier (*Corylus avellana*)...

En termes de végétation aquatique, certaines espèces rares de diatomées se développent dans des milieux exempts de pollution, comme par exemple en tête de bassin (*Achnanthydium pyrenaicum* et *Achnanthydium minutissimum*, deux espèces très polluo-sensibles et oxyphiles).

Les observations de terrain suggèrent un développement algal faible en été, à relier avec les températures fraîches de l'eau et le caractère largement courant des écoulements, en lien avec le régime torrentiel évoqué en sous-partie 1.4.

Faune aquatique

Les éléments suivants sont également tirés de la synthèse de la Maison Régionale de l'Eau (2018).

D'un point de vue piscicole, la richesse spécifique est globalement très faible. La Roya constitue un axe de migration pour les espèces en provenance de la Méditerranée, mais de nombreux ouvrages infranchissables perturbent la montaison, notamment de l'anguille (*Anguilla anguilla*). Les lacs d'altitude, notamment dans la Vallée des Merveilles, sont déconnectés du réseau hydrographique, et ne possèdent donc pas de population piscicole autre qu'introduite. Sur la partie amont de la Roya et jusqu'à la retenue de Breil, une importante population d'écrevisses à pattes blanches peut se maintenir, tandis qu'à l'aval, la prédation par les anguilles a un effet limitant.

Sur le linéaire de la Roya, l'espèce piscicole dominante est la truite fario (*Salmo trutta*) ; son cortège d'accompagnement est réduit à une seule espèce sur une grande partie du bassin versant :

- Entre Tende et Saorge, on trouve du chabot (*Cottus gobio*), qui est un petit poisson benthique à haute valeur patrimoniale et qui présente une forte affinité pour les températures fraîches
- Entre Saorge et la frontière, on trouve du vairon (*Phoxinus phoxinus*), à large valence écologique
- Plus à l'aval entre la frontière franco-italienne et la Bévéra en aval de la cascade de Piaon, les conditions hydrologiques deviennent moins contraignantes et la richesse spécifique augmente légèrement. On y trouve notamment deux espèces à forte valeur patrimoniale : le blageon (*Telestes souffia* en Roya et *Telestes muticellus* en Bévéra) et le barbeau méridional (*Barbus meridionalis*).

Par ailleurs, des opérations d'alevinage (truite arc-en-ciel : *Oncorhynchus mykiss*) sont régulièrement menées en différents points de la Roya.

Enfin, on notera que des loutres ont été récemment observées en Roya et en Bévéra¹⁷. La population de loutres avait été jugée comme disparue depuis les années '70, mais il est possible que les individus observés en juil. 2019 constituent une population relique passée inaperçue.

Cette brève présentation de la Roya avait vocation à synthétiser les différents éléments géographiques qui interviennent dans mes axes de recherche concernant le transport sédimentaire au sein de ce bassin versant.

¹⁷ <https://www.mercantour-parcnational.fr/fr/actualites/presence-de-loutres-en-roya> [consulté le 31/07/2024]

2.2.2 Méthodologie

2.2.2.1 Démarche méthodologique générale

Le suivi pluriannuel débuté en 2016 sur la Roya visait dès le départ à développer une compréhension des transferts sédimentaires à l'échelle du bassin versant. A ce titre, plusieurs axes de recherche ont été explorés : ils sont résumés dans le Tableau 6, qui précise également le document qui me semble faire référence actuellement sur le sujet. En effet, certains de ces axes de recherche ont largement bénéficié du travail collectif remarquable effectué dans le cadre du retour d'expérience post-Alex (ONF-RTM et al., 2023a), qui ne concerne cependant que la partie française du bassin versant.

Tableau 6. Axes d'étude explorés dans le cadre de l'étude des transferts sédimentaires en Roya, protocole succinct mis en œuvre et actuel document de référence sur le sujet.

Objectif	Protocole	Travaux exploratoires	Document de référence
Caractériser l'évolution historique du profil en long	Recalage du profil des Grandes Forces Hydrauliques (1912) et extraction semi-automatique du profil en long actuel (2017) à partir du RGE ALTI® à 1 m	Lejeune, 2016 ; Breteau, 2018 ; Martins, 2019 ;	ONF-RTM et al., 2023a
Identifier les zones sources de sédiments sur le bassin versant	Téledétection (photographies aériennes anciennes et récentes) et reconnaissances de terrain	Lejeune, 2016 ; Martins, 2021	ONF-RTM et al., 2023a
Evaluer les flux sédimentaires grossiers dans le chenal	Traçage sédimentaire par RFID passive et RFID active, sismique passive	Tourade, 2018 ; Martins, 2019 ; Martins, 2021 ; Weiland, 2024	Chapuis et Adnès, 2024 ; ce document, sous-partie 1.1
Connectivité sédimentaire à l'échelle du bassin versant	Modélisation conceptuelle	Martins, 2021 ; Chapuis et Adnès, 2024	Chapuis, <i>submit.</i>

Les travaux exploratoires cités dans le Tableau 6 ont été l'occasion de tester une pluralité d'outils, issus de disciplines différentes et permettant de capturer les phénomènes à différentes échelles spatiales et temporelles. Nous pouvons noter le recours à une instrumentation de terrain (traçage sédimentaire par RFID passive puis active, sismique passive, topographie, échantillonnages granulométriques...) mais aussi à des outils de programmation, de modélisation et évidemment de géomatique. On se reportera à chaque travail mentionné pour plus de précision sur les outils et protocoles associés.

Une étude sur le transport solide ne peut se passer de données hydrologiques. Nous avons en général travaillé avec les données issues d'HydroPortail¹⁸ (auparavant Banque Hydro), mais aussi à partir de données fournies par EDF et plus récemment du suivi en temps réel mis en place par le SMIAGE¹⁹, ou encore à partir de modélisations hydrologiques (Brigode et al., 2021). Notons également l'intérêt de la bancarisation de données hydrologiques concernant la Roya sur le site de l'Observatoire de la Roya²⁰.

2.2.2.2 Méthodologie générale du traçage sédimentaire par RFID

Dans l'optique de mettre en place une quantification du transport sédimentaire grossier en Roya, une étude préliminaire a été réalisée, qui consistait notamment à réaliser des échantillonnages granulométriques sur les sédiments constitutifs du lit pour déterminer la gamme granulométrique en place et éventuellement mobile. Ce travail a donné lieu à un mémoire de niveau master (Lejeune, 2016). Ce travail préliminaire a également permis de prendre en main les (rares) études existantes sur le bassin versant concernant le transport sédimentaire, l'hydrologie, la cartographie des zones-source ou encore les profils en long existants.

En 2018, le déploiement des premiers traceurs RFID passifs (Tourade, 2018) s'est donc appuyé d'une part sur cette étude préliminaire, et d'autre part sur les approfondissements méthodologiques concernant la RFID passive issus de mon travail de master, poursuivis en thèse et approfondis pendant mon post-doctorat. En particulier, ce dernier avait été l'occasion de proposer des préconisations pour ce type de suivi (Chapuis et al., 2014).

Afin de caractériser et quantifier les déplacements des particules sédimentaires au sein de la branche principale, l'implantation de traceurs RFID a été réalisée sur 3 sites en 2018. A la suite de la tempête Alex du 02/10/2020, un quatrième site à l'amont a été équipé. Ainsi d'amont en aval les 4 sites d'implantation de traceurs RFID sont localisés (cf. Figure 29) :

- Viévola
- Fontan/Ambo
- Pertus
- Airole.

Ces sites ont été choisis en raison de leur accessibilité, du linéaire accessible pour une prospection aval, et leur distribution spatiale le long du linéaire d'étude.

¹⁸ <https://hydro.eaufrance.fr/> [consulté le 22/07/2024]

¹⁹ <http://supervision.smiage.fr> [consulté le 22/07/2024]

²⁰ <https://observatoire-nappe-roya.com/> [consulté le 22/07/2024]

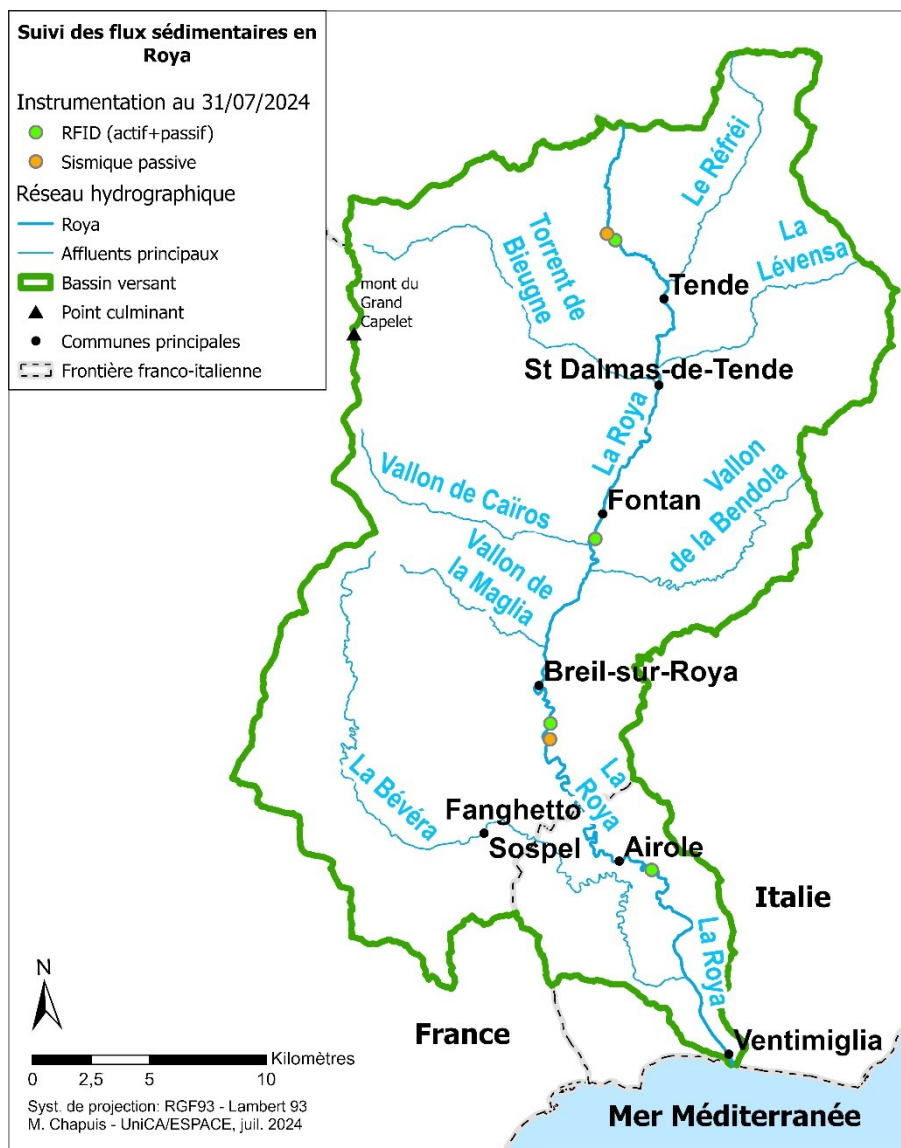


Figure 29. Sites instrumentés en Roya dans le cadre des projets Interreg Alcotra Concert-Eaux (2017-2020) et Concert-Eaux OPERA (2023-2024).

Sont indiqués les secteurs d'implantation des traceurs RFID, et la localisation des 2 géophones installés (suivi en continu par sismique passive, cf. section 2.2.2.3).

Chaque traceur RFID est identifié par un numéro unique, ce qui permet de constituer préalablement au déploiement une base de données qui recense le numéro de chaque traceur (chaîne alphanumérique pouvant aller jusqu'à 16 caractères), le type de transpondeur (passif/actif, taille), les dimensions (axes a, b, c), le poids, le volume de chaque particule, ses caractéristiques de forme (cf. Tourade, 2018 ; Martins, 2018 ; Martins, 2021).

Dans chaque cas, la granulométrie des traceurs déployés mime au mieux la granulométrie en place. Les traceurs ont été déployés à espace régulier sur des profils en travers (transects) afin de réaliser un maillage régulier sur le secteur étudié, tout en assurant une distribution aléatoire de la granulométrie des traceurs sur cette grille. Cela se décline à échelle fine (pour l'étude des frayères, cf. section 2.2.2.3) ou à l'échelle du tronçon d'étude (pour l'étude de la mobilité de l'ensemble de la fraction granulométrique en place, cf. section 2.2.4).

La position initiale de chaque traceur est enregistrée à l'aide d'un GPS différentiel (GPS Trimble® R10, précision de cette position après post-traitement : de l'ordre de la vingtaine de centimètres en x;y;z ; cf. Martins, 2018). Notons que le caractère encaissé de la vallée de la Roya empêche l'utilisation « directe/simple » de ce type de GPS et nécessite un post-traitement chronophage en complément d'autres techniques de mesure topographique adaptées, plus « rustiques » et donc robustes (décamètre, station totale...).

Le suivi du déplacement des traceurs est effectué à une fréquence annuelle. En effet, nous avons initialement prévu d'effectuer un suivi événementiel, mais les conditions torrentielles ne le permettent pas (interdiction de pénétrer dans le lit du cours d'eau en raison de la réglementation concernant la reproduction des truites ; impossibilité de se déplacer dans le lit sauf pour des débits proches de l'étiage) : seul un suivi au cœur de l'été est possible. Ce suivi consiste à balayer l'ensemble de la bande active à l'aide d'une antenne RFID, à enregistrer la localisation de chaque traceur retrouvé, ainsi qu'à digitaliser la zone prospectée lors de chaque campagne de prospection. On peut résumer ci-après les livrables attendus dans le cas où cette prospection ferait l'objet d'une sous-traitance :

- Une geodatabase des traceurs retrouvés, format **.shp/points** intitulé **ProspectionRFID_2024vf.shp** qui précise l'emplacement de chaque traceur retrouvé, avec une structure de la table attributaire du type :
 - Type de prospection : actif/passif
 - Code d'identification du traceur (code alphanumérique de 16 chiffres pour les traceurs passifs, 3 chiffres pour les actifs)
 - Date de prospection
 - Cordonnées (x;y;z) du traceur retrouvé (système de coordonnées RGF93-Lambert93)
 - Commentaire en format texte (du type : estimation de la précision de la localisation ou toute autre information utile)
 - Opérateur/valideur de la donnée
- Un fichier **.shp/polygones** intitulé **Zone_prospection_2024vf.shp** qui précise pour chaque jour de prospection l'emprise de la zone prospectée, structure de la table attributaire du type précisé ci-après. La digitalisation de cette zone prospectée est possible à partir d'une orthophotographie ; dans ce cas il sera nécessaire de préciser dans le rapport le jeu de données utilisé (producteur, date, emprise) et le joindre à l'envoi en format **.ecw**. La structure de la table attributaire de la couche **Zone_prospection_2024vf.shp** est la suivante :
 - Date prospection
 - Type de prospection (actif/passif)
 - Surface en m²
 - Cordonnées (x;y;z) du barycentre de chaque polygone (système de coordonnées RGF93-Lambert93)
 - Commentaire en format texte (du type : estimation de la précision du géoréférencement ou toute autre information utile)
 - Opérateur/valideur de la donnée.

Ces fichiers SIG sont produits dans le système de coordonnées RGF93-Lambert93 (EPSG 2154) et compatibles avec une lecture sous QGIS. Ils sont accompagnés d'un rapport décrivant succinctement la campagne, qui mentionne en particulier :

- Le nombre de personnes/jours réalisé
- Les éventuelles limites à l'interprétation des résultats en termes de distances de transport au cours des dernières années (imprécision de la localisation, impossibilité de balayer certaines formes fluviales identifiées comme zones de dépôt probables, qui devront être

cartographiées dans le .shp « zone de prospection » si elles sont particulièrement étendues etc.).

Pour plus de précisions sur la méthodologie adoptée lors du suivi par traçage RFID en Roya, on se reportera utilement aux travaux d'étudiants suivants : Tourade, 2018 ; Martins, 2018 ; Martins, 2019 ; Martins, 2021.

2.2.2.3 *Suivi des flux sédimentaires par sismique passive*

Devant les défis techniques et logistiques que représente un traçage RFID en contexte torrentiel, et dans l'optique d'obtenir des données en continu plutôt que sur une fréquence événementielle ou plutôt annuelle dans le cas de la Roya, j'ai rapidement décidé de compléter le dispositif existant par l'installation d'un géophone (sismique passive) dédié au suivi des flux sédimentaires en continu.

En juin 2020 j'ai donc installé un géophone muni d'une centrale d'acquisition et pu lancer l'acquisition de données sismiques en continu à partir du 23/06/2020 à l'aval de Breil-sur-Roya (site de l'Arbousset, cf. Figure 29). Dans la mesure où il s'agissait d'une première installation dans un contexte aussi « fermé » et « rocheux » (contexte de gorges par rapport au contexte alluvial privilégié jusqu'à présent, cf. Bakker et al., 2020 ; Misset et al., 2020, T. Geay, *comm. pers.*), une rapide campagne de tests de vibrations dues au choc de particules sédimentaires sur le substratum en contrebas du géophone avait démontré que le système d'acquisition fonctionnait et devait enregistrer le transport sédimentaire en crue. Après un premier relevé des données acquises pendant l'été (relevé du 18/09/2020), et sans que nous ayons encore eu le temps de les analyser ou encore moins de calibrer l'instrument, l'épisode de la tempête Alex (crue du 02/10/2020) est survenu, qui a ensuite été caractérisé comme ayant une période de retour de 1000 ans (ONF-RTM et al., 2023a). Le géophone n'a pas été emporté et a pu enregistrer l'événement. Il s'agit donc de l'unique instrument de mesure en fond de vallée qui permet de remonter à la cinétique de la crue, puisque tous les instruments de mesure hydrologique ont été emportés sur le bassin versant. Ce suivi sismique au niveau de l'Arbousset est complété depuis le 28/05/2024 d'un dispositif similaire localisé à la chapelle de Viévol. Les spécifications techniques des instruments installés sont précisées dans le Tableau 7. La télétransmission des données sismiques acquises est prévue à brève échéance : les dispositifs nécessitent à l'heure actuelle d'aller décharger manuellement les données tous les 3 mois. L'environnement géographique des deux sites est très différent (cf. Figure 30) : le site de l'Arbousset est essentiellement rocheux, dans un secteur en gorges avec substratum affleurant, tandis que le site de la Madone de Viévol est alluvial et structuré par la confluence entre la Roya et le vallon de la Morte.

Tableau 7. Spécifications techniques des géophones installés en Roya.

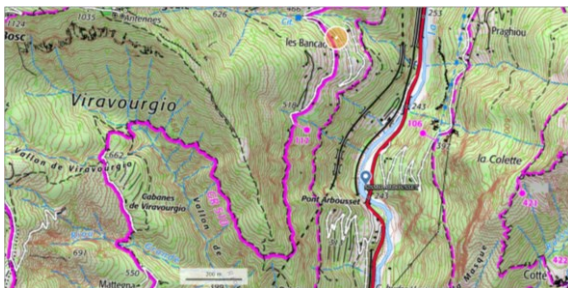
Site d'installation	Arbousset	Viévol
Date d'installation	23/06/2024	28/05/2024
Coordonnées du site X ; Y (RGF 93 – Lambert 93)	1062559,52 ; 6323593,85	1065269,20 ; 6345210,49
Altitude (a.s.l.)	247,2 m	966,7 m
Environnement géographique	Substratum affleurant (gorges); route départementale et voie ferrée à proximité immédiate	Alluvial, confluence avec le vallon de la Morte; route départementale à proximité immédiate, voie ferrée à 200 m
Propriétaire de la parcelle	Particulier	Commune de Tende
Dist. au chenal horiz./vertic.	7 m / 4 m	14 m / 1 m
Géophone	Modèle PE-6/B de marque SENSOR Nederland, fourni par Digos. 4,5 Hz, 3-component geophone with 3 m sensor, cable suitable to DATA- CUBE ³ . Enregistrement sur une unique composante (z).	idem
Centrale d'acquisition	Digos DATA-CUBE ³ seismic data recorder type 2 (3 channels, 32 GB, external power supply version, external GPS antenna included) Fréquence d'enregistrement : 800 Hz (800 mesures par seconde)	idem
Centrale de télétransmission	Communication CUBE (CCUBE) for live data streaming in miniSEED format via LTE/UMTS, WiFi and Ethernet (non encore opérationnelle)	idem
Format des données (propriétaire)	.BMJ	.C8S
Profondeur d'installation	0,70 m	idem
Mode d'alimentation	Panneaux solaires	Réseau électrique



(a) Arbusset, la vue est prise vers l'amont et le géophone est localisé en rive gauche (à droite de la photo). Cliché nov. 2022.



(b) Madone de Viévol, la vue est prise vers l'amont et le géophone est localisé en rive droite (à gauche de la photo). Cliché juil. 2024.



(c) Arbusset. L'emplacement du géophone est indiqué par une goutte bleue, coordonnées en RGF 93 – Lambert 93 : 1062559,52 ; 6323593,85. Source : www.geoportail.gouv.fr, IGN 2023 [carte produite le 26/07/2024].



(d) Madone de Viévol. L'emplacement du géophone est indiqué par une goutte bleue, coordonnées en RGF 93 – Lambert 93 : 1065269,20 ; 6345210,49. Source : www.geoportail.gouv.fr, IGN 2023 [carte produite le 26/07/2024].

Figure 30. Situation géographique des géophones installés en Roya. (a) et (c) Site de l'Arbusset. (b) et (d) Site de Viévol.

Les données sont acquises dans un format propriétaire (extension .BMJ ou .C8S). Elles sont ensuite traitées sous R Studio selon une routine initialement développée par T. Geay (actuellement ONF-RTM). Ce post-traitement inclut un sous-échantillonnage des données enregistrées et présente les données sous forme de graphique puissance = f(temps) ou spectrogramme = f(temps).

2.2.3 Dynamique sédimentaire des frayères en Roya : apports d'un suivi par RFID passive

Malgré la présence de plusieurs barrages, en particulier sur le cours principal, et l'occurrence de crues éclair et intenses typiques du régime méditerranéen, la Roya est reconnue pour ses populations de truites de souche sauvage (méditerranéenne) et l'activité de pêche y est très développée. Cette étude (Chapuis et al., 2019a) visait à explorer le lien entre hydrologie et évolutions morpho-sédimentaires des frayères à truites, pour apporter des éléments de compréhension concernant :

- D'une part le caractère stable dans le temps et dans l'espace des zones de frai des populations de truites dans ce cours d'eau (Saint Pé et al., 2018)
- D'autre part l'éventuelle influence des éclusées sur la dynamique de ces zones de frai.

Pour ce faire nous avons équipé les graviers constituant le matériel des frayères de transpondeurs RFID passifs. En parallèle, l'ensemble du matériel alluvial présent dans le lit a fait l'objet d'un traçage sédimentaire, afin d'évaluer les flux au sein de la branche principale. Pour rappel (Rollet et al., 2008 ; Liébault et al., 2012 ; Chapuis et al., 2014 ; Chapuis et al., 2015 ; Arnaud et al., 2015 ; Piégay et al., 2016 ; Liébault et al., 2023), un transpondeur RFID permet d'identifier le déplacement d'une particule marquée grâce à un identifiant unique. La localisation des traceurs et la topographie de la zone d'étude ont également été suivies par GPS (GPS Trimble® R10) avant et après les crues de printemps, au cours des étés 2018 et 2019. Pour plus de détails sur les matériels et protocoles utilisés, le lecteur se reportera aux travaux d'étudiants de Tourade, 2018 ; Martins, 2018 ; Martins, 2019 ; Martins, 2021. Plus généralement sur le traçage RFID, le lecteur pourra aussi se reporter aux travaux de Chapuis et al., 2014 et Arnaud et al., 2015.

Au total, plus de 800 traceurs ont été déployés entre mars 2018 et avril 2019, sur 3 sites localisés sur la branche principale (cf. Figure 29 : sites de Fontan/Ambo, Pertus, Airole/Lamberta). Sur chaque site, outre le relevé topographique de la zone, le déploiement était décomposé en deux séquences :

- Une séquence « frayères » : une centaine de traceurs étaient déployés sur la surface d'une frayère identifiée, selon un maillage régulier qui couvrait l'ensemble de la zone de frai et en mimant la granulométrie du matériel en place ; la granulométrie des traceurs de ce groupe est donc relativement fine ($D_{50} = 12$ mm, cf. Figure 31), ce qui a occasionné un défi technique pour équiper des particules aussi petites
- Une séquence « ensemble de la gamme granulométrique » (GSD totale, pour *Grain Size Distribution*) : une autre centaine de traceurs étaient déployés, cette fois-ci à l'échelle de l'ensemble du site, toujours selon un maillage régulier, mais plus espacé pour couvrir l'ensemble d'une séquence seuil-mouille. La granulométrie des traceurs de ce groupe est donc relativement grossière (D_{50} compris entre 28 et 188 mm, cf. Figure 31).

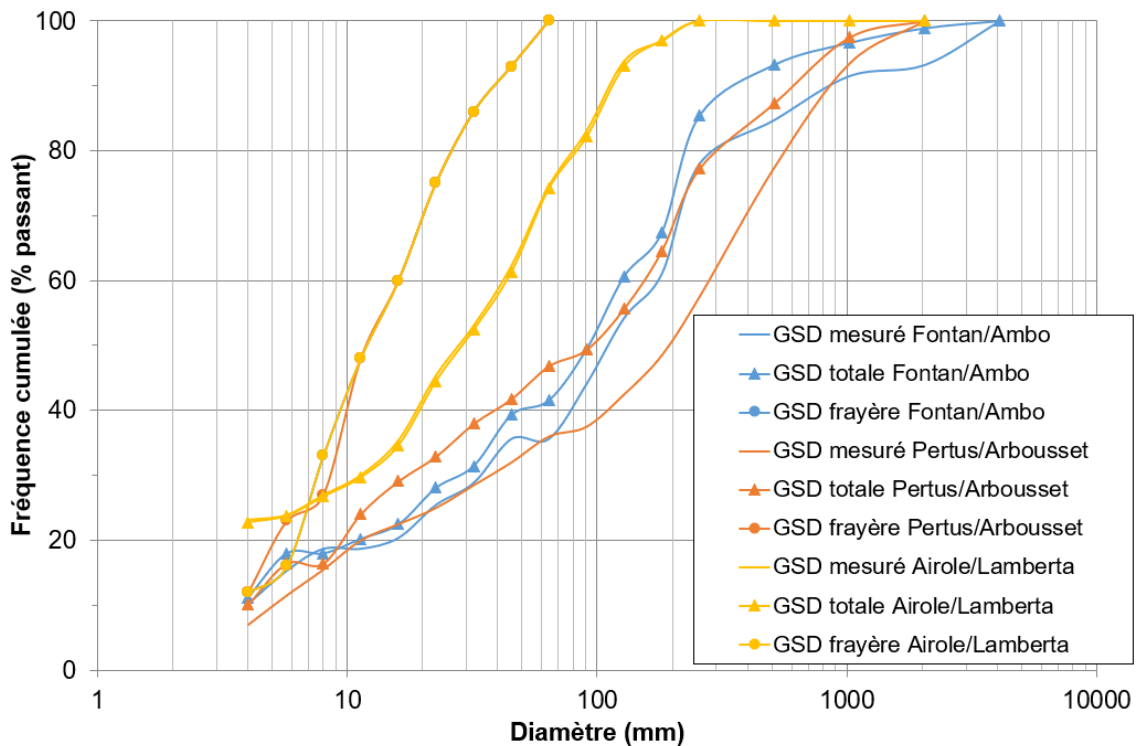
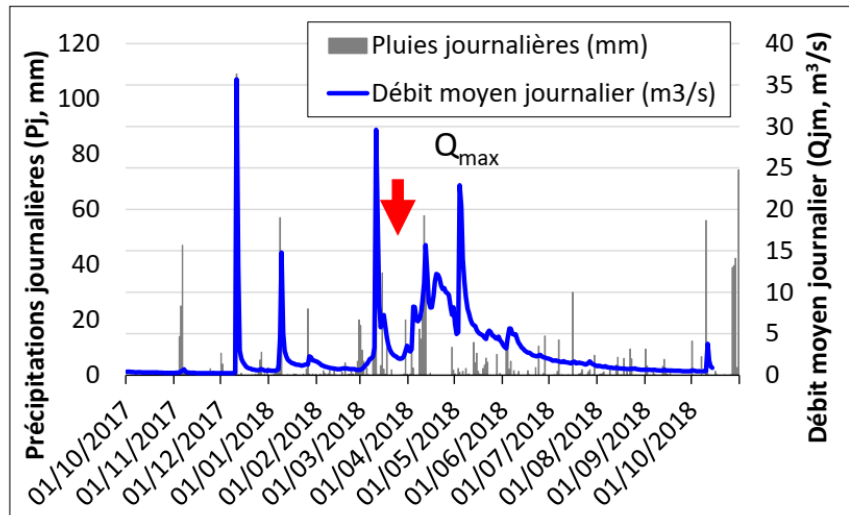


Figure 31. Distributions granulométriques (GSD, Grain Size Distribution) sur les 3 sites d'étude Fontan/Ambo, Pertus/Arbousset et Airole/Lamberta.

Pour chaque site, est mentionnée la distribution granulométrique mesurée sur site, la distribution granulométrique des traceurs de la séquence « ensemble de la gamme granulométrique » (« GSD totale ») et la distribution granulométrique des traceurs de la séquence « frayères » (« frayère »).

Après déploiement de la première série de traceurs RFID, une crue longue a eu lieu au printemps 2018 (Q_{\max} instantané = 63 m³/s le 04/05/2018, cf. Figure 32) qui remobilisé l'ensemble du matériel du lit de diamètre < 512 mm et l'ensemble des traceurs RFID de la frayère. Les traceurs mis en place ont donc été réinsérés dans l'ensemble du matériel du lit et leur déplacement est représentatif des dynamiques sédimentaires dans le cours d'eau dès la première campagne de suivi. Les résultats présentés ci-après se concentrent sur le site de Pertus (cf. Figure 33) et sur le site d'Airole/Lamberta (cf. Figure 34). On notera que les frayères montrent une évolution topographique verticale de l'ordre du mètre au cours de cet événement hydrologique d'intensité modérée.



Précipitations journalières (Pj) et débit moyen journalier (Qjm)
 St Dalmas-de-Tende, 01/10/2017 – 30/04/2018
 (données Banque Hydro et Météo France)

Figure 32. Précipitations journalières et débit moyen journalier à St Dalmas-de-Tende, 01/10/2017 – 30/04/2018.

Données Banque Hydro et Météo France, in Chapuis et al., 2019a. La flèche rouge indique la période de déploiement des traceurs.

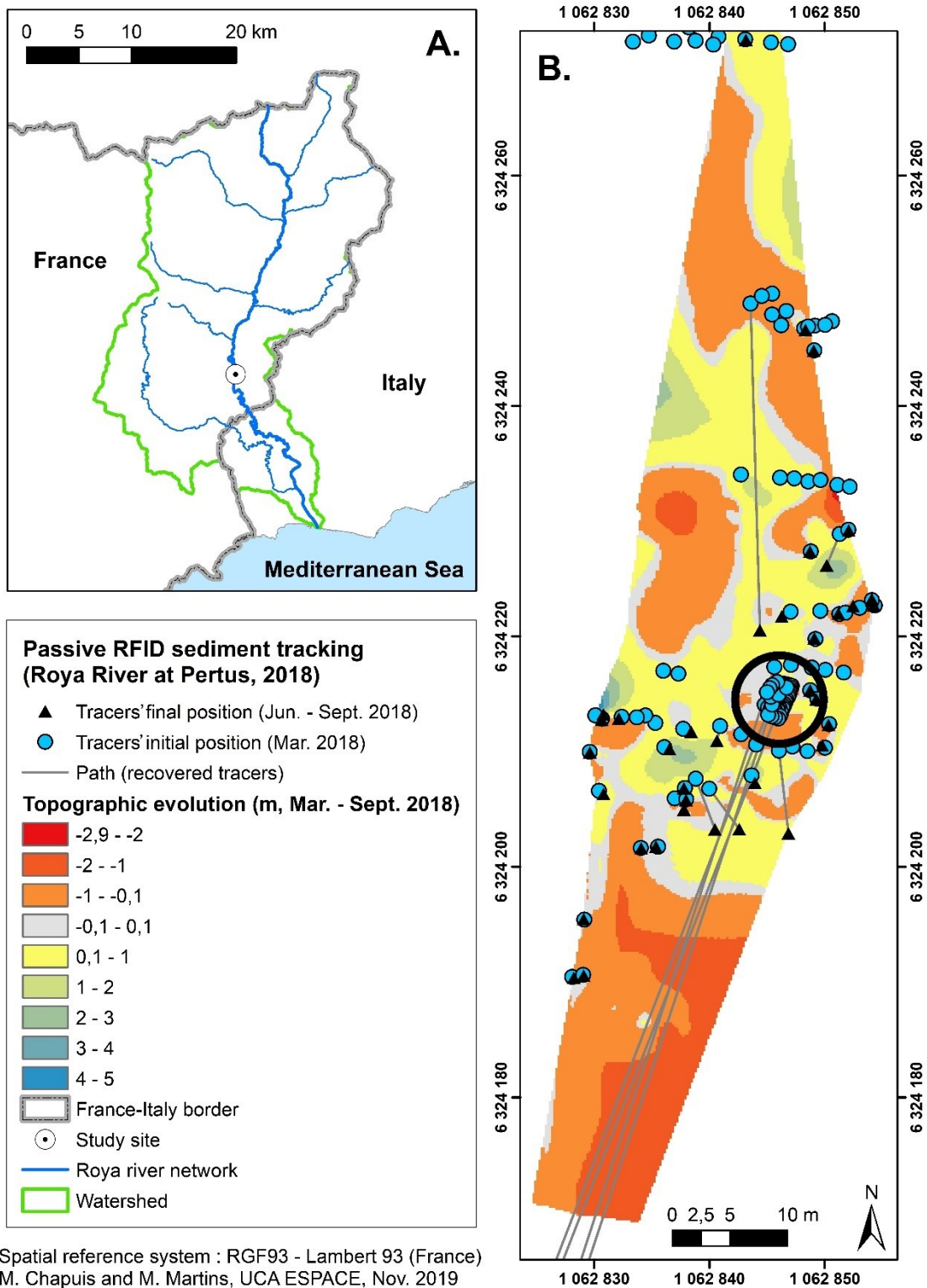


Figure 33. Résultats du traçage sédimentaire 2018 à Pertus. (a) Site d'étude : la Roya à Pertus. (b) Positions initiale, position finale, déplacement des traceurs retrouvés, et évolution topographique de la zone entre mars et sept. 2018.

L'écoulement est orienté du nord au sud. L'emplacement de la frayère est indiqué par un cercle noir et présente une densité importante de traceurs pour suivre en détail l'évolution morpho-sédimentaire de la frayère.

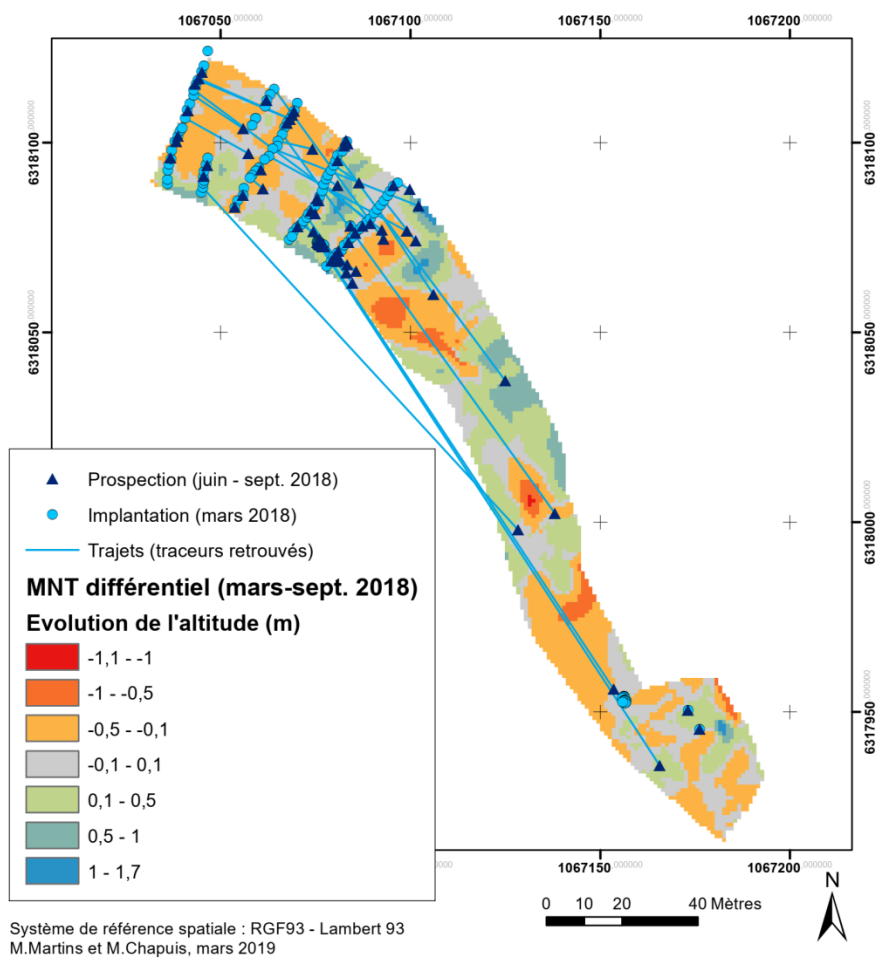


Figure 34. Résultats du traçage sédimentaire 2018 sur le site d'Airole/Lamberta.

Sont indiqués la position initiale, la position finale, le déplacement des traceurs retrouvés, et l'évolution topographique de la zone entre mars et sept. 2018. L'écoulement est orienté du nord au sud.

A la suite de cette première année de suivi, l'événement hydrologique principal a été une crue éclair au printemps 2019 (Q_{max} instantané = 133 m³/s le 24/04/2019), qui a elle aussi remobilisé l'ensemble du matériel du lit de diamètre < 512 mm.

Tableau 8. Bilan des campagnes de suivi RFID passive 2018 et 2019.

Campagne	Site	Séquence de déploiement	Nb. de traceurs déployés	Nb. de traceurs retrouvés au 06/06/2019	Taux de retour au 06/06/2019 (%)	Distance maximale (m)
2018	Fontan/Ambo	GSD totale	81	-	-	-
		Frayère	53	-	-	-
	Pertus	GSD totale	78	38	49	89
		Frayère	100	3	3	118
	Airole/Lamberta	GSD totale	102	56	55	171
		Frayère	99	48	48	14
2019	Fontan/Ambo	GSD totale	27	-	-	-
		Frayère	-	-	-	-
	Pertus	GSD totale	27	17	63	166
		Frayère	101	1	1	8
	Airole/Lamberta	GSD totale	25	-	-	-
		Frayère	100	-	-	-

GSD : *Grain Size Distribution*, i.e. distribution granulométrique

Malgré des taux de retour faibles voire très faibles (cf. Tableau 8), nous avons mis en évidence des conditions de transport total pour le matériel des frayères au cours des deux années de suivi, sur des distances dépassant la centaine de mètres (max. détecté : 118 m pour un traceur de 6 mm de diamètre en 2018).

Les deux campagnes de suivi de 2018 et 2019 suggèrent un contrôle hydraulique de l'emplacement des frayères, dû au contrôle structural exercé par les blocs plurimétriques sur le dépôt des graviers constitutifs de la frayère. Le suivi a également montré un renouvellement complet du matériel de la frayère au cours des épisodes de crue, assurant ainsi la qualité des habitats. Il est à noter que les observations complémentaires ont montré que les éclusées correspondaient à une mobilité partielle du matériel des frayères, et empêchant ainsi tant le colmatage par des sédiments fins que le développement de biofilm.

Pour compléter le dispositif en place, une antenne RFID passive fixe avait été installée au niveau du pont de l'Arbousset (cf. Figure 29). Elle n'a pas résisté à la première hausse du niveau d'eau : la puissance spécifique élevée ($> 2000 \text{ W/m}^2$ en crue) empêche de maintenir une antenne fixe fonctionnelle mais reste une piste privilégiée pour compléter ce suivi (cf. section 2.2.6). Enfin, une nouvelle campagne de déploiement de traceurs RFID passifs avait été réalisée en 2021 (776 traceurs déployés sur 4 sites : Viévol, Fontan/Ambo, Pertus/Arbousset, Airole/Lamberta, cf. Tableau 9 et Martins, 2021), pour mettre en place un suivi post-Alex. En raison du caractère toujours aussi chronophage de la prospection même dans un lit moins accidenté suite à la métamorphose fluviale post-Alex, nous avons pu réaliser un suivi en 2024 sur le site de Viévol uniquement, ce qui a permis de retrouver 4 traceurs, dont la distance maximale de transport mesurée a été de 4260 m en 3 ans (cf. Weiland, 2024).

Tableau 9. Synthèse du déploiement de traceurs RFID passifs post-Alex à l'été 2021.

Site	GSD totale	Frayère	Total
Viévol	118	70	188
Fontan/Ambo	116	80	196
Pertus/Arbousset	116	80	196
Airole/Lamberta	116	80	196
Total	466	310	776

D'un point de vue technique, les résultats de cette opération de traçage sédimentaire montrent le caractère inadapté de la RFID passive dans un contexte de granulométrie très étendue : les blocs plurimétriques, même post-Alex, rendent la prospection difficile. Les campagnes de terrain ont mis en évidence 1/ l'étendue de la gamme granulométrique régulièrement mobile ($5 \text{ mm} < \varnothing < 512 \text{ mm}$ avant l'événement Alex du 02/10/2020) et 2/ un contrôle structural, exercé par les blocs plurimétriques et le substratum, sur la mobilité des particules, particulièrement avant Alex. La RFID active confirme son potentiel dans ce type de terrain accidenté (cf. section 2.2.4), plus particulièrement pour l'étude des distances de transport annuelles et dans les secteurs divagants dans la basse vallée, mais reste néanmoins chronophage et nécessite une main d'œuvre qualifiée. Les nombreuses portions immergées en amont expliquent également les faibles taux de retour dans ces secteurs, tant pour le suivi par RFID passive que par RFID active.

Néanmoins, des perspectives sont offertes pour l'interprétation des résultats même avec des faibles taux de retour : MacVicar et Papangelakis (2022) soulignent à quel point « on peut dire

beaucoup de choses » à partir des traceurs manquants. En particulier les interprétations croisées avec les évolutions morphologiques du lit (suivi topographique) enrichissent nettement l'analyse brute des déplacements des traceurs (Liébault et al., 2023).

2.2.4 Transport solide de l'ensemble de la gamme granulométrique : éléments de connaissance issus d'une opération pluriannuelle de traçage sédimentaire, discussions et perspectives de recherche

Au printemps 2019, 79 traceurs RFID actifs ont été déployés en Roya, sur les sites de Fontan/Ambo, Pertus et Airole/Lamberta (respectivement 27, 25 et 27 traceurs déployés, stratégie de déploiement : cf. section 2.2.2.2 et Martins, 2019). Les sites de Fontan/Ambo et Pertus ont subi immédiatement après implantation une crue de printemps de 133 m³/s : on peut donc considérer que les traceurs de ces deux sites avaient été réintégrés dans la masse et qu'ils ont donc un comportement similaire aux particules sédimentaires qui constituent la charge alluviale dès la campagne de prospection de l'été 2019. En ce qui concerne le site d'Airole/Lamberta, on considèrera que la première campagne de résultats fiables est celle de l'été 2020. Les résultats des campagnes annuelles de suivi sont présentés dans le Tableau 10 et le Tableau 11. Les distances de transport observées dans ce contexte torrentiel sont cohérentes avec les résultats des autres études disponibles (voir Liébault et al., 2023 pour un recensement exhaustif des études par traçage, dont RFID passif et actif, et par exemple Arnaud et al., 2023 pour un suivi pluriannuel en contexte alluvial dont la pente moyenne est de l'ordre de 1‰, soit un ordre de grandeur de moins que la pente en Roya).

Tableau 10. Résultats annuels des campagnes de traçage sédimentaire par RFID active à partir de 2019. Les débits mentionnés sont au-dessus de la Q2 et sont donc morphogènes. Les chiffres en italique sont des valeurs réexpertiées. Précision de la localisation : environ 150-200 m. Pour mémoire, les données issues du suivi par RFID passive à Pertus de 2024 ont concerné 2 traceurs, dont la distance de transport a été respectivement de 771 m entre 2018 et 2024, et 947 m entre 2021 et 2024.

Année de suivi		2019	2020	2021	2022	2023	2024
Q _{max} à Breil (m ³ /s)		133	140	[1000 ;1500]	9*	11* ^μ	23 ^ε
Nb de traceurs retrouvés		17	16	4	22	29	3
Dist. de transport max. (m)							
Site	Viévolà	/	/	/	150	322	449
	Ambo/Fontan	240	632	5860	4273	159	33
	Pertus	166	50	n.r.	57	53	/
	Airole/Lamberta	n.p.	2875	474	403	60	/

n.r./n.p. : non renseigné/non pertinent

* : débit moyen journalier

^μ : en attente de données pour validation

^ε : à St Dalmas

Tableau 11. Vitesse annuelle virtuelle moyenne sur la période considérée (m/an). Sont indiqués le nombre de traceurs à partir duquel la valeur a été calculée. Les résultats se situant dans la gamme d'incertitude des mesures de terrain sont indiqués entre parenthèses.

Période	2021-2023		2019-2023	
	Taille échantillon	Vitesse virtuelle (m/an)	Taille échantillon	Vitesse virtuelle (m/an)
Viévola	n=8	323	n=0	/
Ambo	n=2	(106)	n=0	/
Pertus	n=3	(179)	n=0	/
Lamberta	n=4	(30)	n=5	383

A noter que la campagne de 2021 correspond au suivi post-Alex : le déplacement des traceurs retrouvés post-crue est présenté en Figure 35 et présente une distance de transport maximale observée qui, bien qu'elle reste du même ordre de grandeur qu'avant Alex, est plus élevée et présente une plus grande incertitude. Le (très) faible taux de retour rend délicate toute interprétation sur les distances de transport observées. Le fait même que peu de traceurs aient été retrouvés interroge quant aux raisons de ce faible taux de retour : en effet les causes de non-récupération de traceurs ont été identifiées (Lamarre et al., 2005 ; Liébault et al., 2012). Ici, les hypothèses d'explication les plus probables sont :

- La casse des transpondeurs
- L'export hors de la zone de prospection, i.e. en Méditerranée car l'ensemble de la bande active remobilisée pendant la tempête Alex a été prospectée.

En effet, avec les traceurs RFID actifs, on évite le problème de la collision de signal due au clustering qui avait été identifié pour les traceurs passifs. D'autre part, le substratum est largement affleurant sur une grande partie du linéaire et les épaisseurs alluviales sont en général inférieures au mètre (Chapuis et al., 2019a), notamment dans la partie aval où la vague sédimentaire due à l'épisode Alex semble s'être atténuée (Liébault et al., 2024), i.e. au niveau des sites de Pertus et d'Airole. Ceci rend peu probable un enfouissement des traceurs qui empêcherait une détection, même malgré la métamorphose fluviale observée post-Alex (Liébault et al., 2024).

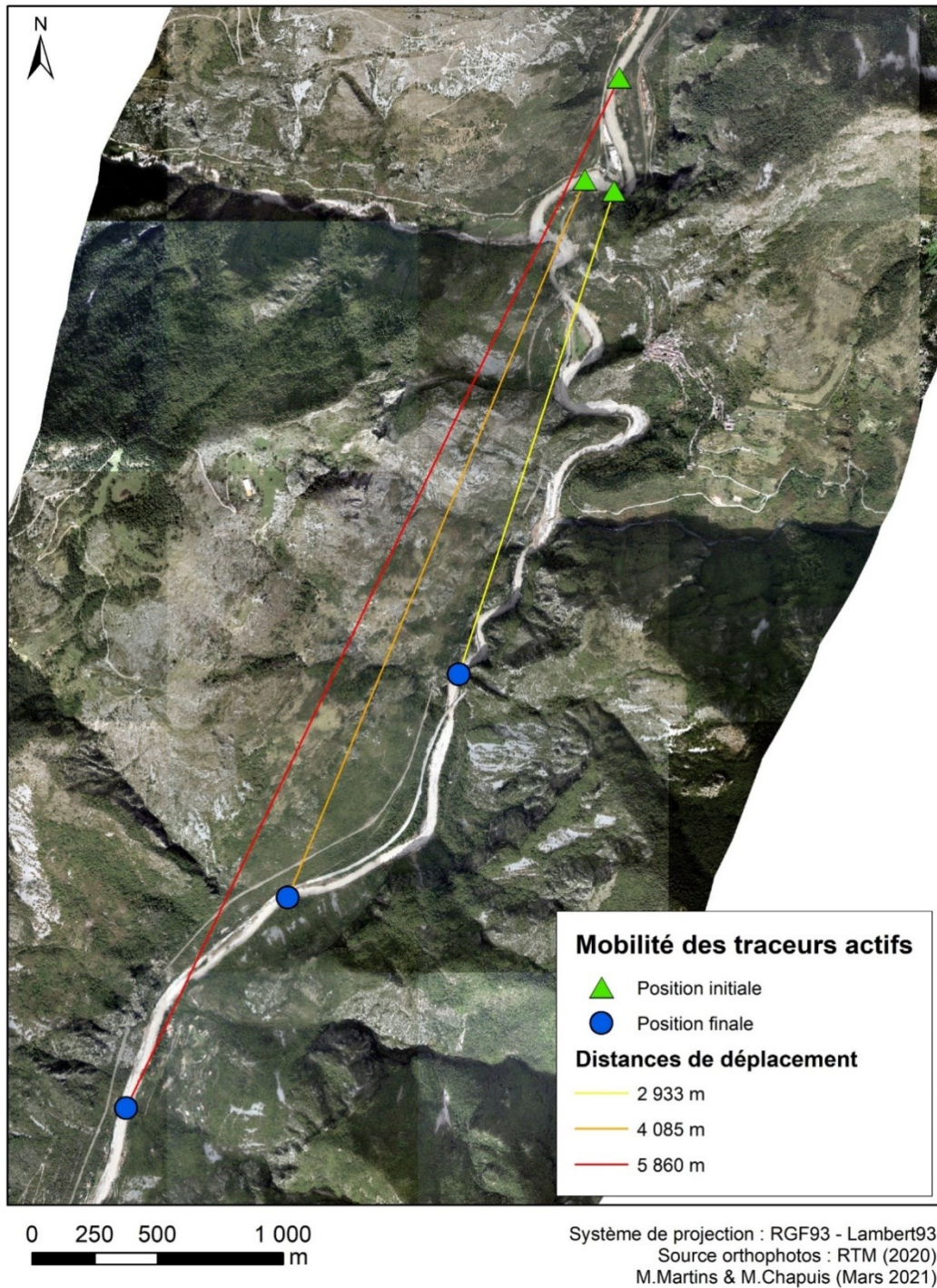


Figure 35. Cartographie des résultats du traçage sédimentaire par RFID active post-Alex (campagne 2021) pour les traceurs initialement situés sur le site Fontan/Ambo.

L'écoulement est orienté du nord au sud. Les distances à vol d'oiseau sont représentées sur la carte, tandis que les valeurs mentionnées dans la légende correspondent aux distances réelles parcourues par les traceurs retrouvés post-crue.

2.2.5 Etude des flux sédimentaires en Roya : éléments de connaissance issus du suivi par sismique passive, discussions et perspectives de recherche

Pour compléter le suivi annuel des transferts sédimentaire par traçage RFID qui s'est avéré encore plus chronophage et compliqué que prévu dans ce contexte torrentiel complexe, j'ai décidé en 2019 de mettre en place un suivi par sismique passive en Roya. La technologie utilisée était alors encore en développement, et n'avait pas été testée dans un contexte aussi rocheux (gorges avec affleurements de substratum, au lieu des tronçons à charge alluviale testés jusqu'à présent ; T. Geay, *comm. pers.*).

Nous avons donc installé un géophone (sismomètre) le 23/06/2020 (cf. section 2.2.2.3) au niveau du secteur de l'Arbousset. Comme évoqué plus haut, cet instrument de mesure a résisté à la crue du 02/10/2020, et permet de remonter à la cinétique de la crue. Un deuxième géophone a été récemment installé en amont (Viévola le 28/05/2024, cf. Figure 29 et Tableau 7).

Plus généralement, cette instrumentation permet un suivi en continu des flux sédimentaires dans le cours d'eau. Non calibrée, elle ne peut prétendre à une quantification absolue des flux comme ce qui avait pu être réalisé dans l'étude de Misset et al. (2020). Cependant elle permet une appréciation (cf. Figure 36) :

- De l'intensité relative des événements de transport solide sur l'ensemble de la chronique
- De la cinétique de ces événements.

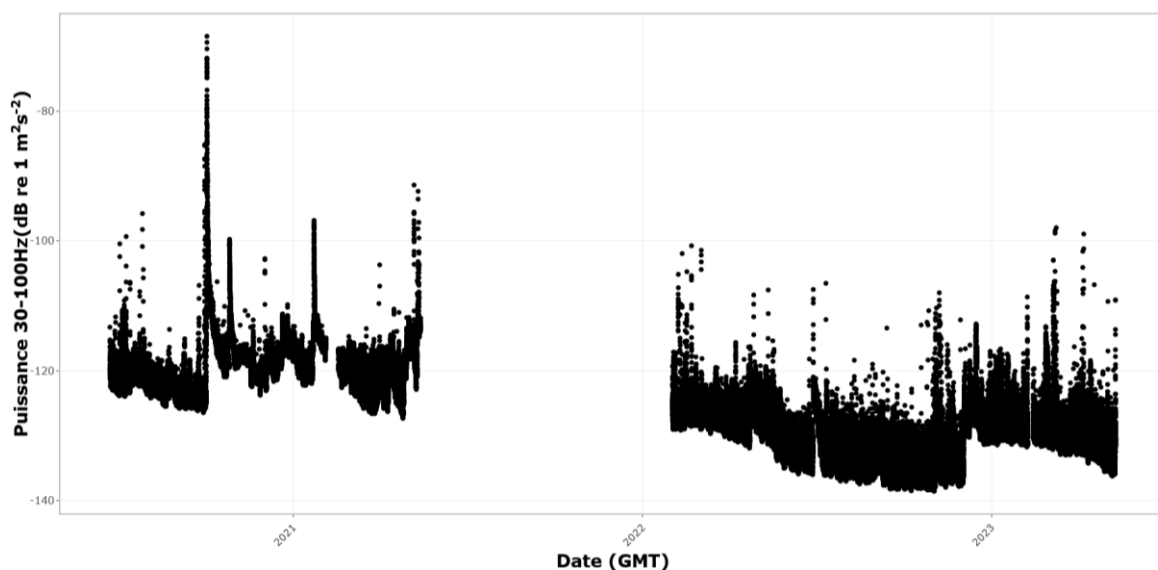


Figure 36. Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 24/06/2020 et le 11/05/2023. On notera en particulier l'épisode de transport solide associé à la tempête Alex du 02/10/2020.

En ordonnée sont présentées les variations d'amplitude de la bande spectrale 30-100 Hz sur la composante z, ce qui correspond à une variation de l'intensité (i.e. de la puissance) des vibrations sur du sol sur cette composante associée au transport sédimentaire dans le cours d'eau. La période blanche qui court entre mi-2021 et début 2022 correspond à une panne de l'instrumentation (alimentation électrique défectueuse).

Comme nous l'avons précisé dans la section 2.2.2.3, le géophone installé à l'aval de Breil-sur-Roya est l'unique instrument de mesure en Roya dédié au suivi du cours d'eau, qui n'ait pas été

emporté : il permet ainsi de suivre la cinétique de la crue d'un point de vue sédimentaire, et a notamment permis d'apporter rapidement certains éléments quant au calage des modélisations hydrologiques, avant que le retour d'expérience hydrologique ait pu être rendu disponible (CEREMA, 2021 ; Brigode et al., 2021 ; Chapuis et al., 2022b).

Il est intéressant de comparer la dynamique de la crue telle que rapportée par les témoignages dans le retour d'expérience post-Alex (ONF-RTM et al., 2023a) et la cinétique du signal sismique. En effet le retour d'expérience mentionne « [en] amont de Breil sur Roya les premiers débordements sont documentés à partir de 18h20. Le pic de crue est décrit comme ayant eu lieu entre 00h45 (niveau de +2m par rapport au tablier du pont Charabot) et 02h00 du matin. » (p. 39). D'après la suite de l'horodatage reconstitué, à 20h il est mentionné que le « Pont Viel [est] déjà emporté », assorti d'une « coupure de l'électricité ». Notons enfin que le retour d'expérience post-Alex a mis en évidence l'existence d'un pic de crue aux alentours de 1h-2h le 03/10/2020 à Breil (ONF-RTM et al., 2023a, p. 50).

Or les mesures sismiques à l'Arbousset indiquent un unique pic d'intensité aux alentours de 19h50 (cf. Figure 37). Nous proposons d'interpréter ces différents éléments comme le fait que la rupture du pont de Veil a coïncidé avec une bouffée sédimentaire qui s'est propagée au moins jusqu'au pont de l'Arbousset situé à 6 km à l'aval, et que cette bouffée sédimentaire a constitué l'essentiel de l'apport solide pendant la crue sur ce secteur. Cette interprétation est cohérente avec l'atténuation, au niveau de Breil, de la vague sédimentaire issue de l'amont du bassin versant suggérée d'après l'étude des évolutions morphologiques du chenal (Liébault et al., 2024) et les évolutions morphologiques d'intensité modérée observées sur le secteur italien au sortir des gorges à Trucco (IM, Italie).

Par ailleurs, on peut faire l'hypothèse que la destruction du pont de Veil à l'amont de Breil vers 20h soit la conséquence aval des désordres liés à un fort transport sédimentaire (bouffées sédimentaires et destruction du pont des 14 arches) mentionnés sur le secteur de Tende entre 18h et 19h (ONF-RTM et al., 2023a, p. 40) : le temps de propagation des désordres entre Tende et Breil serait cohérent.

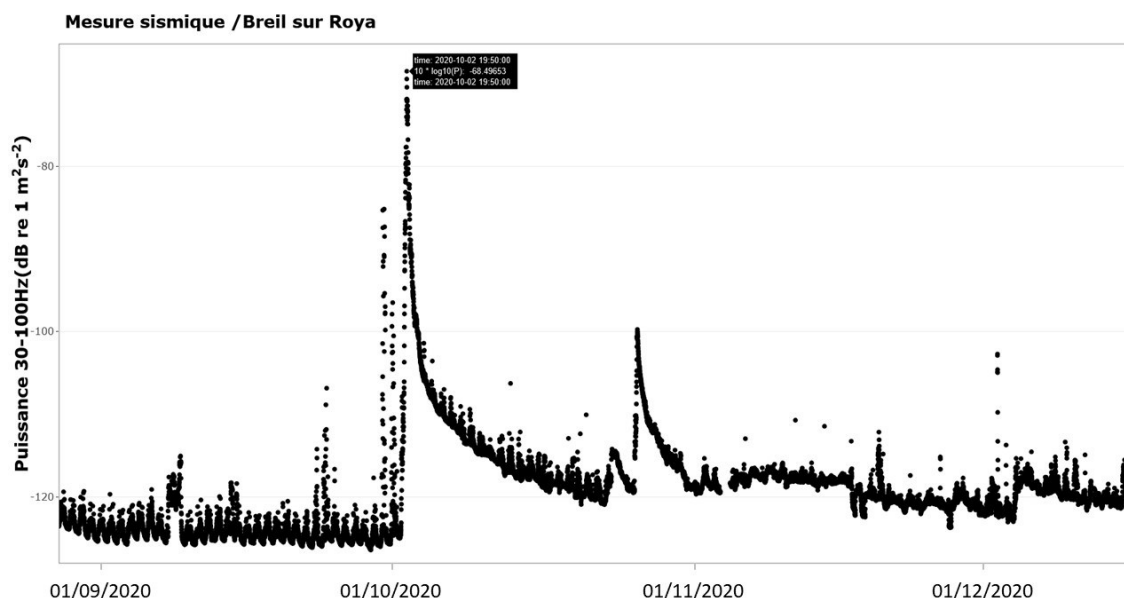


Figure 37. Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 28/08/2020 et le 16/12/2020. On notera en particulier l'épisode de transport solide associé à la tempête Alex du 02/10/2020 dont l'unique pic mesuré est situé vers 19h50 à l'aval de Breil.

En ordonnée sont présentées les variations d'amplitude de la bande spectrale 30-100 Hz sur la composante z, ce qui correspond à une variation de l'intensité (i.e. de la puissance) des vibrations sur du sol sur cette composante associée au transport sédimentaire dans le cours d'eau.

Pour aller au-delà de l'analyse de l'événement du 02/10/2020, on peut noter deux points d'intérêt concernant le signal sismique. Un premier point d'intérêt est le caractère cyclique très régulier du signal observé sur le niveau de base, avant et après Alex (cf. Figure 37 et Figure 38). Nous proposons en première interprétation que cela corresponde aux éclusées sur le secteur, dans la mesure où le traçage sédimentaire par RFID passive avait démontré une mobilité de la charge grossière y compris pendant les éclusées (cf. section 2.2.3). Cependant cette hypothèse devrait être approfondie grâce à l'étude des débits à Breil ; notamment, le fait qu'une telle cyclicité soit observée également lors de la décrue est intrigant (cf. Figure 37).

Un deuxième point d'intérêt concerne les variations brutales du niveau de base observées post-Alex, qui tendent ensuite à s'atténuer en quelques semaines/mois (cf. Figure 36, Figure 37, Figure 38 et Figure 39a). Nous proposons d'interpréter ce phénomène en prenant en compte le fait qu'après l'épisode du 02/10/2020, les matériaux constituant le lit de la Roya ont été entièrement remobilisés : le pavage existant a été rompu. Les sédiments présentent donc une mobilité accrue post-Alex dans la mesure où ils ne sont plus imbriqués les uns dans les autres : ceci est d'ailleurs confirmé par les résultats du traçage sédimentaire (cf. section 2.2.4 et particulièrement Tableau 10). Ainsi, par le biais d'un phénomène de dilatation/compaction verticale et réagencement des particules sur l'axe longitudinal, par ailleurs déjà documentés en rivière (Marquis et Roy, 2012), on peut supposer qu'à la suite de chaque épisode de crue, une certaine épaisseur du matelas alluvial est remobilisée, et mettrait plusieurs semaines/mois à se stabiliser. A l'heure actuelle, cette piste d'explication nous paraît être la seule à même d'expliquer la durée et la fréquence de ces « shifts » du niveau de base. Ce phénomène est particulièrement visible suite à la tempête Aline d'octobre 2023 (cf. Figure 38 et Figure 39a).

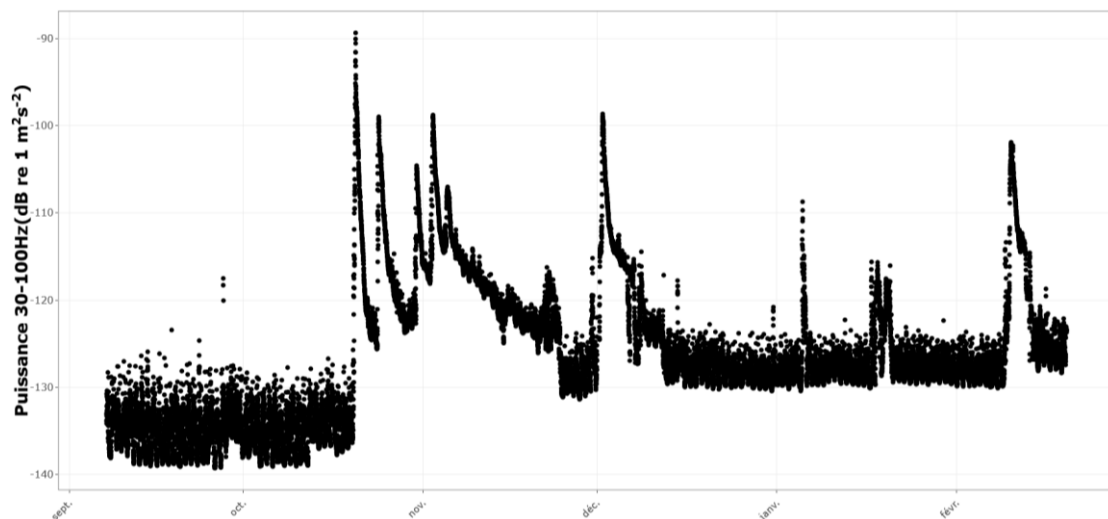
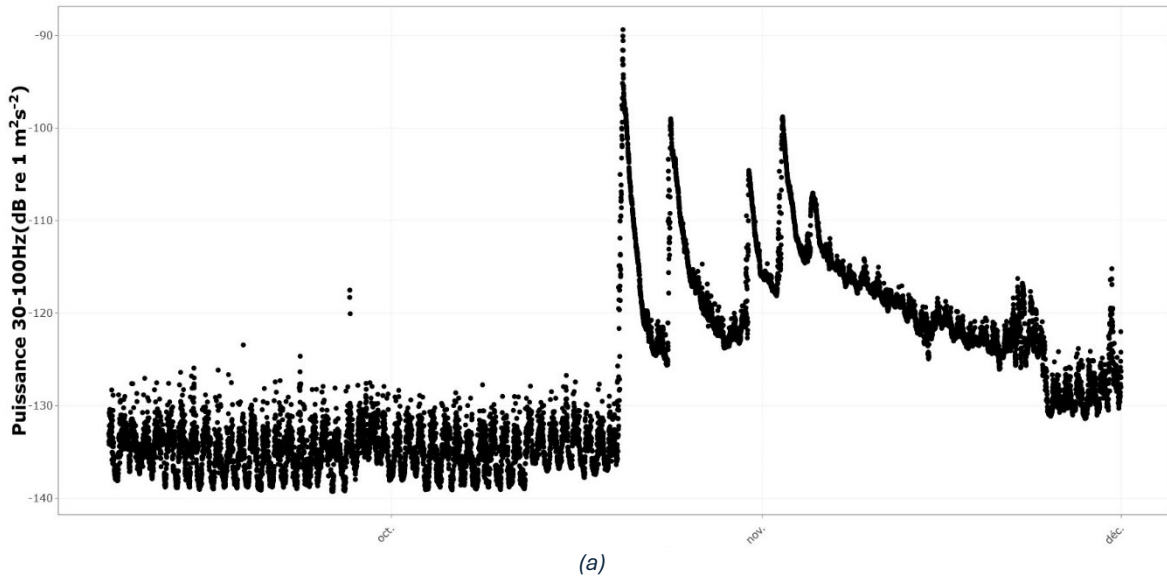


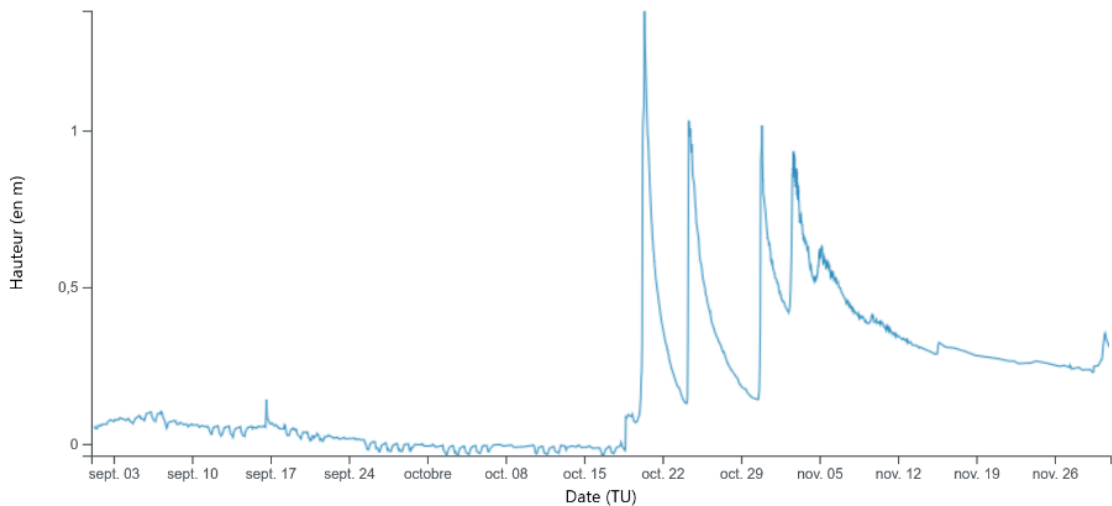
Figure 38. Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 07/09/2023 et le 20/02/2024. On notera en particulier l'épisode de transport solide associé à la « tempête Aline » fin octobre 2023.

En ordonnée sont présentées les variations d'amplitude de la bande spectrale 30-100 Hz sur la composante z, ce qui correspond à une variation de l'intensité (i.e. de la puissance) des vibrations sur du sol sur cette composante associée au transport sédimentaire dans le cours d'eau.



Hauteur instantanée - Données les plus valides de l'entité - Y661 4010 03 - La Roya à Tende [Saint-Dalmas-de-Tende] - Station Amont DREAL - du 01/09/2023 00:00 au 30/11/2023 23:59 (TU)

Généré le 13/12/2023 14:11 (TU)



Source : HydroPortail

Figure 39. (a) Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 07/09/2023 et le 01/12/2023. (b) Hauteur d'eau instantanée à la station de St Dalmas-de-Tende entre le 01/09/2023 et le 30/11/2023.

On notera en particulier l'épisode associé à la « tempête Aline » fin octobre 2023 et la similarité des pics entre le signal sismique (cf. Figure 38) et le signal hydrologique, tant en termes de fréquence que d'intensité relative, et ce malgré la distance qui sépare les deux sites de mesure (cf. Figure 29).

Pour la suite, la principale piste explorée pour exploiter ces chroniques sismiques est le couplage avec des données hydrologiques, mesurées ou modélisées, afin d'investiguer le lien entre la cinétique des flux liquides et des flux solides. Dans la continuité du travail préliminaire réalisé à partir de stations sismiques maralpines pour interpréter les signaux liés à l'épisode Alex (Chmiel et al., 2022) ou à partir des modélisations hydrologiques en lien avec le signal sismique du géophone localisé à l'Arbousset (Chapuis et al., 2022b), nous sommes actuellement en train de

croiser les approches en géologie, en hydrologie et géomorphologie fluviale pour interpréter les signaux des stations sismiques « classiques », des stations hydrologiques et des deux géophones « dédiés au transport solide » sur les bassins versants maralpins (collaboration F. Lombard, ESPACE-AMU ; M. Chmiel, Géoazur et P. Brigode, Géosciences Rennes : cf. section 3.2.4).

Les premiers résultats suggèrent une très forte corrélation entre signal sismique à l'Arbousset et hydrogramme (F. Lombard, *comm. pers.*, d'après les travaux de E. Berger, 2024 – UniCA/ESPACE), sauf pour l'épisode d'octobre 2023 (tempête Aline). Ces éléments seraient confirmés par les mesures aux stations sismiques « classiques » environnantes (M. Chmiel, *comm. pers.*, d'après les travaux de M.-O. Dib, 2024 – UniCA/Géoazur).

2.2.6 Discussion

2.2.6.1 Au sujet du suivi des flux sédimentaires en Roya par traçage RFID

Distances de transport en Roya : mise en perspective des résultats

Au vu des taux de retour dont nous disposons, même en agrégeant les résultats obtenus en RFID passive et active, il n'est pas raisonnable de réaliser une étude statistique comme espéré initialement et réalisé par exemple par Arnaud et al. (2023) sur l'Ain, malgré un effort d'instrumentation (nombre de traceurs déployés) qui se situe plutôt dans la gamme haute des études RFID réalisées jusqu'alors (cf. Liébault et al., 2023 : Data S1 supplementary material). Difficile également de travailler sur des distances de transport moyennes comme par exemple dans Liébault et al. (2012) ou Vázquez-Tarrío et al. (2018).

On peut tout de même tirer des enseignements du traçage actif, notamment en dégageant des ordres de grandeur des distances annuelles parcourues après ces 5 années de suivi. Nous sommes d'une part assez régulièrement au-delà de distances maximales annuelles largement supérieures au kilomètre, ce qui nous place dans la tranche haute de la méta-analyse proposée par Liébault et al. (2023) (cf. Figure 40), et ce même sans inclure les résultats liés à l'épisode de période de retour 1000 ans du 02/10/2020.

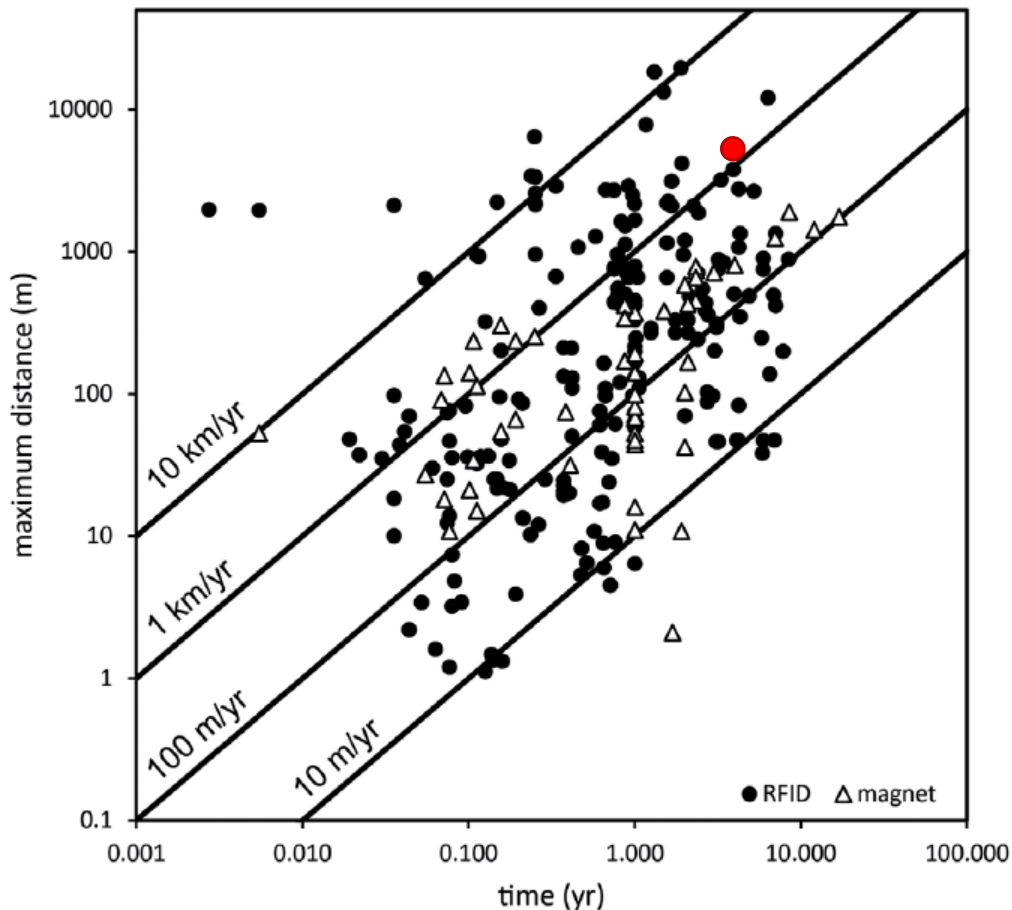


Figure 40. Relation entre distance maximale de transport et durée du suivi pour des études de traçage sédimentaire par RFID (cercles, $n=207$) ou traceurs magnétiques (triangles, $n=55$). Notre suivi se situe dans la gamme indiquée par le cercle rouge, ce qui confirme que la Roya est un système très actif, même sans inclure l'événement extrême du 02/10/2020.

Modifié d'après : Liébault et al., 2023

De même, l'analyse menée sur les distances moyennes de transport (valeurs à prendre avec précautions au vu de la faible population de traceurs utilisée) et la puissance spécifique place résolument la Roya dans la gamme des cours d'eau à transport solide intense (cf. Figure 41).

La partie de notre suivi (rectangle rouge) se situant à gauche de la courbe de Hassan et al. (1992) correspond au suivi post-Alex (puissances spécifiques modérées au vu des débits rencontrés depuis). A contrario, la partie de notre rectangle qui se situe à droite de la courbe correspond au suivi qui intègre l'événement extrême du 02/10/2020. Ceci explique que l'on se situe dans une gamme haute de puissance spécifique, qui ne présente pas encore de point de mesure dans la méta-analyse réalisée à l'échelle internationale par Liébault et al. (2023) : l'exemple de la Roya témoigne des difficultés techniques liées au suivi de systèmes aussi énergiques. L'incertitude portant sur la mesure des débits lors de cet événement de période de retour 1000 ans explique que nous ne positionnions pas un point, mais plutôt une gamme de valeurs sur le graphique.

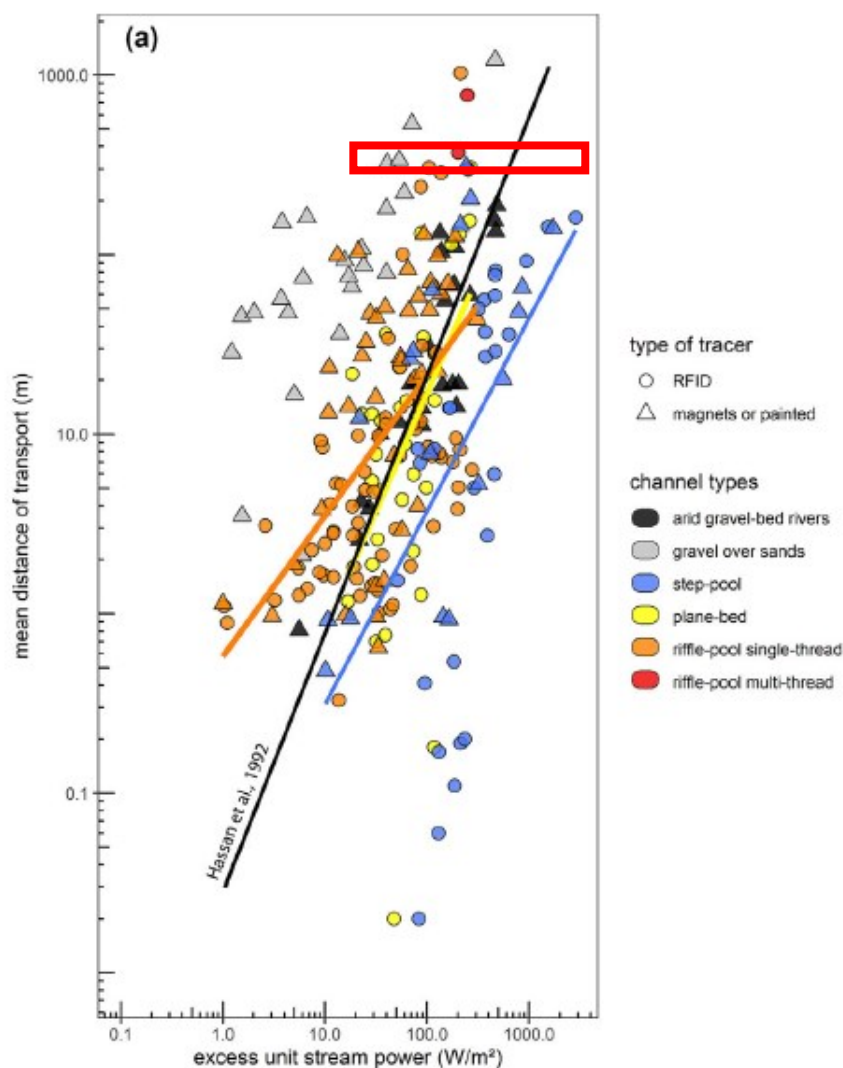


Figure 41. Relation entre distance moyenne de transport et puissance spécifique pour des études de traçage sédimentaire. Les résultats du Tableau 10 et du Tableau 11 indiquent des distances de transport moyennes de l'ordre de 300 à 400 m/an sur 4 ans tant sur le secteur amont que sur le secteur aval (morphologie riffle-pool single-thread à step-pool), ce qui correspond au rectangle rouge sur le graphique. La Roya se situe donc nettement dans la gamme des cours d'eau à transport solide intense, et l'événement extrême suivi explique que l'on soit dans une gamme de puissance spécifique haute, qui n'ait pas encore été suivie par traçage.

Modifié d'après : Liébault et al., 2023

Faible taux de retour du traçage RFID : hypothèses et perspectives de recherche

Le faible taux de retour des traceurs RFID (actifs ou passifs) nous pousse à travailler par hypothèses pour la suite de l'étude (cf. section 2.2.4).

L'hypothèse privilégiée d'export de la majorité des traceurs en Méditerranée pourra être confirmée ou infirmée grâce aux deux pistes suivantes :

- Lors des suivis ultérieurs, le fait de retrouver dans le chenal d'autres traceurs implantés avant l'épisode Alex pourra éventuellement nous conduire à revoir notre interprétation. A l'heure de la rédaction de ce manuscrit, ce n'est toujours pas le cas.
- Le projet SEALEX-CSR (2025) en collaboration avec S. Migeon (Géoazur) vise justement à aller prospecter le plateau continental à l'exutoire de la Roya (cf. sous-partie 3.1). Nous espérons

que cela apportera des éléments complémentaires significatifs pour l'interprétation de ces résultats, tant en termes de granulométrie des matériaux exportés en Méditerranée qu'en ce qui concerne les formes de dépôts associées ou encore (le Graal !) une confirmation nette avec la localisation d'un traceur marqué en mer. Les résultats de cette campagne seront analysés dans le cadre du projet StS-SEALEX (2024-2027).

Malgré ces réserves concernant l'interprétation des résultats, il faut tout de même noter que ce suivi constitue un jeu de données unique au monde (à notre connaissance, cf. Liébault et al., 2023) puisqu'il permet d'avoir des observations sur la mobilité de particules sédimentaires avant/après une crue de période de retour 1000 ans. Ces résultats sont par ailleurs complémentaires à l'analyse des modifications morphologiques observées à l'issue de l'épisode, en particulier l'explosion de la bande active qui a vu sa largeur être multipliée par deux : le détail des évolutions morphologiques observées et leur interprétation en termes de processus est présenté dans Liébault et al. (2024) : tant MacVicar et Papangelakis (2022) que Liébault et al. (2023) pointent l'intérêt de croiser suivi des évolutions morphologiques et analyse des déplacements de traceurs RFID.

Une autre hypothèse de travail à approfondir lors des prochains suivis consiste à évaluer dans quelle mesure les traceurs « non retrouvés » ont une forte probabilité d'être enfouis trop profondément pour être détectés. En effet, avant la tempête Alex, l'hypothèse de travail était que le substratum étant affleurant en de nombreux secteurs, la probabilité d'enfouissement sur des profondeurs empêchant la détection (> 2 m) était très faible ; cette hypothèse était soutenue par des évolutions morphologiques dont l'amplitude verticale était compatible (de l'ordre du mètre). Ainsi pour la tempête Alex, l'hypothèse la plus probable pour expliquer les traceurs non retrouvés était un export en mer Méditerranée (plutôt qu'un phénomène de casse ou d'enfouissement) : c'est d'ailleurs une hypothèse de travail forte dans le projet StS-SEALEX (cf. sous-partie 3.1).

A notre connaissance, il n'y a pas d'éléments de connaissance concernant la profondeur du remplissage alluvial dans le talweg de la Roya dans la partie française. L'objectif de cet approfondissement serait d'évaluer la proportion de substratum affleurant à l'aval des secteurs où les traceurs RFID ont été déployés, et ensuite qualifier la probabilité que ces traceurs aient été incorporés dans le matériel alluvial sur une profondeur empêchant leur détection.

L'étude géologique détaillée de ce linéaire pourra peut-être répondre à cette question, et devra être menée sur l'ensemble du linéaire (France et Italie) pour y apporter une réponse spatialisée. A cet effet, les connaissances acquises en basse vallée dans le cadre du projet Concert-Eaux seront intéressantes à exploiter (en particulier : Lanini, 2020).

A cette analyse géologique, il faudra coupler une analyse géomorphologique. En effet le lit de la Roya a subi une métamorphose fluviale (Chapuis et al., 2022a ; Liébault et al., 2024), avec pour conséquence la rupture du pavage et la disparition de la morphologie en *step-pools*. Ceci s'est accompagné d'une forte production sédimentaire issue du remaniement des stocks de fond de vallée, et donc la reconstitution d'un matelas alluvial dans de nombreux secteurs auparavant pavés (cf. observations de terrain). Les nappes de charriage (au sens de la géomorphologie fluviale : *bedload sheet*) ont probablement été plus présentes (et actives) après l'épisode du 02/10/2020, ce qui est conforté par les observations visuelles et les mesures sismiques (cf. section 2.2.5) : ce phénomène de déstabilisation de la morphologie en *step-pool*, accompagné d'une forte production sédimentaire suite à une crue extrême, est d'ailleurs bien explicité dans Recking et al. (2013). Les auteurs suggèrent ensuite la possibilité que cette forte production sédimentaire se maintienne sur une longue période, avant que le lit ne se stabilise de nouveau,

mais sans préciser la dimension temporelle associée à cette résilience du système (durée du temps de relaxation : cf. Figure 42). En contexte de contrôle partiel par le substratum, Fryirs et Brierley (2013, fig.11.11) suggèrent par exemple des réajustements sur des temporalités de l'ordre de 10^3 - 10^4 ans, mais plus généralement la notion de relaxation du système fluvial/torrentiel, qui est ici clef, est difficilement calée dans le temps.

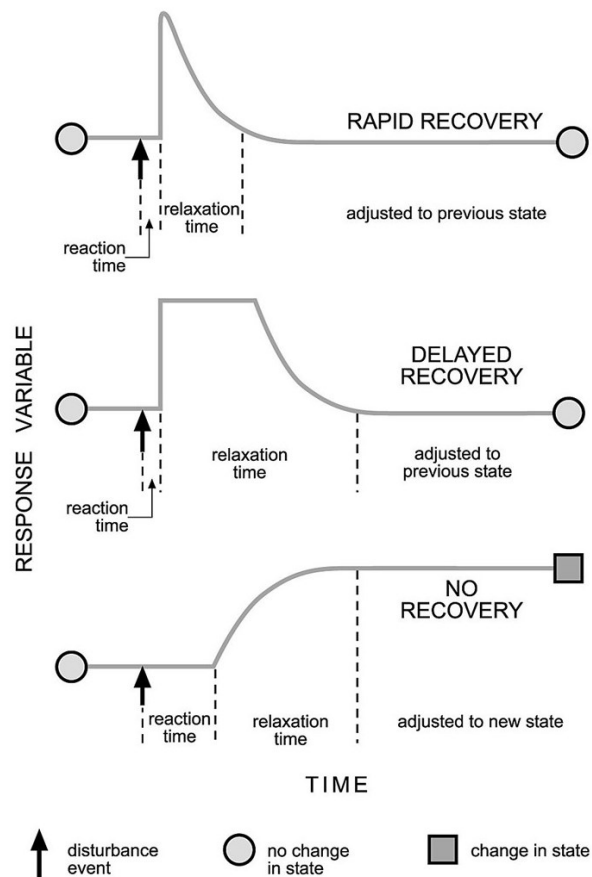


Figure 2.10 System responses to disturbance events. Depending on system sensitivity to adjustments, responses can be rapid and recovery quick, they can be delayed (or lagged) or they can induce a shift in state such that the system adapts to a new state.

Figure 42. Les différentes réponses possibles d'un système fluvial suite à une perturbation, en fonction de sa capacité d'ajustement.

Source : Fryirs et Brierley, 2013

Dans le lit de la Roya, les observations récentes indiquent une réorganisation des matériaux du lit et la reformation d'un chenal unique, plus fixe en plan, en de nombreux secteurs, ce qui pourrait suggérer un retour à une stabilité du chenal plus rapide. Ces réajustements morphologiques sont peut-être un effet des actions anthropiques réalisées dans le cadre des travaux post-crue : il est difficile de cerner si ce processus – s'il a effectivement lieu – est spontané ou d'origine anthropique. Cet ajustement possible du tracé en plan, depuis un chenal divagant post-Alex vers un lit à chenal unique en seuil-marches beaucoup plus « stable » d'un point de vue morphodynamique, et similaire à la morphologie observée pré-Alex, devra être investigué : cela souligne l'intérêt de poursuivre le suivi de cet hydrosystème après une crue de période de retour 1000 ans, puisque la Roya constitue un « laboratoire grandeur nature » pour étudier la résilience

morphologique d'un cours d'eau après un événement extrême (cf. section 2.2.6.2). A noter que cette éventuelle stabilisation du lit ne semble pour l'instant pas confirmée par les résultats de la sismique (cf. section 2.2.5).

Perspectives de poursuite du suivi RFID

Je prévois de poursuivre le suivi RFID actif jusqu'à ce que les transpondeurs n'émettent plus : le constructeur annonce une durée de vie de 5 ans environ en fonction de la fréquence d'émission. Or d'après cette durée de vie annoncée, les traceurs insérés en 2019 devraient être proches de leur fin de vie, ce qui n'est toujours pas le cas puisque nous en retrouvons encore lors de la campagne de 2024. Cela pourrait s'avérer limitant pour une prospection en Méditerranée lors de la campagne SEALEX-CSR (2025). Cependant les traceurs déployés en 2021 devraient encore fonctionner courant 2026 voire 2027, ce qui sera à peu près concomitant avec la fin du projet StS-SEALEX (2024-2027).

Au vu de l'effort de prospection demandé et des faibles ressources humaines dont je dispose à l'heure actuelle pour m'épauler au sein d'UniCA/ESPACE, la poursuite de cette opération de traçage sédimentaire, même par RFID active, ne sera peut-être pas renouvelée/poursuivie au-delà de cette date, à moins que des enjeux de gestion nouveaux et significatifs rendent ce nouveau suivi particulièrement pertinent.

Le traçage sédimentaire par RFID passive présente des limitations techniques importantes dans le contexte torrentiel, rocheux et latéralement contraint (gorges) de la Roya. Ces éléments empêchent résolument la poursuite d'un suivi annuel tel qu'il a été envisagé/mené jusqu'à présent. Cependant l'effort d'investissement initial peut malgré cela continuer à porter ses fruits, dans la mesure où la durée de vie annoncée des transpondeurs passifs est de 50 ans : malgré un premier essai en septembre 2019 qui s'est vite révélé infructueux, l'installation d'une antenne fixe pourrait toujours être d'actualité pour contribuer à « fermer le système » et ainsi contribuer à l'évaluation des flux sédimentaires sur le long terme, à l'échelle du bassin versant. Notons pour mémoire que l'antenne fixe installée le 05/09/2019 a été opérationnelle (y compris avec télétransmission des données) entre le 29/09/2019 et le 20/10/2019, mais qu'elle a été arrachée pendant la première « petite crue » de l'automne (Q_{\max} à Breil = 140 m³/s le 15/10/2019) (Chapuis et al., 2019a). Cette expérience malheureuse n'est pas la seule en contexte torrentiel ; malgré cela, il serait intéressant de réussir une telle installation, par exemple en insérant l'antenne dans l'infrastructure d'un seuil existant, comme cela avait été évoqué lors de discussions informelles avec la cellule R&D d'EDF.

2.2.6.2 Au sujet de la gestion des flux sédimentaires en Roya

Temps de relaxation, résilience et trajectoire du système

Comme évoqué en fin de section 2.2.4, la question de la résilience du système post-crue constitue une question de recherche à part entière : la communauté n'a que peu d'exemples sur lesquels s'appuyer pour évaluer si un système transitoire va s'établir, ou si la métamorphose fluviale observée relève d'un nouvel état d'équilibre du système (Surian et al., 2016 ; Scorpio et Comiti, 2024 ; Liébault et al., 2024). A cette notion de résilience post-perturbation (Fryirs et Brierley, 2013 : cf. Figure 42) s'ajoute donc la question, déjà sous-jacente au début de l'étude du transport sédimentaire en Roya, de la trajectoire du système (cf. Dufour et Piégay, 2009 : cf. Figure 43) et du « calage temporel » de cette résilience (si elle a lieu). Nous raisonnons ici de manière similaire selon si la perturbation est d'origine « naturelle » (par exemple un événement extrême dans le cas de la Roya), ou d'origine humaine (une restauration).

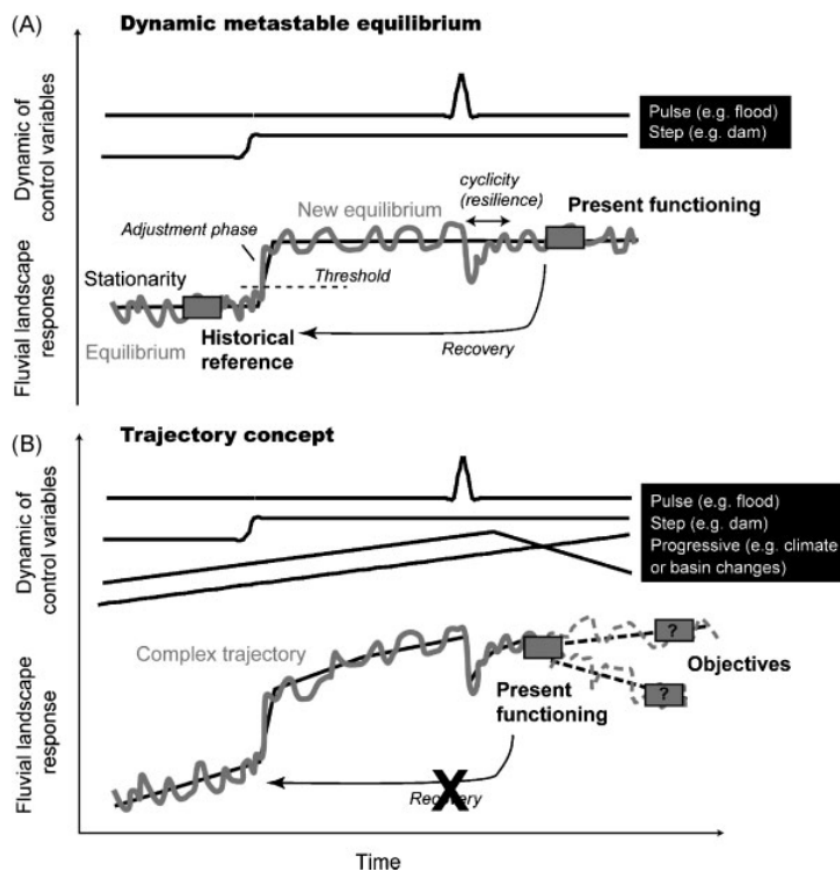


Figure 3. Fluvial landscape evolution results from the combination of numerous control variables ; thus it follows a complex trajectory that justifies moving from a reference-based strategy to an objective-based strategy in restoration schemes

Figure 43. Trajectoires d'un hydrosystème dans le cas d'une restauration, et notion d'état de référence qui doit être défini à partir d'objectifs plutôt qu'à partir d'une référence historique.

Source : Dufour et Piégay, 2009

L'étude des photographies anciennes de la Roya à la suite des crues historiques recensées sur les bassins versants de la Roya et de la Vésubie (ONF-RTM et al., 2023a, ONF-RTM et al., 2023b) suggère que ces systèmes possèdent une forte capacité d'ajustement (de résilience). On peut donc s'attendre à ce que le système retourne à un état proche de l'état initial (*rapid or delayed recovery*), ce qui irait dans le sens des observations de terrain qui suggèrent une stabilisation en plan du lit (cf. section 2.2.4). Mais les données de la sismique (cf. section 2.2.5) mettent en évidence une mobilité sédimentaire forte après chaque crue, même peu intense : le maintien d'une mobilité sédimentaire est un préalable indispensable au maintien de la mobilité des formes fluviales, ce qui pourrait également suggérer que l'on est loin d'un retour à un état ante-crue.

Seule la poursuite du suivi des évolutions morphologiques de la Roya pourra donc nous donner des éléments concernant d'une part sa résilience post-crue (et notamment s'il existe une relaxation, et si oui combien de temps elle dure), et d'autre part sa trajectoire après un événement d'une telle intensité, dans une perspective « long terme ». A moyen terme, un deuxième axe d'étude de la résilience du système concerne la capacité du cours d'eau à retrouver un fonctionnement post-travaux. En effet depuis le 02/10/2020, le chenal a subi de lourdes interventions qui se poursuivent encore à l'heure actuelle, bien que sur des linéaires beaucoup moins importants : le système va peut-être bientôt/enfin pouvoir être considéré comme étant

libre de s'ajuster d'un point de vue morphologique. Notons néanmoins qu'à part l'épisode de la « tempête Aline » d'octobre 2023, les forçages hydrologiques ont été très réduits depuis le 02/10/2020 : cela rappelle à quel point il est indispensable d'intégrer l'hydrologie pour analyser la résilience des hydrosystèmes sous influence alpine ou méditerranéenne (exemple : le Mareta, cf. Devreux et al., 2022b et Devreux, 2003).

Enjeux de la reconstruction

D'un point de vue écologique (puisque'il me semble essentiel de ne pas dissocier les approches géomorphologique et écologique, cf. sous-partie 1.1), les travaux en cours d'eau réalisés depuis l'épisode Alex ont conduit à une turbidité importante dans le chenal, alors qu'avant Alex la Roya était caractérisée par des écoulements très clairs sauf en crue. Cette turbidité « chronique » pendant plus de 2 ans a nécessairement eu un impact sur la faune (Kemp et al., 2011). L'impact de la crue sur les populations piscicoles en Roya a déjà fait l'objet d'une première étude (Blanchet, 2022 ; cf. section 2.1.4.2) et indique que la dynamique de repeuplement observée a pour origine la capacité des truites à s'abriter dans les zones refuge constituées par les affluents (et notamment les affluents rive gauche, peu/moins impactés pendant l'épisode Alex). Cela suppose une mobilité « inter-habitats » à plus large échelle que ce qui est observé pour les macroinvertébrés (Devreux, 2003).

La turbidité évoquée est liée aux matières en suspension remobilisées par les engins de chantier. Mais plus généralement, les observations de terrain suggèrent que l'épisode Alex a rechargé le système en sédiments fins et sables, ce qui a été observé dans d'autres systèmes post-crue (exemples : Turowski et al., 2009 ; Yager et al., 2012 ; Masteller et al., 2019, *in* Brenna et Surian, 2023). La part de ces sédiments fins par rapport à la charge grossière dans le flux sédimentaire total pourrait ne plus être négligeable, contrairement à l'hypothèse de travail qui avait guidé notre étude à ses débuts. Or l'évaluation des flux de matières en suspension, et plus encore des flux de sables, constitue un défi technique à part entière (Deng et al., 2024). Cependant, au vu des enjeux de gestion à l'aval concernant l'alimentation en eau potable à partir de la nappe de la Roya (cf. section 2.1.4.2 et Geneviev et Ibba, 2020 : colmatage des puits de pompage depuis la crue de 2020), un tel effort d'instrumentation pourrait devenir nécessaire.

Du point de vue de la gestion du risque inondation, sans proposer ici une analyse exhaustive de la situation en Roya, nous résumons ci-après les points essentiels à l'heure de la rédaction de ce manuscrit. Dans la lignée de l'approche de la GEMAPI (GEstion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations²¹) qui prévoit de concilier espace de bon fonctionnement et espace de liberté du cours d'eau, les préconisations de l'Etat en matière de reconstruction (ONF-RTM et al., 2023a : cf. partie 7.2 « Principes d'aménagement adaptés au contexte torrentiel ») prévoyaient, « surtout », de ménager des sections d'écoulement suffisantes sur tout le linéaire français de la Roya : d'une part pour assurer les écoulements liquides en crue, mais aussi accommoder les évolutions morphologiques futures. Accepter de maintenir un espace de divagation pour le cours d'eau, dans ces fonds de vallée où la pression foncière est forte, passe nécessairement par une phase de concertation avec le territoire, particulièrement critique dans les traversées urbaines. Après 3 ans de reconstruction en Vésubie et Roya, un bilan intermédiaire pourrait pointer que le respect des recommandations techniques pour la reconstruction en contexte torrentiel n'a rien d'évident pour de nombreux acteurs du territoire.

²¹ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/gestion-milieux-aquatiques-prevention-inondations-gemapi> [consulté le 06/08/2024]

La réflexion déjà engagée avant Alex concernant un plan de gestion des sédiments à l'échelle du bassin versant (cf. projets européens Concert-Eaux et Concert-Eaux OPERA) revêt encore plus de pertinence post-Alex. Si les enjeux sur la partie italienne ont poussé les gestionnaires à proposer rapidement un cadre pour ce plan de gestion des sédiments (Regione Liguria, 2021), une démarche systémique à l'échelle du bassin versant demande un peu plus de temps pour être construite et surtout pour espérer une harmonisation transfrontalière. J'ai dès décembre 2020 (Chapuis, 2020) pointé l'intérêt de développer un tel plan de gestion des sédiments à l'échelle du bassin versant ; cependant un tel projet doit être porté par les autorités gemapiennes ou équivalentes : les chercheurs peuvent seulement venir en appui dans une telle démarche, pour apporter des éléments de connaissance utiles au territoire.

C'est un des principaux objets de ma démarche de recherche en Roya, qui avait déjà été amorcée dès 2016 avec l'idée de caractériser et quantifier les flux sédimentaires en Roya. Le développement d'un modèle conceptuel du fonctionnement hydro-sédimentaire à l'échelle du bassin versant, ébauché dès 2020 (Chapuis et al., 2022a), a ensuite pu bénéficier d'une profondeur temporelle plus importante par l'intégration d'un événement d'une telle intensité (cf. section 2.1.5.2). Une purge sédimentaire du système reste très probablement le schéma à retenir pour la Roya, sans que l'occurrence d'une crue de période de retour 1000 ans vienne permettre une recharge du système suffisante pour envisager une valorisation de la fraction grossière des sédiments issus de l'amont.

Evolution des flux sédimentaires en Roya en contexte de changement climatique

L'épisode Alex du 02/10/2020 vient ajouter une complexité supplémentaire pour évaluer le devenir des flux sédimentaires en Roya en contexte de changement climatique, puisque le rythme de résilience du système et sa trajectoire sont questionnées. Nous n'aborderons pas ici dans quelle mesure est-ce qu'un événement d'une telle intensité pourrait relever du changement climatique (cf. science de l'attribution²²) ; retenons seulement que de tels événements extrêmes deviendront plus intenses et fréquents (cf. Boucher et al., 2015 ; GREC-PACA, 2017 ; Jia et al., 2019 et section 3.1.1).

Nous proposons ici d'intégrer les résultats des modélisations climatiques réalisées spécifiquement sur le bassin versant de la Roya (Martin, 2020) pour évaluer certains aspects de l'évolution des flux sédimentaires en Roya.

Quel que soit le modèle climatique utilisé, il est anticipé que les températures sur l'ensemble du bassin versant seront à la hausse. En ce qui concerne les précipitations, le signal est cependant plus complexe à interpréter, avec des évolutions en termes de précipitations mensuelles variables en fonction du modèle. Cependant l'évolution des précipitations mensuelles sur le bassin versant ne dit rien de l'occurrence d'événements extrêmes. Nous retenons donc les deux hypothèses de travail suivantes pour l'horizon 2100 :

- Une augmentation des températures quel que soit le mois considéré
- Des événements de précipitations extrêmes plus fréquents et plus intenses, i.e. des précipitations moins bien réparties dans le temps et dans l'espace à l'échelle du bassin versant.

²² <https://www.worldweatherattribution.org/> [consulté le 06/08/2024]

En première approche, l'augmentation des températures toute l'année a deux conséquences majeures :

- Sur la végétation, en raison d'une évapotranspiration plus intense, les conditions de stress hydrique seront plus fréquentes, avec pour conséquence des conditions de développement de la végétation plus contraignantes. Il pourrait s'ensuivre une couverture végétale des sols moins protectrice et donc, potentiellement, une fourniture sédimentaire issue des versants plus importante ; cependant il faut affiner ce point avec la notion de migration des espèces représentatives, cf. section 2.1.5 et Figure 17)
- Le stock de neige en hiver risque d'être fortement affecté, modifiant en conséquence une large partie du cycle de l'eau sur le bassin versant :
 - Durée restreinte de la recharge des stocks souterrains, avec conséquence probable sur les conditions d'alimentation en eau potable depuis la nappe située dans la basse vallée
 - Risque d'événement de « pluie sur neige » entraînant des crues de fonte tout au long de la période hivernale, et plus seulement au printemps. Ces crues de fonte seraient donc plus fréquentes et plus intenses, amenant une sollicitation des berges à chaque fois, et donc une augmentation de la fourniture sédimentaire issue des terrasses alluviales.

Également en première approche, des précipitations moins bien réparties dans le temps et dans l'espace à l'échelle du bassin versant pourraient avoir deux conséquences :

- Sur la tenue des sols : en cas de précipitations intenses sous forme de pluie, le ravinement pourrait être exacerbé. Ceci pourrait avoir pour conséquence une augmentation des flux sédimentaires (notamment fins) au réseau hydrographique
- Des précipitations plus intenses conduiraient à l'augmentation du nombre de crues par dépassement de la capacité d'infiltration ; de même que les points précédents, cela pourrait conduire à plus de ravinement, et plus de fourniture sédimentaire depuis les terrasses alluviales.

Cependant ces réactivations ponctuelles de la production sédimentaire pourraient être localisées dans le temps et dans l'espace : une spatialisation de ces éléments est donc nécessaire, ce qui est prévu pour les prochaines années (cf. sections 2.1.5, 2.3.4 et 3.1.2.4).

Plus généralement, les conséquences du dérèglement climatique sur le cycle hydrologique en Roya doivent être approfondies pour en tirer les éléments prospectifs concernant les flux sédimentaires à l'échelle du bassin versant.

2.2.6.3 Perspectives de suivi des flux sédimentaires en Roya

En termes de perspectives de suivi, et pour synthétiser les éléments mentionnés dans les sections 2.2.2.3, 2.2.3, 2.2.4 et 2.2.5, je reprends ci-après les éléments-clefs qui dessinent mon investissement en termes d'instrumentation et de monitoring de terrain en Roya au-delà de l'horizon 2027. Il est à noter qu'en parallèle des pistes évoquées ci-après, j'envisage à l'heure actuelle de développer une instrumentation en Vésubie (cf. projet StS-SEALEX, sous-partie 3.1).

Concernant le suivi par RFID passif, la durée de vie des traceurs (50 ans) laisse le temps d'envisager des adaptations au suivi actuel (cf. section 2.2.6.1). En particulier l'installation d'une antenne fixe pourrait éviter l'aspect chronophage des prospections dans le lit.

Comme mentionné également, il n'est pas certain que je renouvelle l'opération de traçage sédimentaire par RFID active au-delà du projet StS-SEALEX (2024-2027). En effet, malgré des limitations techniques bien moindres que pour la RFID passive, la prospection en Roya relève d'une progression en terrain difficile et suppose des opérateurs qualifiés et en très bonne condition physique. En l'absence de nouvel enjeu de gestion ou de question de recherche fondamentale qui nécessiterait de s'appuyer sur la campagne de suivi initiée en 2019, l'engagement qu'a supposé le suivi 2019-2027 me semblera suffisant pour contribuer, à mon échelle, à une meilleure compréhension de la dynamique de la charge grossière en contexte torrentiel.

Concernant la sismique passive, et comme mentionné en section 2.2.2.3, je viens tout juste d'installer un 2^e géophone sur le bassin versant de la Roya et compte installer la télétransmission des données très rapidement pour les 2 instruments. Je pense donc recentrer mes efforts d'instrumentation long terme en Roya autour de cette thématique, d'autant que l'acquisition en continu permet de compléter le suivi annuel/événementiel issu des opérations de traçage sédimentaire par RFID active et passive en donnant une profondeur d'analyse intéressante en ce qui concerne la variabilité inter-annuelle des flux hydrosédimentaires. En effet, avec le déploiement récent par le SMIAGE de nouvelles stations de mesure hydrologique sur l'ensemble du bassin versant, l'analyse croisée de données hydrologiques et sismiques promet beaucoup. On peut lister les pistes suivantes, qui donneront lieu au renforcement de collaborations amorcées :

- Cinétique des transferts hydrosédimentaires à l'échelle intra-événementielle à l'échelle du bassin versant via l'analyse croisée des signaux des deux géophones
- Cinétique des flux hydrosédimentaires à l'échelle maralpine (comparaisons inter-bassins versants via l'analyse croisée des stations sismiques « classiques » de Géoazur, collaboration Géoazur/Géosciences Rennes)
- Contribution au développement métrologique via la calibration d'une instrumentation *low-cost* (collaboration OMEAA/EVS).

2.3 Gestion et restauration des corridors fluviaux en contexte alpin et méditerranéen : un couplage entre géomorphologie et écologie

Dans cette dernière sous-partie présentant mes réalisations, je présente les axes de recherche qui ont plus spécifiquement porté sur la gestion et la restauration des cours d'eau, en soulignant l'intérêt d'un couplage entre géomorphologie et écologie, que cette dernière porte sur le volet « biodiversité animale » ou « biodiversité végétale ». J'appuie ma présentation sur un premier cas d'étude sur la restauration morpho-écologique des cours d'eau en tresses, issu du travail de doctorat soutenu en 2023 par Lise Devreux qui liait indicateurs morphométriques et macro-invertébrés aquatiques. Le deuxième cas d'étude porte sur les dynamiques paysagères dans les cours d'eau maralpains à l'échelle 150-200 ans.

2.3.1 Cadre théorique

Pour mémoire, le positionnement théorique de cet axe de recherche est précisé dans la sous-partie 1.2. Il s'agit en particulier de souligner les apports des approches croisées, pour atteindre la transdisciplinarité. Cette démarche, bien que chronophage, est reconnue comme nécessaire pour tendre vers une gestion systémique et durable des espaces fluviaux (Corenblit et al., 2007).

2.3.2 Cadre géographique

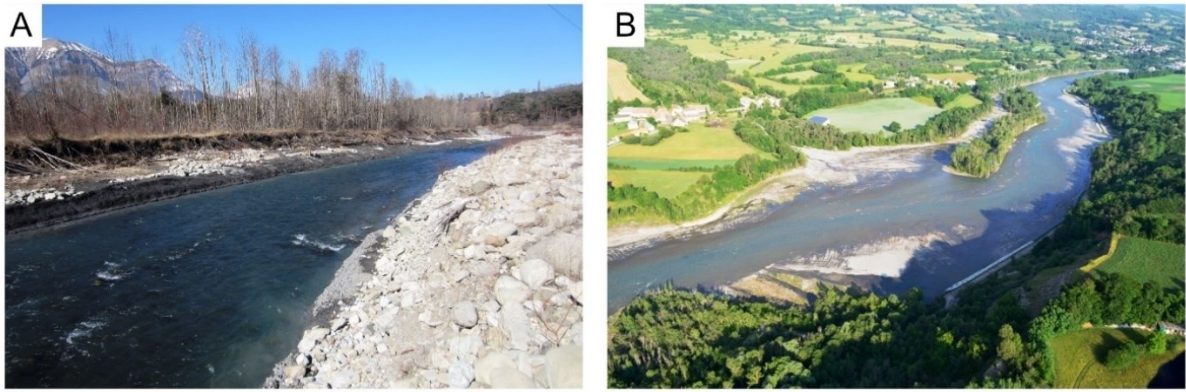
Le cadre géographique général dans lequel se situe ce travail est précisé dans la sous-partie 1.4, notamment en ce qui concerne les caractéristiques hydrologiques (forte variabilité infra- et inter-annuelle des débits) et morphologiques (charge grossière, morphodynamique active) des cours d'eau.

Pour mémoire, nous avons pour cette section plus précisément travaillé sur les cours d'eau du Drac et de la Roya (cf. Figure 6). Le Drac est influencé par un régime alpin du fait de sa position septentrionale. Le bassin versant de la Roya présente une influence alpine dans sa partie amont et est sous influence méditerranéenne depuis l'aval.

2.3.3 Cas d'étude sur le Drac : restauration morpho-écologique des cours d'eau en tresses : de la nécessité de prendre en compte l'hétérogénéité géomorphologique

2.3.3.1 Objectifs et compartiments d'étude

Ce travail se concentre sur l'étude des macro-invertébrés benthiques en lien avec l'hétérogénéité géomorphologique à l'échelle d'un tronçon, dans le cadre de la restauration d'un cours d'eau en tresses (le Drac) par recharge sédimentaire qui a eu lieu en 2013-2014 au niveau de St Bonnet-en-Champsaur (cf. Figure 44). L'objectif de cette étude était plus précisément de quantifier le degré de succès d'une telle opération de restauration morpho-écologique, et à cet effet, une approche couplée entre outils d'évaluation géomorphologiques et écologiques était indispensable. Ce travail, réalisé dans le cadre du doctorat de L. Devreux (Devreux, 2023) est approfondi dans la publication Devreux et al., *submit*.



© CLEDA

Figure 44. Photographies du tronçon restauré du Drac à St Bonnet-en-Champsaur (a) avant restauration en 2012 et (b) après restauration en 2014. Devreux et al., submit.

2.3.3.2 Méthodologie

Le tronçon restauré est localisé au droit de St Bonnet-en-Champsaur (Hautes-Alpes), tandis que le tronçon « cible » pris comme référence est localisé 2 km en amont, au niveau du village de Chabottes (cf. Figure 45).

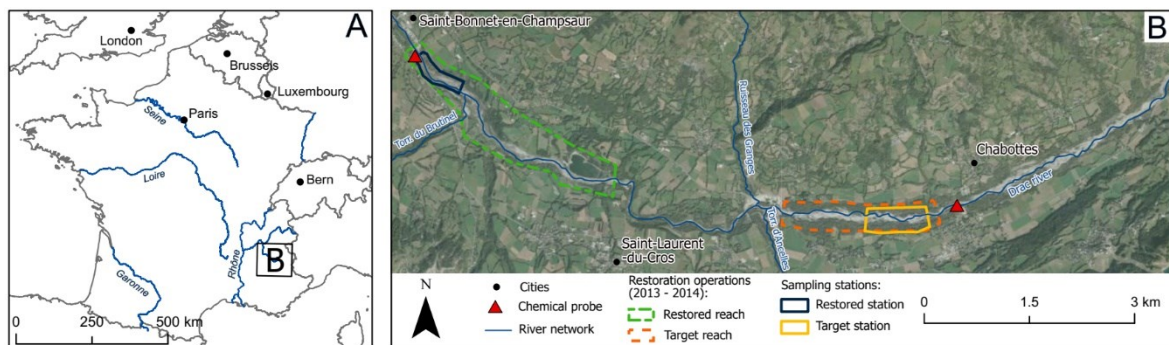


Figure 45. Localisation du site d'étude. (A) Le bassin versant du Drac. (B) Le tronçon restauré (rectangle bleu) et le tronçon cible (rectangle jaune) au sein des deux tronçons homogènes d'un point de vue géomorphologique (rectangles vert et orange ; St Bonnet-en-Champsaur est situé à 44.6 N - 6.0 W dans le système de coordonnées WGS 84). Ces tronçons homogènes ont été étudiés dans Devreux et al., 2022b.

Source: Devreux et al., submit. Extractions depuis la BD CARTHAGE®

Des échantillonnages de macro-invertébrés benthiques ont été réalisés selon une méthodologie dérivée des protocoles standard en France (I₂M₂, norme XP T90-333, AFNOR, 2016) et adaptée ici aux rivières en tresses en raison de l'hétérogénéité géomorphologique particulièrement importante dans ce type de cours d'eau (cf. Figure 46 ; Devreux et al., 2023). La caractérisation de cette hétérogénéité des formes fluviales au sein de la bande active s'est appuyée sur la mise en place d'une cartographie par unité géomorphologique (Geomorphic Units Survey ou GUS, Belletti et al., 2017). Dans un contexte de restauration de cours d'eau, l'approche BACI (Before/After – Control/Impact) définie sur le Drac (Brousse et al., 2021 ; Marteau et al., 2022) permet d'adopter une approche « *space for time* » (Avant/Après) en considérant un tronçon cible (Control) par rapport à un tronçon restauré (Impact) (cf. Figure 47).

A noter que cette approche « *space for time* » peut être questionnée sur un système aussi dynamique que le Drac (Kappes et al., 2010). Cependant, elle est ici couplée à un système de réponse organisé spatialement et donc fonctionnellement (cf. « *riverine ecosystem synthesis* », Thorp et al., 2006 ; « *hierarchical-response framework* », Smith et al., 2009 ; ou encore Dufour et Piégay, 2009).

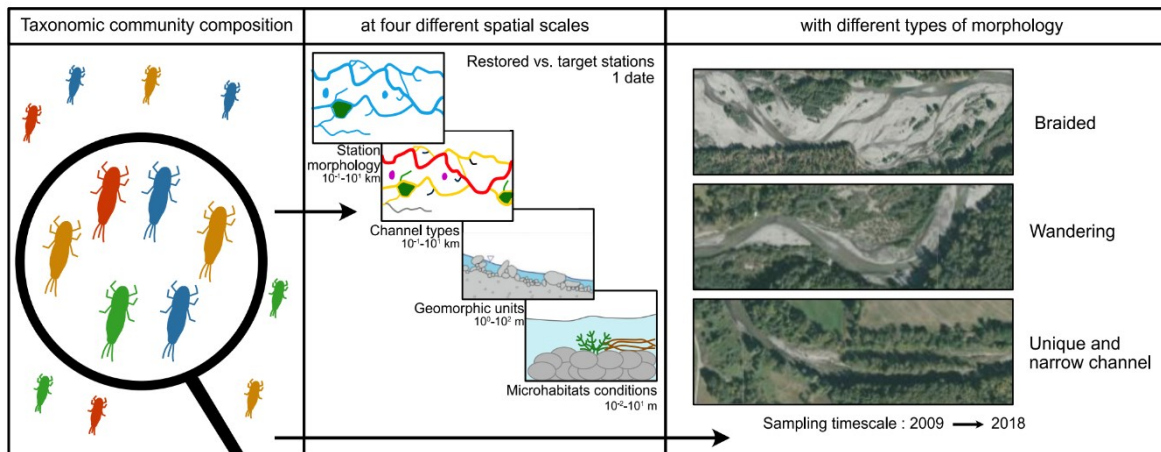


Figure 46. Résumé graphique de la méthodologie employée. Le détail est précisé dans Devreux et al., submit.

Source: Devreux et al., unpublished

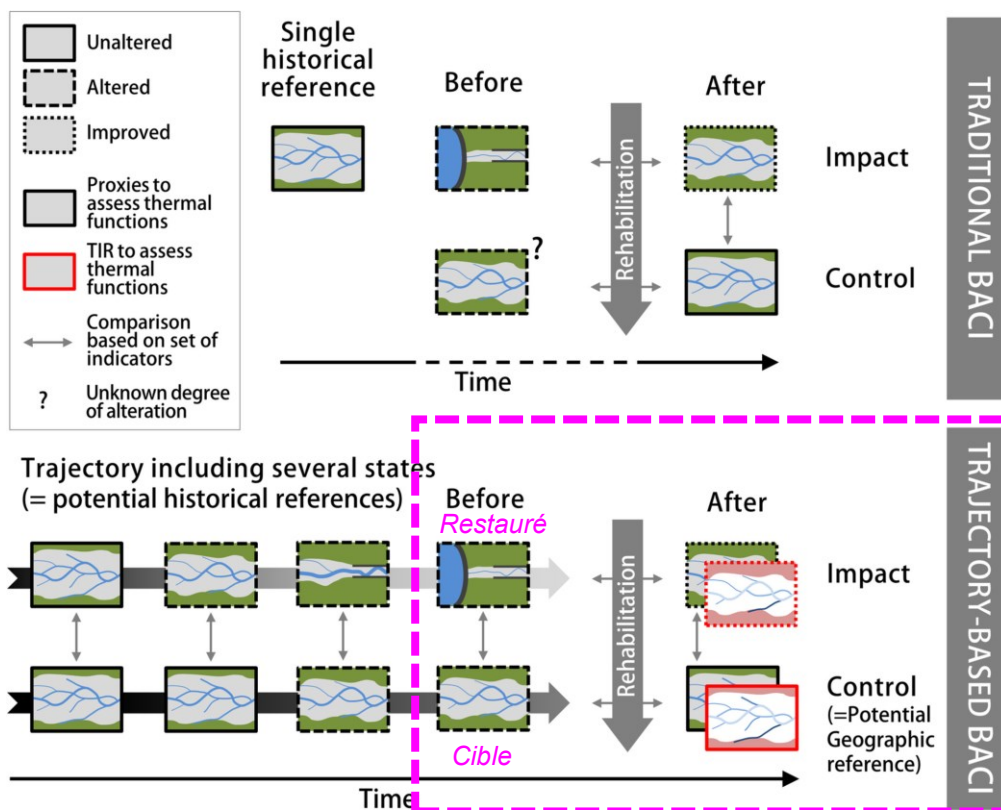


Figure 47. Démarche BACI (Before/After-Control/Impact) adoptée dans l'étude (rectangle rose).

Adapté depuis Marteau et al., 2022 et Devreux, 2023

2.3.3.3 Résultats

La cartographie par GUS (cf. Figure 48) permet de visualiser rapidement l'hétérogénéité spatiale des formes fluviales à l'échelle de la station (du tronçon), bien que les types de GUS rencontrés soient similaires sur les tronçons cible et restauré.

Malgré une plus grande diversité de macrohabitats (types de chenaux), le tronçon restauré présente un nombre réduit de chenaux alimentés par la nappe ainsi que des chenaux secondaires plus larges et moins profonds, ce qui explique en particulier une température plus homogène sur ces secteurs (unique variable environnementale discriminante, avec la vitesse d'écoulement, qui présente une gamme significativement différente entre les 2 tronçons cible et restauré).

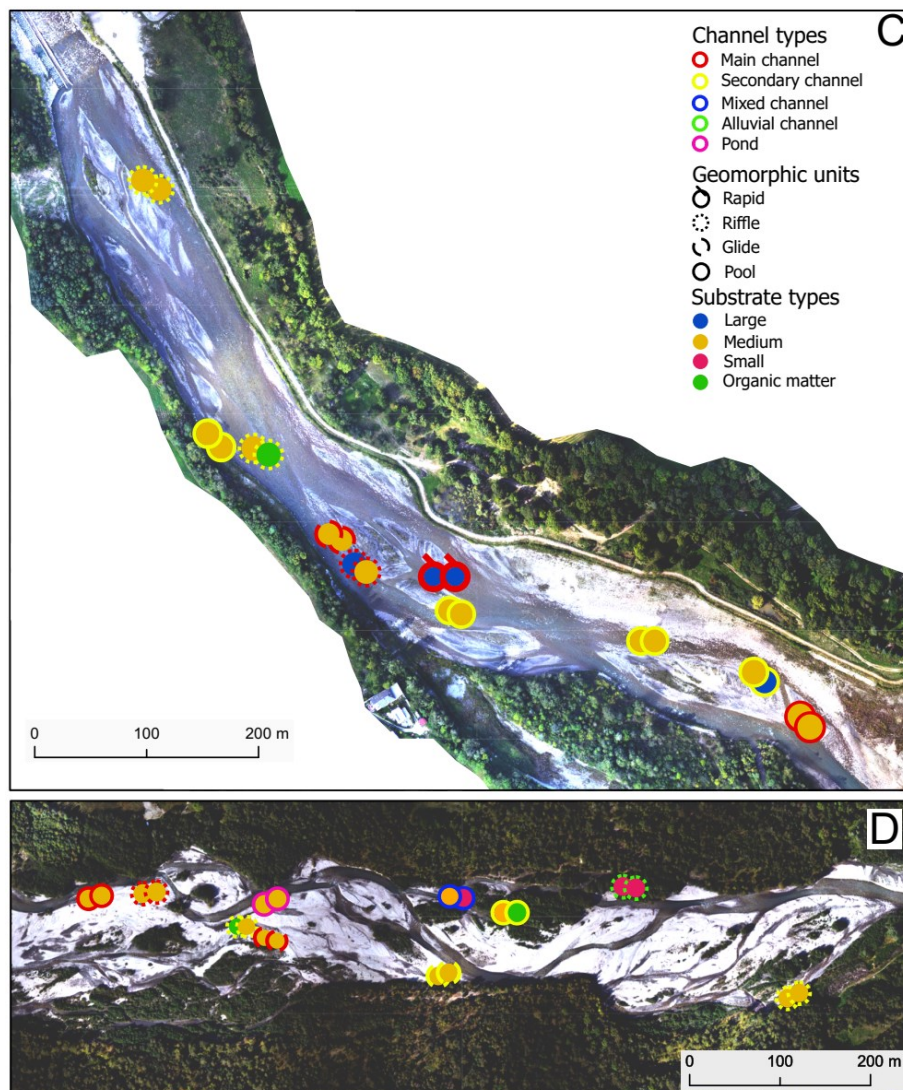


Figure 48. Localisation et caractérisation des habitats pour chaque échantillon sur le tronçon restauré (C) et le tronçon cible (D).

L'échantillon peut ne pas être localisé dans un chenal en eau en raison des différences de débit et de morphologie entre la prise de vue (IGN, 2018) et la campagne d'échantillonnage (2019). Chaque point correspond à une combinaison de macro- et méso-habitat et 2 échantillons ont été prélevés selon différents micro-habitats (ici seulement le type de substrat est indiqué) présents au sein du méso-habitat.

Source : Devreux et al., *submit*.

Orthophotographies : Département des Hautes-Alpes et IGN (2018).

La plus faible diversité des communautés sur le tronçon restauré (cf. Figure 49) vient compléter les éléments physiques précédents : elle indique que la fonctionnalité de la tresse n'était pas encore pleinement restaurée lors de cette campagne de 2019, i.e. 5 ans après restauration (en termes de processus plutôt que de formes fluviales) : l'objectif visé était bien une restauration morpho-écologique, qui est donc atteint de manière très partielle en ce qui concerne le volet biodiversité.

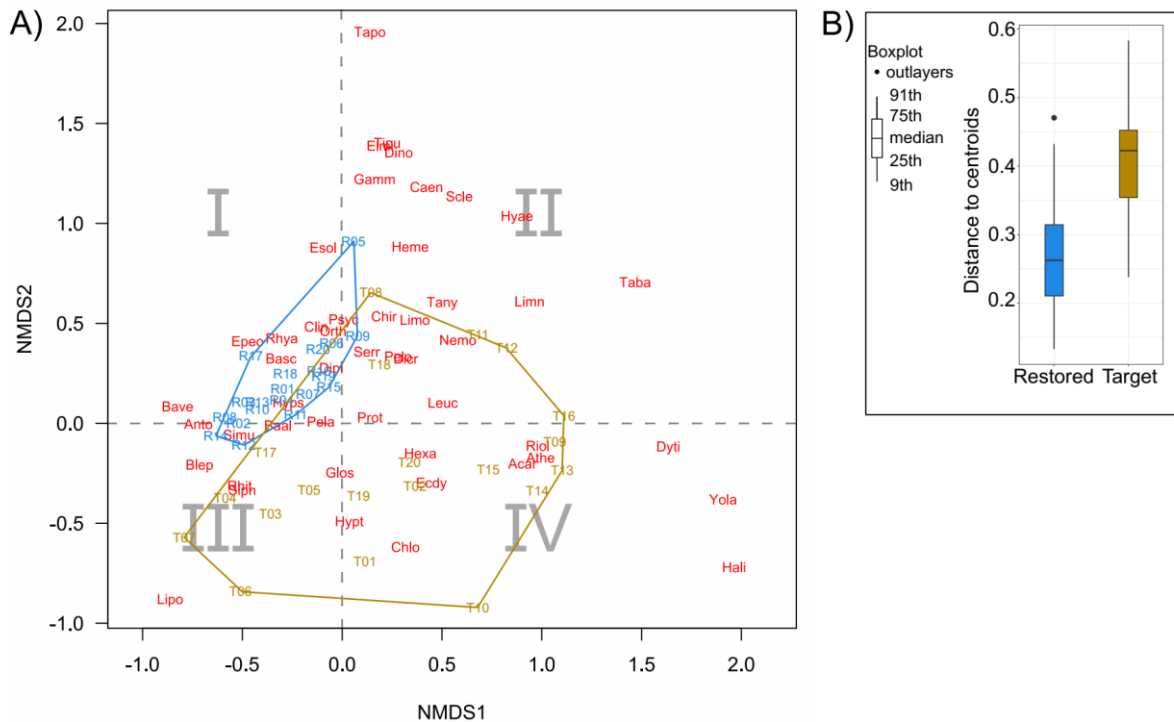


Figure 49. Résultat des analyses statistiques (nMDS) de la composition des communautés d'invertébrés en fonction des caractéristiques des habitats, entre le tronçon restauré (en bleu) et le tronçon cible (en brun). On note une plus faible variabilité des communautés sur le tronçon restauré que sur le tronçon cible.

(A) Non-metric Multidimensional Scaling (nMDS) ordination based on the Bray-Curtis distances for all taxa. The delimited quadrants correspond to specific habitat conditions: quadrant I= fast and connected channels; quadrant II= slow and mainly connected channels; quadrant III= fast and main channels with coarse sediments; quadrant IV= slow and stagnant water bodies. Abbreviations for the taxa names are given in Table A.4 in the Supplementary Materials. Code for samples of the restored station (blue) start with R and code for samples of the target station (brown) start with T. nMDS1= first nMDS dimension, nMDS2= second nMDS dimension.

(B) Difference in beta diversity for the restored (blue) and target (brown) stations.

Source: Devreux et al., *submit*.

Ces divers éléments confirment l'importance de définir un habitat à différentes échelles : macro-méso et micro-échelle dans ces systèmes en tresse, et met en avant la nécessité de prendre en compte cette mosaïque d'habitats (échelle des macroformes jusqu'à celle des microformes) dans les protocoles d'échantillonnage des communautés d'invertébrés aquatiques.

Par ailleurs, la variabilité inter-annuelle de la composition des communautés d'invertébrés semble jouer un rôle déterminant par rapport à la diversité des habitats, ce qui soulignerait l'importance de l'hydrologie ou de la qualité des eaux en tant que facteurs de contrôle. Il est prévu d'explorer ces hypothèses au cours des prochaines années (poursuite de la collaboration avec

B. Belletti sur ces questions d'évaluation des opérations de restauration des cours d'eau en tresse).

2.3.4 Cas d'étude sur les cours d'eau maralpins : dynamiques paysagères à l'échelle des 150-200 dernières années

Cette section est basée sur un travail en cours depuis 2021, et qui devrait se poursuivre jusqu'en 2027.

2.3.4.1 Objectifs et compartiments d'étude

Les cours d'eau maralpins présentent des caractéristiques physiques similaires dans leur parties amont (fortes pentes, végétation méditerranéenne peu couvrante, caractéristiques litho-structurales) qui génèrent une disponibilité sédimentaire importante sur les versants. Les contraintes météo-climatiques agressives (notamment lors des épisodes orageux méditerranéens) peuvent, sur les versants pentus, générer des ruissellements intenses qui peuvent conduire au transport de ce matériel sédimentaire, accumulé sur les versants, jusqu'au chenal principal. C'est notamment ce qui s'est passé lors de la tempête Alex du 02 oct. 2020 en Vésubie et en Roya (Liébault *et al.*, 2024). Historiquement (à l'échelle des 200 dernières années), le ruissellement intense sur les versants était atténué de deux manières, suivant le type d'occupation des terrains :

- soit par la présence de murets de pierres sèches permettant la culture en terrasse (planches ou restanques). Par leur présence, ils « cassent la dynamique de l'écoulement » et contribuent à stabiliser les versants ; ces murets demandent un entretien très régulier, et sont donc moins efficaces en cas de déprise rurale (Martin, 2006) ;
- soit par de vastes opérations de reboisement organisées sous l'égide de l'Etat par les services de Restauration des Terrains en Montagne de l'ONF : sur les parcelles intensément ravinées du fait de leur surexploitation (pâturage et/ou déboisement), les plantations de pin noir d'Autriche, même en offrant une couverture végétale et des épaisseurs de sol limitées, contribuent à ralentir le phénomène de ruissellement sur les versants, et ce faisant, à limiter le transport sédimentaire associé : les versants pentés, devenus plus stables, contribuent à réduire le transport sédimentaire dans le chenal principal (Lavabre *et al.*, 2000). Les reboisements ont lieu essentiellement sur des parcelles acquises par l'Etat, et donc devenues domaniales. On note quelques rares exemples de tels reboisements sur des parcelles communales, mais pas sur des parcelles privées.

Ces éléments, à l'échelle des Alpes françaises et italiennes, sont bien documentés dans les Alpes du Nord, tant du point de vue des processus physiques que des temporalités associées (Peiry, 1988 ; Peiry *et al.*, 1994 ; Liébault, 2003). Mais, en ce qui concerne les secteurs maralpins, la chronologie associée à la déprise rurale et aux reboisements est moins nette. En l'absence de connaissances établies localement, la généralisation des connaissances établies sur un autre périmètre (les Alpes du Nord) pose ici un problème scientifique aigu, qui a déjà montré ses limites lors de Retour d'Expérience commandé par la DDTM 06 (RETEX Alex : ONF-RTM *et al.*, 2023a).

Les interactions entre occupation humaine et flux sédimentaires sur le périmètre maralpin doivent ainsi impérativement être interprétées localement, en raison d'une part de l'histoire particulière de la région (influence des événements politiques de l'Histoire sur l'occupation du sol : flux migratoires et déprise agricole), et d'autre part des effets de l'influence méditerranéenne sur le climat de ces vallées maralpines (calage temporel de la fin du Petit Âge Glaciaire qui est

caractéristique d'un climat plus agressif, influence sur la végétation (type, densité...) et la fourniture sédimentaire des versants).

Nous nous proposons d'approfondir la notion de connectivité versant-chenal en lien avec l'évolution de l'occupation du sol : l'hypothèse de travail est que la déprise agricole a contribué à limiter la fourniture sédimentaire des versants, et donc l'alimentation du cours d'eau en sédiments. Il est attendu que les sources sédimentaires ont été plus ou moins actives en fonction des conditions climatiques (Petit Âge Glaciaire, changement climatique), mais surtout en fonction des modifications de l'usage des sols et du degré de protection fourni par le couvert végétal correspondant (cf. Boillat et al., 2004). Cette double approche « processus-histoire de l'occupation du sol » s'inscrit résolument dans le périmètre de la géomorphologie fluviale. Par ailleurs, ce travail permettra de recontextualiser un événement de type « Alex » dans un cadre temporel plus large, et d'éclairer les préconisations de gestion de la charge sédimentaire à moyen et long termes dans un contexte de changement climatique.

2.3.4.2 Méthodologie

Nous travaillons principalement sur 2 cours d'eau maralpins : la Roya et la Vésubie, mais prévoyons d'extrapoler certains résultats à d'autres bassins versants (notamment Tinée, Haut-Var, Nervia en Ligurie). L'implantation régionale des sites est un atout majeur de l'étude, au vu de l'approche « terrain » qui viendra compléter les premiers éléments de connaissance déjà dégagés (cf. ci-après). Ce projet vient renforcer les collaborations déjà en place avec les acteurs du territoire (EDF, ONF-RTM 06, Regione Liguria). Nous nous appuyons sur la présence d'équipements déjà en place en Roya, issus de projets menés depuis 2016 qui contribuent directement à nourrir le projet (projets Interreg-Alcoitra CONCERT-EAUX 2016-2020 et CONCERT-EAUX OPERA 2023-2024), ainsi que sur le lancement du projet StS-SEALEX (financement Académie 3, 2024-2027, cf. sous-partie 3.1). Comme mentionné en fin de section 2.3.4.1, les hypothèses de travail sont les suivantes :

1. Le Petit Âge Glaciaire aurait fini plus tôt que dans les Alpes du Nord.
2. La déprise agricole, qui a eu lieu plus tôt que dans les Alpes du Nord, a contribué à limiter la fourniture sédimentaire des versants, et donc l'alimentation du cours d'eau en sédiments.
3. Les sources sédimentaires ont été plus ou moins actives en fonction des conditions climatiques, mais surtout en fonction des modifications de l'usage des sols et du degré de protection fourni par le couvert végétal correspondant (cf. Boillat et al., 2004).

Pour étudier les 2 premières hypothèses, le projet est basé sur un couplage entre approche de terrain et traitement spatial de l'information (utilisation des outils SIG – *Systèmes d'Information Géographique*). La troisième hypothèse sera abordée à la fois par modélisation prospective (Vignal, 2020) et d'autre part par via l'étude des pratiques d'aménagement en lien avec le transport sédimentaire et les services écosystémiques associés (frise chrono-systémique pour représenter les interactions socioécologiques entre flux hydro-sédimentaires, usages associés au cours du temps et milieux).

Le détail de la méthodologie prévue est présenté ci-après.

Evolution des paysages maralpins sur 150-200 ans : dynamiques des versants

Ce volet a pour vocation de caractériser les dynamiques paysagères des versants, dans une logique de caractérisation de leur potentiel de fourniture sédimentaire. Nous adoptons une approche historique (150-200 ans), voire 400 ans suivant les résultats du projet StS-SEALEX, et abordons deux axes :

- Spatialisation et calage temporel des dynamiques de revégétalisation des versants pour définir un schéma conceptuel d'évolution des dynamiques de versant pour les Alpes du Sud (par opposition aux Alpes du Nord françaises notamment) :
 - Analyses spatiales pour développer des vues synoptiques des bassins versants, tant en termes d'occupation du sol que concernant les dynamiques de végétation
 - Géoréférencement et analyse de cartes postales anciennes (cf. Passy et Gratacap, *en ligne*); analyse d'autres sources documentaires (cartes topographiques, archives départementales, ou italiennes pour la Roya...); dérivation de MNT à partir d'orthophotos historiques (cf. IPGP); étude des dynamiques de la tree-line au cours du temps (cf. Feuillet, Univ. Caen)
 - Intégration des analyses de séries temporelles de NDVI dans la vallée de la Roya sur la période 2000-2020 (Vignal, 2020)
 - Mesures de terrain : dendrochronologie pour dater les populations sur les versants (en complément des résultats issus de l'analyse des documents d'archive) et relevés de végétation pour caractériser les espèces en place et en déduire des conditions physiques passées vs. actuelles
- Modélisation numérique des dynamiques de paysage (logique prospective, par exemple avec scénario de changement climatique) : cf. Vignal, 2020.

Evolution actuelle des paysages fluviaux : dynamiques des chenaux post-Alex

Ce volet a pour vocation de faire le lien entre dynamiques hydro-sédimentaires des versants et évolution des fonds de vallée. Approche actuelle (-5 ans vs. +6 ans post-Alex), et analyses en continuité avec ce qui a été mené dans le RETEX Alex (cf. ONF-RTM et al., 2023a), qui viendront compléter le suivi de l'évolution morphologique de la bande active (Liébault et al., 2024) :

- Dynamiques sédimentaires en flux (sismique acoustique passive) et pluri-annuelles (traçage sédimentaire par RFID active, cf. Chapuis et Adnès, 2023 et sous-partie 1.1)
- Evolution topographique des chenaux (analyse longitudinale et transversale de la mobilité latérale, cf. Liébault et al., 2024, mais aussi Terrier et al., 2019; Devreux et al., 2022b et Devreux, 2023)
- Modélisation hydro-sédimentaire pour évolution prospective du lit (scénario de changement climatique : crues éclair intenses et fréquentes).

En ce qui concerne plus particulièrement la poursuite du traçage sédimentaire RFID entrepris depuis 2018 sur la Roya : le projet prévoit les campagnes de relevé 2025 et 2026 et l'analyse des campagnes post-Alex (cf. section 2.2.4). Concernant la mise en place du suivi sédimentaire en Vésubie, nous nous plaçons dans une logique de comparaison inter-bassin versant avec la série plus longue obtenue en Roya :

- Suivi des flux sédimentaires par sismique passive : installation géophone
- Suivi des flux sédimentaires par RFID active (installation antenne RFID fixe, déploiement de 200 traceurs actifs, suivi pluri-annuel)
- Levés topographiques : profil en long (post-cruée et post-travaux en cours d'eau) et topographie de toute la largeur du lit pour analyses de la mobilité de la section en travers sur certains secteurs-clefs, par photogrammétrie-drone par exemple si ce n'est pas fait par d'autres partenaires entretemps.

2.3.4.3 Résultats attendus

Le projet prévoit d'ici à 2027 :

- L'évaluation des dynamiques de la fourniture sédimentaire en tête de bassin en lien avec l'évolution de l'occupation du sol (analyses spatiales, mesures de terrain et modélisation prospective), tout en bénéficiant de la littérature existante (Vignal, 2020 ; Passy et Gratacap, *en ligne* ; Le Vot, 2024) et en s'appuyant sur la notion de mosaïque paysagère (Belletti, 2012 ; Devreux, 2023).
- La poursuite de la quantification des flux sédimentaires en Roya (traçage sédimentaire par RFID active et passive, sismique passive), et la mise en place d'un suivi sur la Vésubie, avec une analyse particulière menée sur la résilience post-Alex qui permet d'intégrer une dimension temporelle beaucoup plus large.

Il s'agira ainsi d'apporter des éléments de connaissance, si possible quantifiés, concernant le lien entre :

- Les facteurs de contrôle (conditions d'habitat) de la végétation sur les versants (occupation du sol)
- La stabilité des versants
- Leur capacité à produire du matériel sédimentaire et à le transférer au réseau hydrographique (connectivité sédimentaire).

Les éléments sur lesquels portent ces déficits de connaissances sont illustrés par les points d'interrogation en rouge sur la Figure 17.

Par ailleurs, la dimension temporelle sera abordée par le biais de :

- l'évolution des conditions hydro-climatiques sur le bassin versant, via l'étude d'archives sédimentaires continentales et une approche de géoarchéologie fluviale et agraire (cf. Figure 50)
- l'évolution des conditions d'occupation du sol en fonction des politiques gouvernementales ; on distinguera en particulier les divergences spatiales et temporelles liées au rattachement de la partie amont de la Roya à la France à partir de 1860 (cf. Tableau 12 et Figure 51).

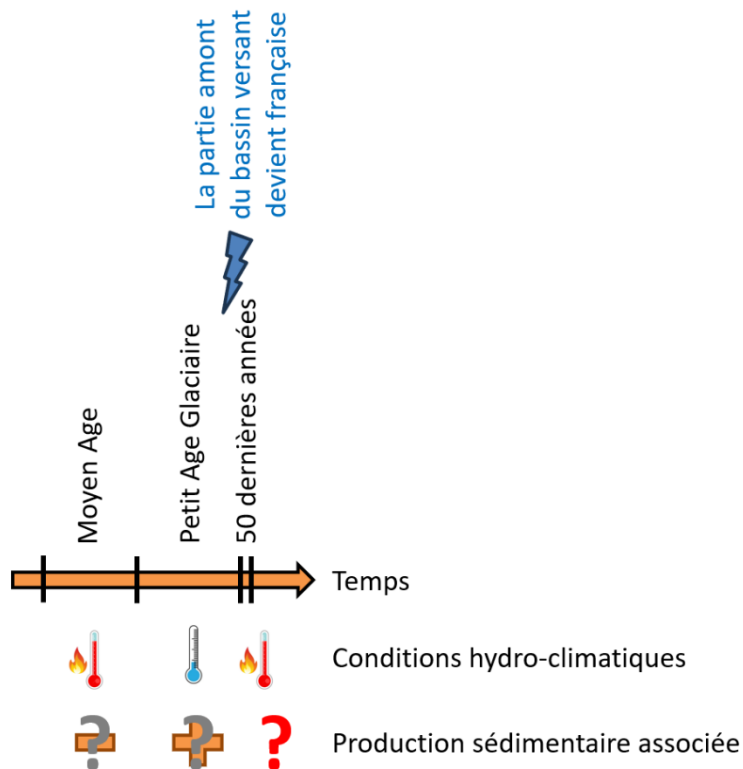


Figure 50. Conditions hydro-climatiques et production sédimentaire associée : hypothèses de travail en géoarchéologie fluviale et agraire pour le bassin versant de la Roya.

D'après Purdue, *comm. pers.*

Tableau 12. Synthèse de l'évolution des conditions d'occupation du sol sur les versants en Roya en fonction des politiques gouvernementales.

France (après 1860)	Italie
Partie amont du bassin versant après 1860	Entièrement du bassin versant puis seulement la partie à l'aval de Piène Basse après 1860
Exode rural après le Moyen Âge (calage temporel à préciser)	Maintien d'une agriculture et des activités rurales/agropastorales sur les versants
Planification territoriale : complexe et limitée après WWII	
Végétalisation des versants (strate arborée)	Les terrasses agricoles sur les versants sont toujours entretenues

D'après Vignal, *comm. pers.*

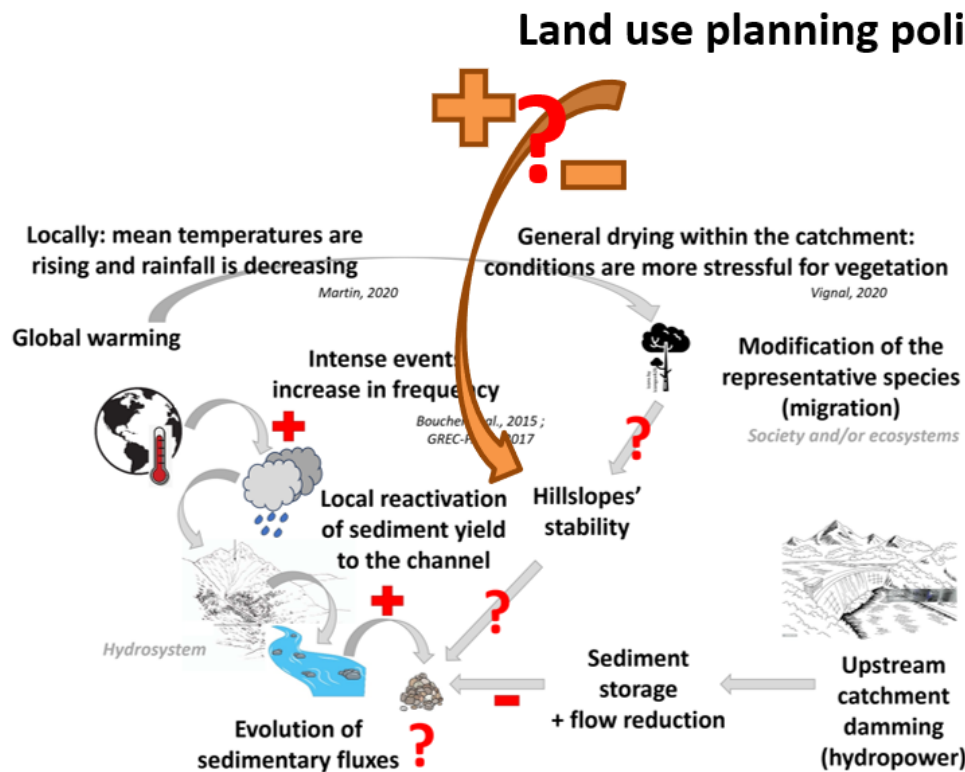


Figure 51. Hypothèse de l'influence des politiques gouvernementales sur l'occupation du sol et, in fine, sur la production sédimentaire dans le cas de la Roya.

Ainsi, du fait de sa situation géopolitique (bassin transfrontalier, mobilité historique de la frontière) et du monitoring des flux sédimentaires lors d'un événement extrême sur son périmètre, le bassin versant de la Roya constitue un excellent cas d'étude pour explorer les effets :

- Des changements d'occupation du sol en lien avec les politiques gouvernementales et leurs conséquences en termes de fourniture sédimentaire à l'échelle d'un bassin versant et dans une dimension historique
- Du changement climatique sur les flux sédimentaires, notamment en permettant d'intégrer à l'analyse un événement extrême dans la série temporelle considérée.

Notons que j'ai choisi d'illustrer le lien nécessaire entre géomorphologie fluviale et écologie en m'appuyant sur l'exemple des dynamiques paysagères et de leur influence sur les apports sédimentaires au chenal principal. Sur la Roya, nous aurions pu également illustrer ce point de vue en nous appuyant sur l'exemple du suivi des dynamiques sédimentaires des frayères (cf. section 2.2.3).

2.3.5 Conclusion : de la nécessité de coupler géomorphologie et écologie : l'essor de la biogéomorphologie et son intérêt pour la gestion et la restauration des corridors fluviaux

D'une manière générale, en partant d'une approche géomorphologique, deux directions d'approfondissement complémentaires sont possibles :

- Vers une compréhension approfondie des processus « physiques » d'un point de vue sédimentaire (tropisme « sciences de la Terre » ou « hydraulique »)
- Vers une compréhension approfondie des liens avec la biocénose (tropisme « écologie », « biogéographie »).

Dans les deux cas, tendre vers une gestion long terme et durable des espaces fluviaux suppose de prendre en compte la complexité des formes et des processus qui affectent les différents compartiments de l'hydrosystème. Si la première approche est essentielle pour définir un cadre théorique, la deuxième est indispensable pour aboutir à des outils réellement utiles à la société.

Ces deux approches sont donc nécessairement complémentaires, et nous devons nous astreindre à prendre en compte à la fois le biotope (i.e. ce qui relève de la géomorphologie) et la biocénose (à la fois la faune, la végétation et les besoins des sociétés humaines), à différentes échelles spatiales et temporelles. C'est seulement en aboutissant pleinement à une approche transdisciplinaire que nous réussirons à produire des connaissances opérationnelles pertinentes pour une gestion long terme de ces hydrosystèmes impactés par les activités humaines. La notion de restauration, c'est-à-dire d'intervention active, est à considérer avec mesure, en explicitant clairement les attendus d'une telle opération afin que les objectifs (et donc, *in fine*, les dépenses publiques) soient les plus ciblées possibles. A ce sujet, les articles de Dufour et Piégay (2009) ou Friberg et al. (2017) restent des plus pertinents, tout en étant plus récemment éclairés par de nouveaux travaux (Gariépy-Girouard et al., 2024).

Par ailleurs la gestion des espace fluviaux est en général abordée sous deux angles :

- Focus sur les processus impliqués dans la cascade sédimentaire et lien avec les services écosystémiques
- Focus sur la gestion des ressources et l'aménagement des zones vulnérables.

La généralisation de la compétence GEMAPI (GEstion des Milieux Aquatiques et Protection contre les Inondations) vise évidemment à combiner au mieux ces deux approches, mais il me semble judicieux de souligner l'intérêt de mener cette démarche de manière la plus systémique possible, tout en ayant conscience des freins/verrous qui émergent lors de la définition et la mise en œuvre des stratégies d'aménagement des espaces fluviaux.

3 Perspectives

Dans cette partie, je présente mes futurs axes de recherche à moyen et long terme, d'une part à travers un projet de recherche qui s'apprête à explorer le continuum terre-mer, puis en dressant mes perspectives de recherche.

3.1 Le continuum terre-mer, une approche systémique et transdisciplinaire pour une gestion durable des territoires

Cet axe de travail en est à ses débuts, puisqu'il s'appuie sur le projet StS-SEALEX (2024-2027) dont j'ai assuré l'essentiel du montage. Ce projet se déroulera en collaboration avec S. Migeon (Géoazur) et L. Purdue (CEPAM) pour Université Côte d'Azur.

Cet axe a vocation à structurer ma recherche pour les prochaines années, tout en résultant des connaissances acquises depuis ma prise de poste à l'Université Côte d'Azur en 2015 : il porte sur les transferts sédimentaires long terme et la gestion des flux hydro-sédimentaires post-Alex, dans une approche source-to-sink à l'échelle du bassin versant mais aussi, de manière plus originale, le long d'un continuum terre-mer.

3.1.1 Contexte et objectifs scientifiques

L'aléa torrentiel représente un enjeu crucial pour les territoires de montagne, mais aussi dans les zones littorales densément habitées du fait des précipitations extrêmes en milieu méditerranéen (Besson, 2005 ; ONERC, 2024). Le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2019) souligne que « [the] hydrological cycle is intensifying with increasing warming of the atmosphere » (Olsson et al., 2019 : section 1.4.1.1. Changes in water erosion risk due to precipitation changes), with « *The frequency and intensity of some extreme weather and climate events have increased as a consequence of global warming* » (Jia et al., 2019 : chap. 2. Land-climate interactions, executive summary). Ces éléments sont particulièrement valables en région méditerranéenne.

Pour contraindre la fenêtre temporelle associée à des épisodes de pluie exceptionnellement intenses dans une région précise (ici la Riviera méditerranéenne), nous devons travailler d'une part sur des séries temporelles les plus longues possible (plusieurs centaines voire milliers d'années), mais surtout sur des séries les plus complètes possible. En fonction du climat, des caractéristiques physiographiques et des processus érosifs à l'œuvre, ces séries long terme peuvent se trouver à la fois en domaine continental (terrasses alluviales...) ou dans le domaine sous-marin (turbidites des marges continentales).

La survenue d'une crue de période de retour > 1000 ans sur le bassin versant de la Roya (tempête Alex du 02/10/2020, cf. Carrega et Michelot, 2021 ; CEREMA, 2021, Payrastre *et al.*, 2022 ; ONF-RTM *et al.*, 2023a ; Liébault *et al.*, 2024) est l'occasion d'explorer le fonctionnement hydro-sédimentaire d'un hydrosystème complet, avec une profondeur temporelle inédite et une cohérence spatiale (continuum terre-mer) elle aussi exceptionnelle.

La dimension interdisciplinaire est au cœur du montage du projet, et un des point d'attention/résultat attendu est l'atteinte d'une dimension transdisciplinaire à l'issue du projet : le projet StS-SEALEX se propose ainsi de caractériser l'aléa « crue torrentielle » et ses conséquences en termes de dégradation des sols pour approfondir le lien entre les évolutions du climat, le stockage sédimentaire (stockage continental temporaire vs. dépôts marins), les évolutions de l'occupation du sol et l'aménagement du territoire.

L'étude des flux sédimentaires à l'échelle du bassin versant, dans une approche *source-to-sink*, avec une dimension rétrospective et prospective, doit nous permettre d'acquérir une meilleure compréhension des événements extrêmes passés (type tempête Alex) et une meilleure intégration de leurs conséquences en termes d'aménagement du territoire : cette démarche part de l'hypothèse qu'il existe un certain déterminisme climato-géomorphologique sur les modalités d'occupation des territoires dans les Alpes du Sud, tout en intégrant le fait que l'activité sédimentaire issue des versants est probablement en lien avec les premières occupations humaines (Berger et al., 2018). En travaillant essentiellement à l'échelle du bassin versant de la Roya et à partir d'une reformulation scientifique de questions opérationnelles, nous prévoyons de dégager des éléments de connaissance applicables à l'échelle régionale (la Riviera méditerranéenne), en particulier aux bassins de la Tinée, du Haut-Var, et de la Nervia en Ligurie.

Nous pouvons résumer les questions opérationnelles en 4 points :

- À quel point est-ce que la tempête ALEX est exceptionnelle ?
- À quoi doit-on s'attendre concernant les volumes de sédiments dans le bassin versant ?
- Peut-on utiliser ces matériaux remobilisés/remobilisables, par exemple pour la construction ?
- Comment faire émerger un récit commun autour de la gestion du territoire ?

Ce qui conduit à 3 grandes questions qui relèvent du champ académique :

- Risques torrentiels dans les bassins versants de montagne :
 - Comment replacer les événements exceptionnels dans un cadre temporel plus large ?
- Suite à la tempête ALEX du 02/10/2020 sur les Alpes-Maritimes :
 - Quels seront les rythmes de déstockage des matériaux remobilisés ?
- Gestion prospective des flux hydro-sédimentaires :
 - Comment intégrer les flux sédimentaires dans une gestion durable du territoire ?

Ces questionnements et les objets d'étude associés s'organisent selon une disposition qui est précisée en Figure 52.

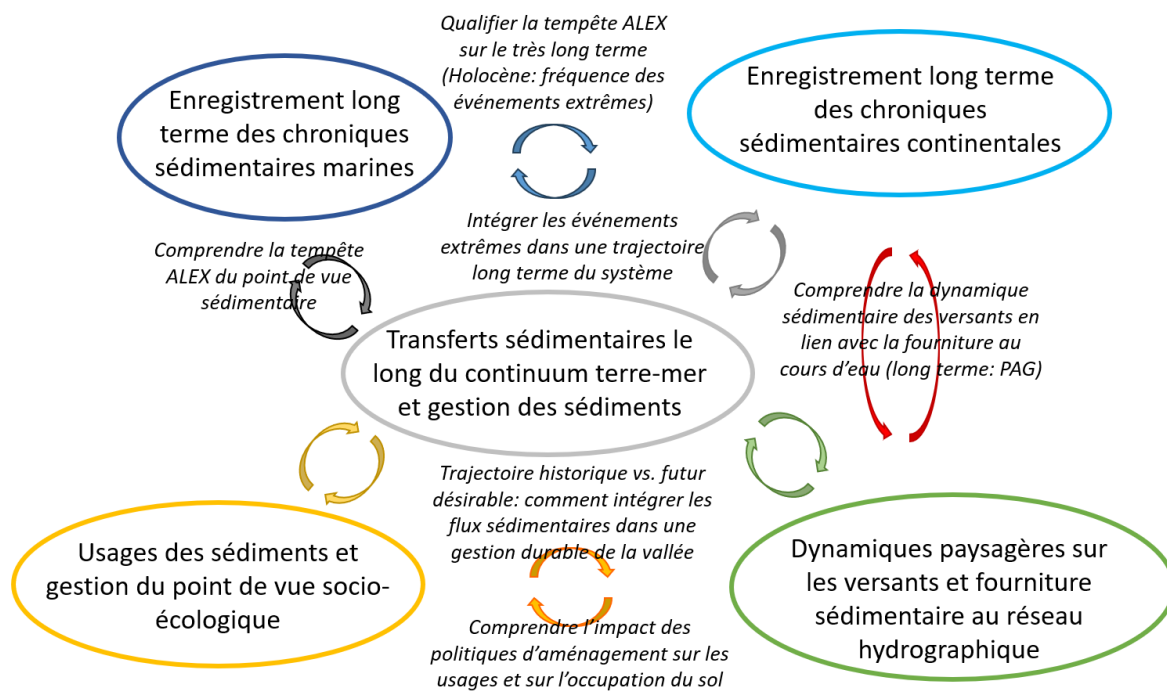


Figure 52. Synthèse graphique des questionnements du projet StS-SEALEX et des objets de recherche associés.

Les verrous de connaissance sont indiqués en italique, les objets d'étude sont identifiés par un cercle dont la couleur renvoie à la discipline concernée (bleu foncé : géologie marine ; bleu clair : géoarchéologie fluviale et agraire ; gris : géomorphologie fluviale ; vert : biogéographie ; jaune : socio-écologie). Les flèches indiquent les liens entre les questionnements et/ou les objets d'étude, qui seront des axes privilégiés d'échange pour atteindre l'objectif de transdisciplinarité à l'issue du projet.

3.1.2 Méthodologie

L'approche « *space for time* » présentée en section 2.3.3.2 est appliquée ici aux enregistrements sédimentaires dans une dimension verticale, tandis que le concept de *source-to-sink* (ici continuum terre-mer) fait appel à la notion de continuité des flux sédimentaires (Anthony et Julian, 1999 ; Ballantyne, 2002 ; Sømme et al., 2009 ; Liébault et al., 2010 ; Cossart, 2014) et à la notion d'emboîtement d'échelles spatio-temporelles classique en géographie physique.

Comme évoqué dans la section 3.1.1, l'approche pluridisciplinaire est intrinsèque à la construction du projet, qui vise à atteindre une dimension transdisciplinaire. Le projet intègre ainsi des disciplines des sciences environnementales et des humanités, et à vocation à s'inscrire dans des questionnements opérationnels, pour le territoire.

Il est constitué de 5 volets qui reprennent les 5 objets d'étude disciplinaires identifiés en Figure 52 (géologie marine ; géoarchéologie fluviale et agraire ; géomorphologie fluviale ; biogéographie ; socio-écologie) et dont le pilotage est assuré par un coordinateur spécialisé (Géoazur, CEPAM, ESPACE-Nice, ESPACE-Avignon, IMT Mines Alès). Le projet intègre également deux autres structures (OFB et Université Paris Cité), et chaque membre de cette équipe « initiale » se positionne à l'interface entre plusieurs disciplines du fait de son expérience professionnelle.

Nous détaillons ci-après les axes méthodologiques envisagés pour chacun de ces 5 volets.

3.1.2.1 Enregistrement long terme des chroniques sédimentaires marines

L'étude de turbidites se propose de contraindre l'occurrence d'événements extrêmes de type « tempête Alex » sur le temps long, i.e. à l'échelle de l'Holocène. Dans le prolongement des résultats préliminaires obtenus dans les canyons sous-marins du Var et de la Roya (Courboux et al., 2020 ; Morelli et al., 2022 ; Ratzov et al., 2023 ; Roquain et Carré, 2023), nous prévoyons d'identifier et de cartographier les dépôts sédimentaires sur le plateau continental, de caractériser ces dépôts en termes d'âge, de granulométrie, et plus précisément de caractériser les dépôts associés aux crues torrentielles à l'exutoire de la Roya. Cette partie du projet repose sur le projet SEALEX-CSR (PI : S. Migeon, prévu en 2025) et le projet StS-Roya (PI : M. Chapuis, 2024). Coordinateur de ce volet : S. Migeon (Géoazur).

3.1.2.2 Enregistrement long terme des chroniques sédimentaires continentales

Les terrasses alluviales qui pourraient avoir enregistré des épisodes de crue historiques (jusqu'à 400 ans) seront localisées et échantillonnées. Les carottes sédimentaires seront analysées dans l'optique de déterminer l'âge et la distribution granulométrique des dépôts. Cette partie du projet devrait bénéficier de travaux en cours (R. Kerverdo, doctorant à Sorbonne Université). Coordinatrice de ce volet : L. Purdue (CEPAM).

3.1.2.3 Transferts sédimentaires le long du continuum terre-mer et gestion des sédiments

Nous prévoyons de faire le lien entre flux sédimentaires actuels à l'échelle du bassin versant, et transferts sédimentaires passés inférés depuis les séries sédimentaires continentales et marines explorées dans les deux volets précédents. Nous prévoyons également de relier ces résultats aux modes et problématiques actuels de gestion des sédiments en Roya. Cette partie du projet repose principalement sur deux projets Interreg Alcotra (Concert-Eaux 2017-2020 et Concert-Eaux OPERA 2023-2024, dont j'assurais le pilotage du volet « transferts sédimentaires ») et plus généralement sur le travail accompli sur le bassin versant de la Roya depuis 2016 (cf. sous-partie 1.1), mais aussi sur les acquis antérieurs issus de projets européens franco-italiens Interreg Alcotra : EUROBASSIN (2000-2006), EUR-EAU-PA (ou EUROBASSIN2 : 2010-2013), RiskNat (2009-2012) et RiskNET (2013-2015). Coordinatrice de ce volet : M. Chapuis (ESPACE-Nice).

3.1.2.4 Dynamiques paysagères sur les versants et fourniture sédimentaire au réseau hydrographique

L'occupation du sol sur les versants influence le rythme de l'érosion et donc la fourniture sédimentaire depuis les versants vers le réseau hydrographique. Nous prévoyons dans ce volet de faire le lien entre changements d'occupation du sol et flux sédimentaires au sein de l'hydrosystème, à la fois dans une dimension rétrospective et dans une dimension prospective (Petit Âge Glaciaire depuis 200 ans, vs. modélisation de l'impact des changements climatiques sur les dynamiques de végétation à horizon 100 ans). Cette partie du projet a été plus précisément présentée en section 2.3.4. Coordinateur de ce volet : M. Vignal (ESPACE-Avignon).

3.1.2.5 Usages des sédiments et gestion du point de vue socio-écologique

Les sédiments ont de multiples usages (BTP, ballast des routes...) et constituent donc une ressource cruciale lorsqu'elle est présente en quantité suffisante dans un hydrosystème. A travers l'établissement d'une frise chrono-systémique originale, nous prévoyons d'identifier les usages historiques et actuels des sédiments au sein du bassin versant (tant sur la partie française qu'italienne), et d'analyser l'influence des politiques gouvernementales sur les changements d'occupation du sol (cf. Tableau 12 et Figure 51), la gestion des sédiments et leurs usages sur les deux versants du territoire transfrontalier étudié. Cette frise chrono-systémique constituera

ensuite un instrument de médiation lors d'ateliers participatifs, qu'à l'heure actuelle nous pensons destiner aux élus du territoire de la Roya. Cette partie du projet s'appuiera sur le travail déjà réalisé par l'équipe sur d'autres bassins versants méditerranéens (cf. Figure 14a).
 Coordinatrice de ce volet : J. Cerceau (IMT Mines Alès).

3.1.3 Résultats attendus

3.1.3.1 Transdisciplinarité

Au-delà de l'approche « par volets/objets disciplinaires » (cf. Figure 52), et dans la mesure où chaque membre de l'équipe est déjà familiarisé avec d'autres disciplines proches, le projet s'organise ainsi en 3 nexus que sont :

- Le nexus terre-mer
- Le nexus bio-géographie
- Le nexus socio-écologie.

Cette structuration a vocation à permettre une transformation plus aisée vers le niveau transdisciplinaire (cf. Figure 53) via la mise en commun de résultats tout au long du projet et une attention particulière portée sur la stratégie de mutualisation des connaissances qui constituera l'essentiel des attendus de la dernière année du projet.

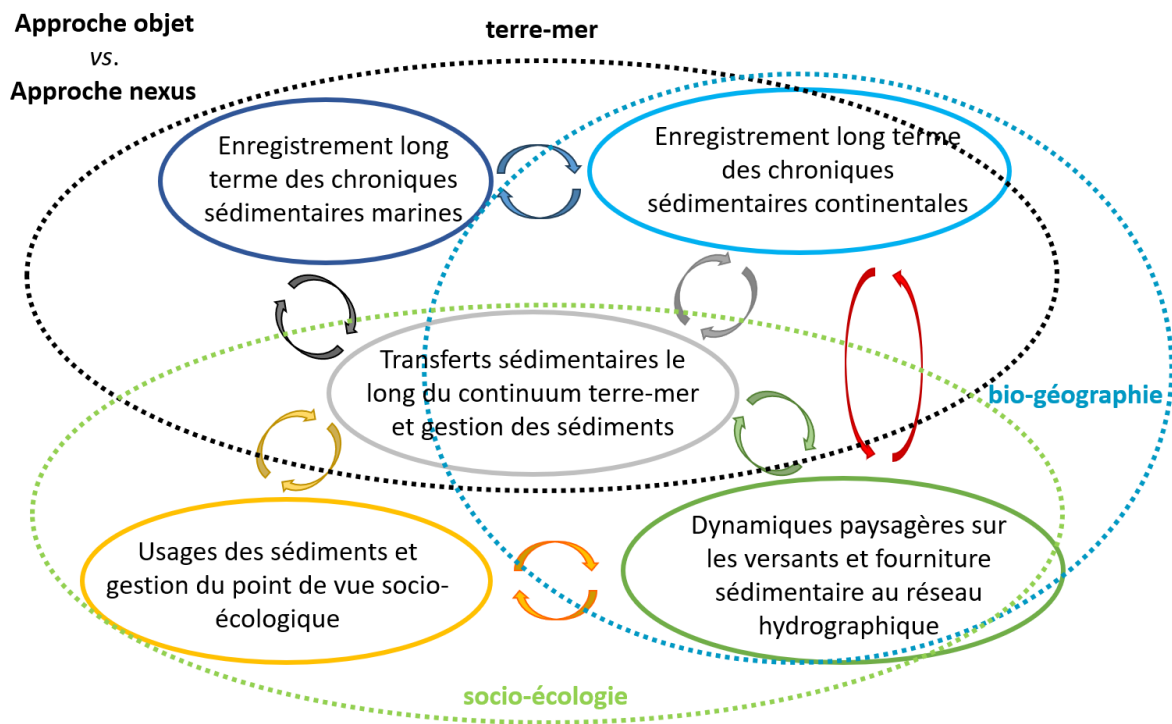


Figure 53. Relation entre approche « objet » (cercles pleins) et approche « nexus » (pointillés) pour favoriser l'émergence d'une transdisciplinarité à l'issue du projet.

3.1.3.2 Retour succinct sur l'épisode Alex d'un point de vue hydrosédimentaire

La tempête Alex du 02/10/2020 a généré des précipitations maximales mesurées de 663 mm en 24h au lac des Mesces (Carrega et Michelot, 2021 ; CEREMA, 2021 ; Payrastre et al., 2022), ce qui

constitue un record historique sur le pourtour méditerranéen (CEREMA, 2021) et classe l'événement comme ayant une période de retour supérieure ou égale à 1000 ans sur une large partie du bassin versant de la Roya (cf. Figure 54). Cet événement est, de fait, considéré comme structurant pour le projet StS-SEALEX.

Le panache de sédiments visible à l'exutoire quelques jours après la crue (Piton et al., 2024 ; Liébault et al., 2024), ainsi que la quantité de débris/déchets et de bois flottant retrouvés en mer suggère un transport intense des éléments « disponibles » depuis l'amont du réseau hydrographique jusqu'à l'embouchure en Méditerranée. Une estimation des volumes de sédiments mobilisés au cours de l'épisode pour la partie française a été réalisée (Liébault et al., 2024) et une analyse exhaustive des évolutions morphologiques observées suite à la crue du 02/10/2020 est présentée dans le « Retour d'expérience post-Alex – volet torrentiel » (ONF-RTM et al., 2023a). Ces éléments sont complétés par le suivi des flux sédimentaires par traçage RFID et sismique passive menés en Roya depuis 2018, et qui ont permis de documenter notamment les distances de transport de particules sédimentaires au cours d'une crue de période de retour 1000 ans (ce qui constitue un jeu de données unique au monde ; Chapuis et al., 2022b ; Chapuis et Adnès, 2023) et la cinétique de la crue (Chapuis et al., 2022b ; Chmiel et al., 2022).

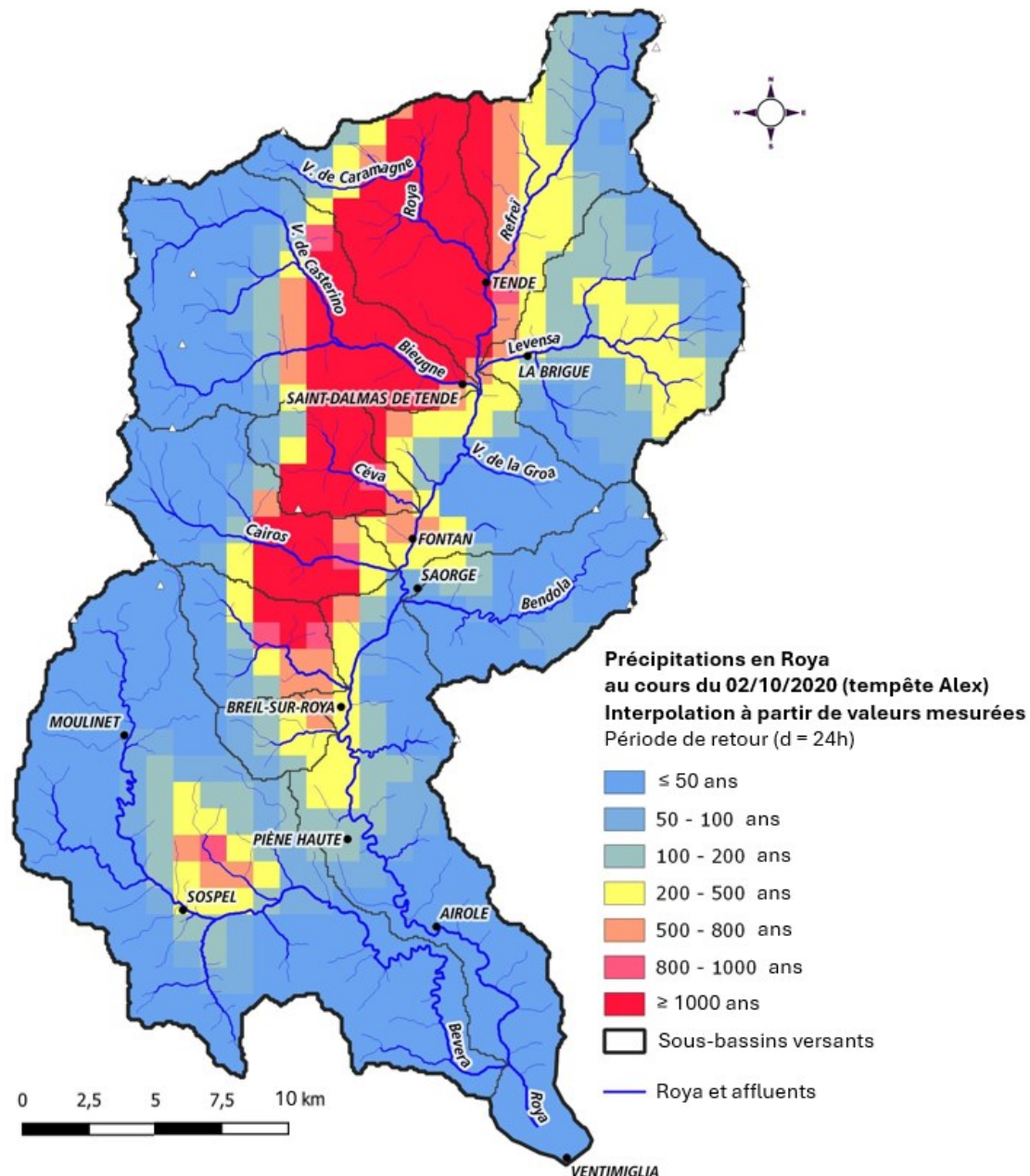


Figure 54. Précipitations en Roya au cours du 02/10/2020 (tempête Alex). L'interpolation des valeurs mesurées indique que presque un quart du bassin versant amont a été soumis à des précipitations de période de retour 1000 ans.

Adapté depuis ONF-RTM et al., 2023a

Nous détaillons ci-après les résultats attendus pour chacun des 5 volets.

3.1.3.3 Enregistrement long terme des chroniques sédimentaires marines

L'événement extrême relatif à la tempête Alex en Roya constitue une occasion unique de documenter un enregistrement sédimentaire terre-mer. L'analyse préliminaire des carottes sous-marines prélevées juste après la tempête Alex à l'embouchure du Var (campagne SEALEX, PI : S. Migeon) montre la présence d'un dépôt de sédiments correspondant à l'événement du 02/10/2020. Il est à noter que cet enregistrement semble (Migeon, *comm. pers.*), à l'échelle de

l'Holocène, fort peu épais par rapport à d'autres crues historiques enregistrées à l'embouchure du Var (Mulder et al., 2001 ; Courboux et al., 2020 ; Morelli et al., 2022 ; Ratzov et al., 2023).

En revanche, lors de cette même campagne, les carottes prélevées à l'aval du canyon sous-marin de la Roya n'ont montré aucun enregistrement de la tempête Alex (Ratzov et al., 2023 ; Roquain et Carré, 2023). L'hypothèse actuellement retenue est que les particules sédimentaires transportées par la crue sont restées bloquées sur le plateau continental.

Une nouvelle campagne de prélèvements et de mesures est ainsi prévue en 2025 (projet SEALEX-CSR, collaboration Géoazur/ESPACE, PI : S. Migeon) : elle prévoit d'une part de réaliser des prélèvements de carottes sédimentaires plus en amont dans le canyon sous-marin, pour vérifier l'absence d'enregistrement de la tempête Alex dans le canyon, et d'autre part de réaliser plusieurs séries de mesures sur le plateau continental (cf. Figure 55) :

- Levé bathymétrique pour cartographier les dépôts les plus récents
- Caméra tractée près du fond pour évaluer la distribution granulométrique des dépôts et les cartographier
- Réaliser une prospection RFID sous-marine (actif et/ou passif) à partir des traceurs implantés en Roya dans le cadre du projet Concert-Eaux (portage M. Chapuis).

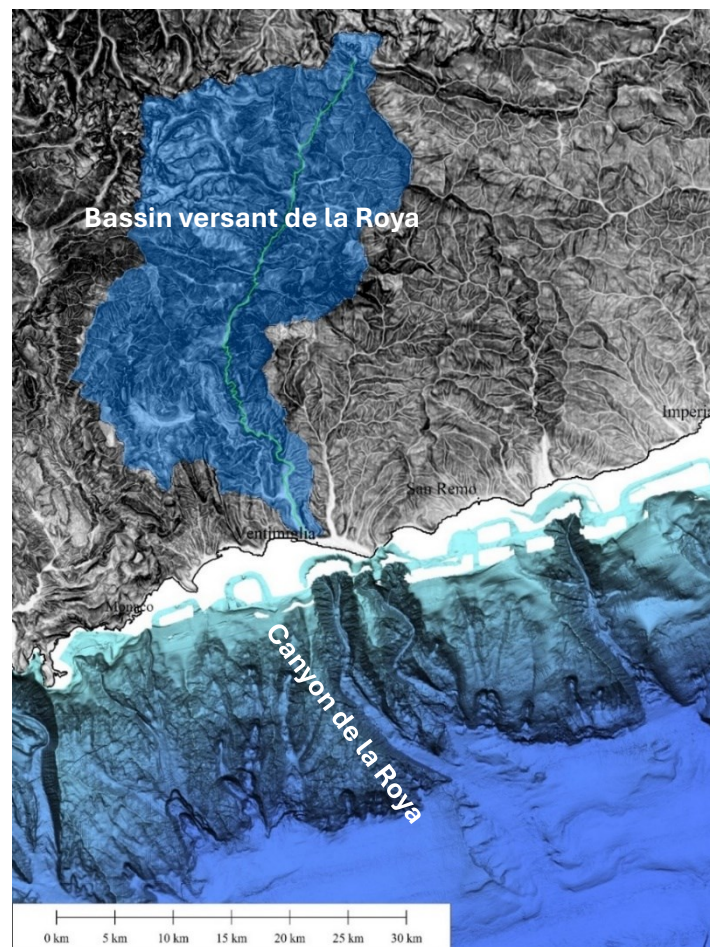


Figure 55. Le bassin versant de la Roya est prolongé par un canyon sous-marin ; entre les deux, un plateau continental étroit.

Source : Migeon, *comm. pers.*

3.1.3.4 *Enregistrement long terme des chroniques sédimentaires continentales*

L'analyse sédimentologique de carottes sédimentaires continentales, croisée à une analyse des pratiques agricoles historiques, devrait permettre de mieux comprendre l'histoire des paysages cultivés sur les versants, en lien avec l'histoire de la gestion de l'eau et des sols à l'échelle du bassin versant. En particulier, nous espérons que cette partie de l'étude permettra de mieux comprendre si, et en quoi, les pratiques culturelles sur les versants ont eu un impact sur la stabilité des sols sur ces versants, et donc sur leur capacité à fournir des sédiments au réseau hydrographique. Enfin, dans la mesure où cette approche intègre aussi les effets des contraintes climatiques sur les espaces cultivés, elle devrait nous permettre de mieux comprendre comment ont été gérées les ressources en eau et en sol au cours du temps en lien avec les changements climatiques subis par le bassin versant et ses habitants à l'échelle de l'Holocène. Ceci appuiera la réflexion prospective prévue dans le cadre du projet (cf. sections 2.3.4 et 3.1.3.6).

3.1.3.5 *Transferts sédimentaires le long du continuum terre-mer et gestion des sédiments*

Ce volet se situe à la croisée des 4 autres volets du projet. Il constitue donc l'ossature du projet, et bénéficie des éléments de connaissance acquis depuis 2016 en Roya en termes de quantification des flux sédimentaires et de connectivité sédimentaire à l'échelle du bassin versant, ainsi que des éléments de connaissance en termes de gouvernance, jeux d'acteurs et vie du territoire.

Dans un premier temps, les éléments de connaissance relatifs à la dimension « physique » des transferts sédimentaires (traçage RFID, monitoring par sismique passive) seront complétés et mobilisés pour affiner la modélisation conceptuelle des flux sédimentaires à l'échelle du bassin versant en contexte de changement climatique (cf. Chapuis, *submit.*). Il s'agira ici de grouper les apports de connaissance issus des deux nexus « terre-mer » et « bio-géographie » identifiés en Figure 53. Cet effort de modélisation conceptuelle à l'échelle du bassin versant sera en particulier développé :

- Avec une dimension spatiale inédite, puisqu'il intégrera les éléments de connaissance dégagés en section 3.1.3.3 sur la partie sous-marine de l'hydrosystème Roya, dans une démarche de continuum terre-mer rarement entreprise
- Avec une profondeur temporelle également plus importante, puisqu'il prévoit d'intégrer à la fois une dimension rétrospective à l'échelle de l'Holocène (cf. sections 3.1.3.3 et 3.1.3.4) pour intégrer des événements extrêmes, et à la fois une dimension prospective en contexte de changement climatique à horizon 100 ans (cf. section 3.1.3.6).

Dans un deuxième temps, les éléments de connaissance acquis depuis 2016 relevant du domaine des SHS seront mobilisés (dans le cadre du nexus « socio-écologie », cf. section 3.1.3.7 et Figure 53) pour contribuer à une lecture historique des usages des sédiments sur le bassin versant et contribuer à construire des stratégies de gestion durable des stocks sédimentaires à l'échelle du bassin versant (cf. Chapuis, 2020 ; Regione Liguria, 2021). Ces éléments de gestion, s'ils ne sont pas forcément directement applicables, seront destinés à nourrir la réflexion des gestionnaires du territoire sur ces thématiques (protocole d'intention transfrontalier franco-italien pour le fleuve de la Roya et objectif de mise en place d'un contrat de fleuve à l'échelle du bassin versant, cf. projets Concert-Eaux 2017-2020 et Concert-Eaux OPERA 2023-2024).

3.1.3.6 *Dynamiques paysagères sur les versants et fourniture sédimentaire au réseau hydrographique*

Les résultats attendus sont explicités en section 2.3.4. Pour mémoire, ils visent à préciser les processus, spatialités et temporalités associées au lien entre dynamiques de végétation sur les versants et production sédimentaire au réseau hydrographique. Ce travail sera réalisé d'une part à l'échelle des 150-200 dernières années, et d'autre part dans une dimension prospective de changement climatique à horizon 100 ans. Il est attendu que ce volet bénéficie des connaissances acquises dans le cadre des sections 3.1.3.4 et 3.1.3.5, ce qui justifie pleinement son intégration au sein du nexus « bio-géographie » (cf. Figure 52).

Ces éléments de connaissance issus du domaine de la biogéographie et de la géoarchéologie fluviale et agraire devraient notamment permettre de préciser la modélisation conceptuelle présentée en Figure 51, en ce qui concerne le lien entre dynamiques végétales et politiques d'occupation des sols, stabilité des versants, et évolution des flux sédimentaires au chenal. En l'état des connaissances actuelles, il est peu probable que des éléments quantitatifs puissent être dégagés via la modélisation prospective pour ce qui est de la production sédimentaire des versants à horizon 100 ans. Cependant des éléments qualitatifs devraient nourrir la réflexion globale visant à dessiner un devenir du territoire soumis à des contraintes climatiques en évolution, et ainsi préciser une trajectoire du bassin versant en termes de dynamiques sédimentaires. Ceci alimentera en retour les réflexions menées dans le cadre de la section 3.1.3.5 concernant l'élaboration de stratégies de gestion durable des stocks sédimentaires à l'échelle du bassin versant.

3.1.3.7 *Usages des sédiments et gestion du point de vue socio-écologique*

A travers la définition d'une frise chrono-systémique sur les usages historiques et actuels des sédiments au sein du bassin versant, il s'agira dans un premier temps de dégager des éléments d'analyse de l'influence des politiques gouvernementales sur les changements d'occupation du sol (en lien avec les sections 3.1.3.5 et 3.1.3.6, d'où le nexus « socio-écologie »), la gestion des sédiments et leurs usages sur les deux versants du territoire transfrontalier étudié (cf. section 3.1.2.5).

Cet outil permettra de retracer l'histoire (une histoire) environnementale de la Roya autour de la gestion des sédiments et des risques torrentiels, tout en intégrant les perceptions et représentations des riverains dans le cadre plus général de la gestion des milieux aquatiques. Potentiellement à destination des habitants et gestionnaires de la Roya pour qu'ils s'approprient la trajectoire historique de cette gestion des sédiments, cet outil sera plus spécifiquement mobilisé dans le cadre d'ateliers participatifs que nous pensons destiner ici aux élus, afin d'initier une réflexion sur un futur désirable pour le territoire, par le biais de l'écriture d'un récit commun fédérateur, au regard notamment des enjeux transfrontaliers de la vallée (d'après Serrhini-Naji, *comm. pers.*).

Plus généralement, ce volet permettra de renforcer l'amorce de transfert de connaissances vers la société civile que j'ai entrepris depuis quelques années (cf. section 3.2.3).

3.2 Perspectives de recherche

Je détaille dans cette section quelques réflexions sur le transfert de connaissances, puis mon programme d'activités de recherche pour les prochaines années et souligne enfin les éléments de mon parcours qui attestent de ma capacité à diriger des recherches.

3.2.1 Montage de projets et direction de la recherche

J'ai pu à ce jour encadrer 27 étudiants hors doctorat, dont la moitié de niveau master. J'ai eu l'occasion de (co)diriger une thèse menée à bien (L. Devreux, 2023) et de participer à 4 autres jurys de soutenance de thèse : ceci atteste d'une **reconnaissance de la communauté concernant ma capacité à juger de la qualité d'une recherche.**

Au-delà de la co-direction du doctorat de L. Devreux qui atteste de **ma capacité à diriger la recherche dans ses différentes composantes** (définition d'un sujet pertinent pour la communauté scientifique en lien avec des questionnements opérationnels ; montage du projet, recherche de financement et des collaborations nécessaires ; encadrement, management de la recherche et gestion de projet), les différents projets que j'ai pu monter et piloter (cf. Tableau 13) attestent de **ma capacité à identifier et à fédérer, à chaque fois, une équipe avec des compétences différentes mais complémentaires** pour mener à terme, et à bien, le projet concerné. Par exemple, je peux citer de nouveau le doctorat de L. Devreux et notamment la constitution de son équipe de co-encadrement et de son comité de pilotage scientifique, ou encore le récent projet StS-SEALEX qui balaie un large spectre disciplinaire qui va de la géologie marine à la socio-écologie.

Le projet MarAlex (2023) correspondait à l'organisation d'une série de conférences « sur le terrain » dans le cadre des excursions de la commission Hydrosystèmes du Comité National Francophone de Géographie. Ces 3 journées ont été l'occasion de mettre en valeur les travaux menés par le laboratoire ESPACE et leurs partenaires, et d'aborder 3 grandes thématiques :

- Spécificités hydroclimatiques des Alpes-Maritimes et conséquences des précipitations exceptionnelles du 02/10/2020 (tempête Alex)
- Géomorphologie torrentielle et crues éclair dans un contexte de changement climatique
- Enjeux de gestion et de restauration des rivières en tresses.

Les 19 intervenants (ESPACE, OFB, ONF-RTM, Inrae, SMIAGE, EDF..) ont ainsi proposé à la soixantaine de participants un état de la connaissance sur le territoire maralpin, dans un contexte de changements multiples qui s'emboîtent tant dans une dimension spatiale que temporelle : dynamiques de changements post-Alex, changement climatique, changement des pratiques et de vécus liés aux territoires impactés, à échelle ponctuelle (site d'étude), à l'échelle de la vallée, à l'échelle inter-valléenne.

Cette réalisation m'a confortée dans l'idée que monter des projets sans me placer au cœur de la réalisation, en assure d'une part la robustesse, mais renforce également le caractère complémentaire des différentes parties prenantes. **Cette manière de diriger la recherche favorise l'intégration de ressources de pointe et donc contribue à envisager une recherche de qualité tout au long d'une carrière.**

J'ai eu l'occasion de monter et d'obtenir le financement de trois projets pluriannuels de budget total > 100 k€ impliquant de multiples partenaires institutionnels ces dernières années (cf. Tableau 13) :

- Le projet associé au doctorat de L. Devreux (cf. section 2.3.3), qui correspondait d'une part au financement de la masse salariale correspondante (financement Région PACA / Agence de l'Eau RMC à hauteur de 92 k€ sur 3 ans, 2018-2021) et d'autre part à l'environnement de travail nécessaire (financement ZABR de 1500 €, 2019 ; financement du projet MedRiver par l'Académie 3 d'UniCA à hauteur de 14 k€ sur 2 ans, 2018-2020)
- Le projet DHySed-7 (cf. section 2.1.5.1) qui impliquait trois sites de l'UMR ESPACE, l'IMT Mines Alès, l'Université Grenoble Alpes et Inrae, pour un montant total de 180 k€ sur 3 ans (financement Agence de l'Eau RMC à hauteur de 34%, 2020-2023). Ce projet portait sur l'identification des spécificités des dynamiques hydro-sédimentaires dans les Cévennes et a conduit à la production d'un rapport d'activités (Chapuis et al., 2023)
- Le projet StS-SEALEX (cf. sous-partie 3.1) qui implique trois laboratoires d'UniCA (ESPACE, Géoazur, CEPAM), l'OFB et l'IMT Mines Alès, pour un montant total de 133 k€ sur 3 ans (financement Académie 3, 2024-2027). Pour mémoire, ce projet porte sur les transferts sédimentaires long terme et la gestion des flux hydro-sédimentaires post-Alex.

Par ailleurs, il est à noter que l'Ecole Doctorale SHAL à laquelle nous sommes rattachés n'accorde qu'une unique dérogation pour une codirection de doctorat aux MCF. Dans la mesure où j'ai obtenu cette dérogation pour le doctorat de L. Devreux, et qu'un projet de doctorat est envisagé dans le cadre du projet StS-SEALEX (financement OFB), il était donc indispensable d'engager une démarche d'obtention d'une Habilitation à Diriger les Recherches.

Enfin, mon champ disciplinaire est très peu représenté, à Nice mais plus généralement en Région Sud-PACA (seulement J. Douvinet à Avignon Université). **Du fait de ce relatif isolement géographique, de la (très) forte demande territoriale et de mon indépendance intellectuelle quant à la définition de mes axes de recherche depuis ma prise de poste en 2015, une telle démarche d'obtention d'une Habilitation à Diriger les Recherches était de fait un cheminement professionnel logique.**

Tableau 13. Organisation du manuscrit et lien des différentes parties abordées avec les projets financés, classés chronologiquement. Mon degré d'implication dans ces différents projets est précisé par le code couleur : montage et portage (vert), (co)portage du projet (orange), (co)portage d'un workpackage (bleu) ou implication simple (noir).

Partie du manuscrit \ Projet		Post-doc Univ. of Waterloo (développement méthodologique RFID)	Chargée de mission SPM (gestion des hydrosystèmes alpins et approche régionale)	Collaboration EDF	Collaboration CEA	Collaboration MNCA	Concert-Eaux et Concert-Eaux OPERA	MedRiver et doctorat L. Devreux	FORESEE	DHySed-7	MarAlpiSedi	MarAlex	StS-Roya	StS-SEALEX	SEALEX-CSR	Retro-Hydro	SUFUMANG
2. Réalisations	Partie 2.1. Les flux hydro-sédimentaires, un proxy des interactions climat-société à l'échelle du bassin versant ?		X	X	X	X	X	X		X	X						
	Partie 2.2. Transferts sédimentaires dans un bassin versant à régime montagnard sous influence méditerranéenne (Roya)	X		X			X	X	X		X	X	X	X	X		
	Partie 2.3. Gestion et restauration des corridors fluviaux en contexte alpin et méditerranéen : un couplage entre géomorphologie et écologie						X	X				X	X	X			
3. Perspectives	Partie 3.1. Le continuum terre-mer, une approche systémique et transdisciplinaire pour une gestion durable des territoires												X	X	X		
	Partie 3.2. Perspectives de recherche															X	X

3.2.2 Principes et pistes de valorisation de la recherche

L'écriture de ce manuscrit est également l'occasion de faire le point sur les axes de valorisation prioritaires. A ce titre, la rédaction de la sous-partie 1.1 sur le fonctionnement hydrosédimentaire de la Roya m'a permis d'avancer dans la démarche de valorisation des résultats afférents, qui avait été mise en pause, de fait, lors de mon arrêt maladie entre 2020 et 2022. Cette structuration des résultats essentiels de cet aspect de mon travail de recherche devrait me permettre **d'aboutir rapidement à la publication** d'au moins deux nouveaux articles de rang A, d'une part concernant le traçage sédimentaire par RFID conduit pendant 7 ans en contexte torrentiel, et d'autre part concernant l'approche croisée RFID/sismique qui intègre le suivi d'un événement de période de retour 1000 ans.

En ce qui concerne cette valorisation, je suis convaincue que **la démarche de « science ouverte » doit être au cœur de nos approches** dès lors qu'une production (notamment écrite) est disponible. Cela participe évidemment de la démarche FAIR²³ qui est, il me semble, adaptée et issue du nouvel environnement numérique au cœur de nos pratiques professionnelles et relève d'une forme d'optimisation du travail de fond accompli (et ce d'autant plus lorsque cela est fait sur fonds publics). J'ai à cœur de soutenir la démarche engagée au niveau de l'ensemble de la communauté scientifique française en m'astreignant à diffuser l'ensemble de mes productions écrites via la plateforme HAL.

Comme toute action, cela peut vite s'avérer chronophage, et il me semble que les tutelles gagnent à mettre en place un accompagnement RH des enseignants-chercheurs à ce sujet : à titre d'exemple, la plateforme HAL est un outil vraiment incontournable pour rendre facilement accessibles nos productions, mais malgré sa relative ergonomie, l'indexation correcte des différentes références demande des compétences qu'il est chronophage de remobiliser « à chaque fois ». Cela s'ajoute à la charge cognitive qui relève de la mémorisation des particularités de fonctionnement de chacune des dizaines/centaines de plateformes qu'un enseignant-chercheur doit utiliser au détour de ses (toujours plus ?) nombreuses missions. Je ne parle pas ici des missions qui relèvent du cœur de métier d'enseignant-chercheur (la valorisation en fait évidemment partie), mais des missions qui relèvent de l'administration de l'enseignement et de la recherche, qui ne relèvent pas de la spécialisation thématique qui fait la spécificité du chercheur (et sa plus-value pour la société). Dans la mesure où cela me semble relever de l'intérêt des institutions que les résultats produits par les chercheurs soient accessibles (et donc, à notre époque, en ligne au maximum), j'apprécie que le laboratoire ESPACE ait mis en place un accompagnement spécifique pour nous épauler dans cette démarche (voire suppléer à nos défaillances/retards). De même, ce paragraphe est l'occasion de souligner le travail fourni par l'ensemble des personnels d'accompagnement à la recherche et qui est évidemment crucial pour mener à bien une activité de recherche. Je tiens cependant à pointer à quel point ce soutien gagnerait à être encore renforcé, tant côté université que CNRS, car il contribue à une plus grande efficacité de nos actions de recherche en permettant aux enseignants-chercheurs de se concentrer sur des activités à réelle valeur ajoutée. De même, le fonctionnement par projet a de nombreux arguments en sa faveur, mais ne remplace pas l'intérêt d'une visibilité pluriannuelle des financements pour mener une recherche fondamentale qui est deviendra la recherche opérationnelle de demain, en tous cas dans notre discipline (cf. section 3.2.5).

²³ <https://www.ccsd.cnrs.fr/principes-fair/> [consulté le 22/07/2024]

3.2.3 Réflexions sur les pratiques de vulgarisation, une approche complémentaire pour (rendre) un public sensible à son environnement

La place du(de la) chercheur(se) au sein de la société a toujours posé question (Kuhn, 1970), et se trouve, il me semble, particulièrement rediscutée actuellement (Nature, 2018²⁴ ; Le Monde, 2024²⁵). Je ne souhaite pas ici débattre de ce que devrait être la place de la réflexion et de l'activité scientifique au sein de la société civile, ni quelle(s) forme(s) cela pourrait prendre. Je souhaite plutôt, parce que cette mission me semble essentielle et intrinsèque à l'élaboration d'une recherche en environnement, souligner ce qui, dans mon activité, relève du transfert de connaissances vers la société civile : « [Les enseignants-chercheurs] contribuent au dialogue entre sciences et sociétés, notamment par la diffusion de la culture et de l'information scientifique et technique »²⁶.

Alors que les effets du dérèglement climatique deviennent plus visibles à l'échelle locale ou mondiale, j'ai pu constater à quel point le besoin de contribuer à une science au service de la société peut pousser certains (enseignants-)chercheurs à réorienter leurs activités de recherche. Tout en ayant conscience de la chance d'avoir « déjà » découvert le domaine de la géographie qui, à mon sens, est une excellente clef d'entrée pour aborder les sciences environnementales dans leur dimension systémique, il n'en reste pas moins que l'exercice qui consiste à aller vers d'autres disciplines (ou d'autres publics), et en particulier des disciplines ou publics qui relèvent des Humanités, peut être un exercice déstabilisant.

En particulier parce que cela suppose de faire intervenir dans sa pratique et sa démarche une sensibilité, une acceptation d'un registre émotionnel qui est usuellement tu, occulté, dans la pratique des sciences plus « dures ». Cette dimension sensible de l'activité de recherche me semble pourtant nourrir la réflexion et ne saurait nuire à l'objectivité scientifique. Je saisis l'occasion pour pointer que cette objectivité scientifique, elle aussi mentionnée dans les statuts évoqués plus hauts, ne doit pas être confondue avec la présumée « neutralité scientifique » qui est souvent mise en avant. Cette dernière est de toutes manières questionnée (Karsz, 2017).

Parmi mes expériences de vulgarisation qui ont inclus quelques conférences « grand public », j'ai eu l'occasion de travailler avec certains acteurs du monde l'art, dans le champ académique ou non (interactions avec l'artiste américain Peter Fend dans le cadre de la préparation de son exposition « La Mer et Marseille » (2020) ; projet Ttepic²⁷ (2021-2024)). L'art vise et touche un public plutôt sensible (du point de vue de la « sensibilité ») que ce soit à son environnement « naturel », ou à son environnement « humain » uniquement. Au même titre que les actions de vulgarisation menées dans le cadre de la recherche, il me semble que l'art espère souvent, lui aussi, toucher des publics autres que celui qu'il touche « habituellement ». En cela, il m'a semblé

²⁴ The best research is produced when researchers and communities work together. (2018). *Nature*, 562(7725), 7. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06855-7> [consulté le 05/08/2024]

²⁵ Belot et al., 2024. https://www.lemonde.fr/sciences/article/2024/01/15/sciences-a-quoi-revent-les-jeunes-chercheurs_6210927_1650684.html [consulté le 05/08/2024]

²⁶ Légifrance, *en ligne*. Décret n°84-431 du 6 juin 1984 fixant les dispositions statutaires communes applicables aux enseignants-chercheurs et portant statut particulier du corps des professeurs des universités et du corps des maîtres de conférences. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000006064492> [dernière mise à jour le 14/03/2022, consulté le 18/07/2024]

²⁷ <https://mshs.univ-cotedazur.fr/recherche/axes-de-recherche/theatre-transition-ecologie-profonde-intelligence-collective-ttepic> [consulté le 18/07/2024]

que m'ouvrir à cette discipline pouvait me donner des clefs pour interagir avec d'autres publics que ceux accrochés par « mes » mots-clefs « gestion de l'eau » ou « gestion de l'environnement ». Et parce qu'il peut constituer une clef d'entrée supplémentaire pour ceux qui sont sensibles à leur environnement (au sens « Nature ») mais qui sont rebutés par les concepts à manier, l'art, dans sa dimension de diffusion, peut constituer un outil complémentaire de médiation et/ou de vulgarisation scientifique. Cette démarche d'ouverture permet aussi de renouveler sa réflexion scientifique dans son domaine de compétences, pour s'écarter du dogme de la productivité scientifique, et en particulier prendre le temps d'une « *slow science* » qui analyse toutes les facettes d'une situation scientifique afin de produire une connaissance qui, parce qu'elle a eu le temps de mûrir, présente une portée plus vaste et plus robuste (dans le temps, dans sa déclinaison sociétale).

3.2.4 L'exploration de nouveaux terrains d'étude et de disciplines connexes

A l'occasion des jurys de thèse auxquels j'ai eu l'occasion de participer, j'ai pu approfondir ma connaissance d'hydrosystèmes qui m'étaient moins familiers (Pyrénées, Garonne, Dordogne, Ain). Les campagnes de terrain HyMeX ont aussi été l'occasion de développer mes compétences en hydrologie de terrain, mais aussi de redécouvrir des territoires de manière plus approfondie (Aude, Cèze/Ardèche), tandis que chaque participation aux excursions des différentes communautés (commission Hydrosystèmes du CNFG, Journées des Jeunes Géomorphologues...) est une occasion de découvrir de manière approfondie de nouveaux cours d'eau, méthodologies et équipes de travail (Ardenne belges, hydrosystèmes (hauts-)savoyards, Ain/Rhône). C'est donc dans le cadre de différentes activités de la recherche que j'ai pu explorer d'autres terrains métropolitains que mes propres terrains d'étude, ce qui nourrit ma connaissance et ma compréhension des systèmes fluviaux à forte énergie dans les différents massifs montagneux français. Après m'être concentrée sur des terrains d'étude presque exclusivement français, malgré des efforts explicites pour adopter une posture européenne via l'intégration de terrains d'étude italiens (Devreux et al., 2022b), j'espère ouvrir mes activités de recherche à d'autres terrains d'étude, mais aussi à des disciplines connexes.

A l'heure de la rédaction de ce manuscrit, des collaborations sont envisagées sur des terrains indiens (IIT Jammu, cf. Chapuis, 2024 ; DST Sikkim). Par ailleurs, mon implication dans le projet SUFUMANG (Usage durable et juste des mangroves, ANR 2024-2027) sera l'occasion d'une part de concrétiser de nombreuses discussions en biogéographie sur les dynamiques de sédiments fins en lien avec les dynamiques de colonisation végétale dans les mangroves (Lombard, 2023) et d'autre part d'explorer de nouveaux terrains (Brésil), ce qui participe d'une culture générale indispensable à la recherche en géographie.

Plus généralement, je suis convaincue qu'une recherche de qualité se fait en réseau : à ce titre, le développement de collaborations me semble essentiel. Cela peut revêtir plusieurs formes, mais cela sera toujours au bénéfice de la recherche. Par exemple dans le cadre d'un doctorat, le co-encadrement me semble à la fois bénéfique pour le doctorant (il a plusieurs référents vers qui se tourner, ce qui lui donne une diversité de points de vue sur lesquels s'appuyer pour prendre ses propres décisions mais aussi d'avoir toujours quelqu'un vers qui se tourner en cas de besoin), mais aussi pour l'équipe encadrante, qui trouve ici une occasion de rencontrer d'autres manières de faire de la recherche, de l'encadrer ou encore de travailler régulièrement sur un sujet d'une discipline proche et donc de monter en compétences/transdisciplinarité. A ce sujet, ma propre expérience en tant que doctorante a été corroborée par ma première expérience d'encadrement de thèse (L. Devreux, soutenue en 2023) : cette dernière a été l'occasion de travailler en étroite collaboration avec B. Belletti et ainsi de monter en compétences en biogéomorphologie fluviale,

mais aussi de bénéficier du recul et de l'appui de D. Fox et de l'ensemble du comité scientifique de thèse de Lise pour un aspect « management de la recherche » ou encore pour des aspects méthodologiques relevant de l'hydroécologie. En termes de perspectives de recherches, je souhaite ainsi **continuer à monter des projets collaboratifs, qui favorisent le dialogue entre les disciplines et le développement d'une vision transversale du fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux.**

En complément des aspects géographiques et collaboratifs évoqués, et au vu des questionnements qui remontent de différentes parts (interlocuteurs académiques ou opérationnels, en Roya ou sur les terrains évoqués ci-avant), j'envisage d'explorer de manière plus approfondie les dynamiques des sédiments fins ou sableux en lien avec les thématiques de gestion de la ressource en eau ou en sols et de dynamiques paysagères/végétales. Ceci est d'ores et déjà amorcé dans le cadre du projet Retro-hydro (PI : L. Vidal, CEREGE) dont je pilote le workpackage « hydrologie et MES ». Par ailleurs la collaboration amorcée avec B. Belletti devrait se poursuivre sur le volet biogéomorphologie, tandis que d'un point de vue développements méthodologiques, je compte poursuivre l'exploration des potentialités du suivi sismique du transport solide : d'une part en contribuant à la calibration d'une instrumentation low-cost développée par F. Perret (plateforme OMEAA²⁸ de Lyon) et O. Navratil (EVS, Univ. Lyon 2) ; et d'autre part en poursuivant le développement d'analyses croisées des chroniques sismiques acquises en Roya entre les disciplines relevant de la géologie, de la géomorphologie fluviale et de l'hydrologie (collaboration M. Chmiel, Géoazur et P. Brigode, Géosciences Rennes, cf. section 2.2.5, mais aussi discussions croisées avec F. Courboulex et J.-P. Ampuero, Géoazur ; F. Gimbert, IGE).

3.2.5 L'instrumentation long terme, ou le caractère opérationnel d'une recherche fondamentale

En parallèle de l'ouverture à un international « plus large » évoquée précédemment, je reste convaincue qu'une recherche de qualité en géographie bénéficie d'un fort ancrage territorial (cf. sous-partie 1.4). J'ai par ailleurs toujours conçu ma recherche en me nourrissant des questionnements opérationnels. A ce titre, je prévois de poursuivre mon engagement sur le territoire de la Région Sud-PACA, et en particulier mon effort d'une documentation long terme du bassin versant de la Roya en termes de flux sédimentaires. Cependant cela me donne l'occasion de questionner cet effort d'instrumentation au regard du rôle du(de la) chercheur(se) au sein du jeu d'acteurs territoriaux. En effet la recherche se doit, lorsqu'elle est à visée opérationnelle, de proposer des solutions à la société ; mais une fois que « la preuve d'applicabilité » est faite, on pourrait imaginer que ce soient les structures de gestion (ici des hydrosystèmes : par exemple l'autorité gemapienne) qui prenne le relais pour le maintien d'une instrumentation long terme du territoire lorsqu'il n'existe pas d'infrastructure de recherche locale de type « observatoire » sur les thématiques concernées.

Je reste convaincue malgré cela que les structures de recherche devraient aussi pouvoir assurer la pérennité des acquisitions de chroniques de données sur le temps long, dans la mesure où cela construit une recherche fondamentale solide. C'est par exemple le cas pour l'antenne

²⁸ <https://umr5600.cnrs.fr/fr/support-technique/observation-et-mesure-des-environnements-actuels-et-anciens/> [consulté le 22/07/2024]

cévenole d'ESPACE, qui assure l'acquisition de données hydrologiques dans le cadre de l'OHM-CV²⁹.

Cependant cela suppose, outre les ressources financières annuelles pour l'entretien du matériel avec une visibilité pluriannuelle qui n'est pas de mise actuellement (exemple : automatisation de l'observatoire météorologique du Mont Aigoual, pourtant en service depuis 1894), des ressources humaines dont un laboratoire de recherche dispose rarement (et ce n'est pas le cas à ESPACE-Nice). Cette limitation en termes de ressources humaines mobilisables pour assurer l'entretien des instruments limite de fait l'ambition d'instrumentation que je pourrais avoir pour développer le suivi des flux sédimentaires en Roya, malgré les défis scientifiques et opérationnels stimulants que cela pourrait représenter.

Je conclus des deux paragraphes précédents que j'ai, pour les prochaines années, d'amples perspectives en termes de recherche et que la variété des directions que je me propose d'explorer confirme mon ancrage dans la discipline de la géographie physique.

3.2.6 La profondeur temporelle des actions de gestion des corridors fluviaux

Plus généralement, je souhaite poursuivre ma démarche systémique et transdisciplinaire de compréhension des processus et des dynamiques au sein des hydrosystèmes dynamiques, à travers un regard géomorphologique et géographique. En effet les regards croisés qu'offre l'approche géographique, via un système emboîté qui travaille à la fois dans une dimension spatiale et temporelle et qui bénéficie de sa position à la confluence des disciplines des sciences environnementales et des Humanités, me semble particulièrement à même de pouvoir contribuer à une meilleure compréhension des trajectoires des bassins versants en contexte de changement (tant climatique que sociétal).

Plus spécifiquement, je reste intéressée par l'idée d'approfondir les relations qui existent entre les différents compartiments de l'hydrosystème : températures et nivologie, hydrologie, stress hydrique et migration des espèces végétales, stabilité des versants et fourniture sédimentaire au chenal, occurrence d'événements intenses et occupation du fond de vallée, mémoire du risque en lien avec un climat évolutif... D'autres pistes de recherche plus spécifiques me semblent également intéressantes à approfondir, comme par exemple l'influence des variations attendues de la température de l'eau ou de la qualité de l'eau sur les espèces aquatiques (poissons, macro-invertébrés) en contexte de changement climatique, ou encore les gestions croisées de la ressource en eau et en sols.

En ce qui concerne plus spécifiquement la restauration des cours d'eau, il me semble indispensable de poursuivre l'effort de documentation long terme des écosystèmes fluviaux, afin d'enrichir notre gestion de ces écosystèmes. Ceci passe notamment d'une part par l'intégration des connaissances relatives au fonctionnement passé de ces systèmes, mais aussi, dans une dimension prospective, par des retours d'expériences menés sur plusieurs années. Les éléments de connaissance dégagés devraient ensuite profiter d'un réel effort de diffusion pour qu'ils bénéficient à l'ensemble de la communauté des « gestionnaires de cours d'eau » qui sont par ailleurs souvent absorbés par la gestion quotidienne de leur territoire : la communauté scientifique doit poursuivre ses efforts de médiation scientifique à destination des gestionnaires, ce pour quoi elle peut s'appuyer sur des structures dynamiques dont il convient ici de souligner

²⁹OHM-CV : Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais, <https://www.ozcar-ri.org/fr/observatoire-ohm-cv/>

le rôle crucial d'interface entre les différents acteurs de la communauté travaillant sur les cours d'eau (ZABR, RRGMA, MRE, ARRA...).

4 Conclusions

Je tiens à souligner en premier lieu l'intérêt de l'approche géographique pour étudier les flux hydro-sédimentaires, qui permettent d'analyser de manière croisée les fluctuations des hydrosystèmes et certaines modalités d'occupation de l'espace (que ce soit par la biocénose ou la société humaine). Plus généralement, ce manuscrit relève en partie d'une « profession de foi » qui tente de **mettre en valeur ce que je considère comme important dans la recherche en géographie à l'heure actuelle, tant d'un point de vue thématique que d'un point de vue épistémologique.**

J'ai jugé qu'il ne s'agissait pas ici de viser à l'exhaustivité (ce qui est chronophage aussi pour les lecteurs), mais plutôt à la synthèse : à ce titre, j'ai choisi un format de manuscrit orienté vers la concision qui souligne plutôt ma vision de la discipline (de la géomorphologie fluviale, de la géographie). Par ailleurs, j'ai choisi dans ce volume de ne pas orienter ma rédaction selon une grille de lecture qui mettrait particulièrement en relief la double activité de l'enseignant-chercheur, mais plutôt de pointer ce qui, dans mon activité de recherche, pourrait (je l'espère) contribuer à la connaissance des hydrosystèmes fluviaux à forte énergie et à leur gestion long terme.

Cependant, je tiens à souligner à quel point ces deux activités, enseignement et recherche, se nourrissent l'une de l'autre dans ma pratique. B. Belletti (UMR 5600 EVS) me disait au détour d'une conversation à quel point, selon elle, **ma recherche nourrissait mon enseignement**, en cela que je m'applique, effectivement, à illustrer le plus possible mes interventions grâce à mes activités de recherche : d'une part cela permet aux étudiants d'ancrer des connaissances théoriques dans des contextes appliqués et géographiquement explicites, et d'autre part de relier outils, construction des connaissances et complexité des phénomènes. Enfin cela leur permet de se familiariser avec ce que peut être une activité de recherche. Je tiens également à souligner **à quel point l'enseignement nourrit la recherche** : c'est notamment via la base théorique que j'ai dû renforcer pour construire mes interventions en géomorphologie structurale que j'ai pu acquérir une bonne partie des connaissances qu'il me semblait être nécessaires pour me « sentir géographe », à savoir une culture générale et pluridisciplinaire sur l'histoire des paysages de mes terrains d'étude. L'enseignement est aussi une occasion renouvelée pour le chercheur de pratiquer une action de médiation scientifique, et à ce titre de renforcer ses compétences pédagogiques en termes de transmission des connaissances. D'un point de vue pratique, il me semble pouvoir encore améliorer ma manière de m'appuyer sur l'enseignement pour nourrir ma recherche, notamment via l'élaboration de projets dans le cadre de mes cours, qui pourraient m'aider à faire avancer certains aspects d'un projet de recherche. J'avais par exemple encouragé ma doctorante L. Devreux à explorer cette piste lors de ses vacances d'enseignements, ce qui lui a permis d'avancer sur la constitution et l'analyse d'une base de données SIG d'un volet de sa recherche. Pour ma part, je perçois tellement les cours comme une occasion de *donner* aux étudiants que j'ai encore du mal à saisir cette opportunité de faire « d'une pierre deux coups ».

Le paragraphe précédent m'a donné l'occasion d'évoquer le fait de se « sentir géographe ». Pour une personne qui n'a pas eu une formation initiale en géographie, le chemin n'a rien de simple vue l'ampleur de la tâche ! J'ai découvert **dans la géographie une excellente clef de lecture du monde grâce au concept d'emboîtement des échelles spatio-temporelles** : cette « révélation » est vraiment structurante dans ma pratique d'enseignant-chercheur. Mais dans la mesure où la géographie est une discipline vaste, elle souligne toujours ce qui nous manque en

termes de connaissances (pour paraphraser les propos de Socrate rapportés par Platon : « je sais (un peu) tout ce que je ne sais pas ! »).

Pour conclure, puisque depuis ma prise de poste en 2015 :

- Je décide seule de mes priorités de recherche, en lien direct avec les questionnements de mes différentes communautés scientifiques
- Je contribue au développement des connaissances en géomorphologie fluviale (suivi des flux sédimentaires, gestion et restauration des hydrosystèmes) et plus généralement en géographie (interactions climat-société, approche systémique du continuum terre-mer)
- Ma capacité à me saisir de questions innovantes et pertinentes est attestée par les retours des différentes commissions de chercheurs et gestionnaires auxquelles je sou mets mes projets dans le cadre de demandes de financements
- Mes axes de recherche sont financés par des projets dont j'ai le plus souvent assuré le montage, la recherche de financement et la gestion financière en lien avec nos gestionnaires administratives
- Les projets que j'ai pilotés s'inscrivent pleinement dans une dynamique collective, en cela que les directions ébauchées par ma recherche réussissent, parfois, à inspirer d'autres chercheurs (ZABR, Cévennes...), ce qui démontre mon apport original à la discipline de la géomorphologie fluviale et plus généralement à la géographie
- J'ai assuré la (co-)direction d'une thèse menée à son terme, ainsi que la direction de 13 stages de niveau Master, dans le domaine général de la géographie
- Je peux attester d'une production scientifique régulière et de niveau international, tant sous forme de publications écrites que de communications orales
- Je peux attester d'une vision programmatique de ma recherche à moyen et long terme

Je pense avoir démontré ma capacité à diriger des recherches, et sollicite donc l'autorisation de soutenir mon Habilitation à Diriger les Recherches en géographie devant un jury compétent.

Références bibliographiques

- Amoros C., Petts G.E., 1993. *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson, 300 p.
- Anthony E.J., Julian M., 1999. Source-to-sink sediment transfers, environmental engineering and hazard mitigation in the steep Var River catchment, French Riviera, southeastern France. *Geomorphology*, 31 (1–4), 337–354, [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00088-4)
- Arnaud F., Piégay H., Vaudor L., Bultingaire L., Fantino G., 2015. Technical specifications of low-frequency radio identification bedload tracking from field experiments: differences in antennas, tags and operators. *Geomorphology*, 238, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.029>
- Arnaud F., Paquier A., Vázquez-Tarrío D., Camenen B., Le Coz J., Michel K., Naudet G., Pella H., Piégay H., 2023. Comparing field, probabilistic, and 2D numerical approaches to assess gravel mobility in a gravel-bed river. *Water Resources Research*, 59, e2022WR034127. <https://doi.org/10.1029/2022WR034127>
- Bakker M., Gimbert F., Geay T., Misset C., Zanker S., Recking, A., 2020. Field application and validation of a seismic bedload transport model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, e2019JF005416. <https://doi.org/10.1029/2019JF005416>
- Ballantyne C. K., 2002. Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews*, 21, 1935–2017. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00005-7)
- Battiau-Queney Y., 2002. La géomorphologie des origines à nos jours : une science jeune arrivée à maturité (Geomorphology from the origin to the present time). In: Bulletin de l'Association de géographes français, 79^e année, 2002-1 (mars). *Géomorphologie et géographie aujourd'hui. Eau et territoire*, sous la direction de Y. Battiau-Queney, I. Roussel et R. Laganier., 4-14. <https://doi.org/10.3406/bagf.2002.2250>
- Belletti B., 2012. Analyse régionale de la structure et de la dynamique biogéomorphologiques des rivières en tresses du bassin du Rhône. Thèse de doctorat, Université Jean Moulin – Lyon III, 246 p. <https://theses.fr/2012LYO30099>
- Belletti B., Dufour S., Piégay H., 2015. What is the relative effect of space and time to explain the braided river width and island patterns at a regional scale? *River Res. Applic.*, 31, 1–15. <https://doi.org/10.1002/rra.2714>
- Belletti B., Rinaldi M., Bussettini M., Comiti F., Gurnell A. M. , Mao L., Nardi L., Vezza P., 2017. Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units. *Geomorphology*, 283, 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.032>
- Belot L., Barthélémy P., Brafman N., Cabut S., Herzberg N., Jacquin J.-B., Larousserie D., Morin H., Rosier F., Santi P., 2024. Sciences : à quoi rêvent les jeunes chercheurs ? *Le Monde*, 15 jan. 2024. https://www.lemonde.fr/sciences/article/2024/01/15/sciences-a-quoi-revent-les-jeunes-chercheurs_6210927_1650684.html [consulté le 05/08/2024]
- Berger J.-F., Carozza J.-M., Castanet C., Cubizolle H., Dendievel A.-M., Deschodt L., Franc O., Ghilardi M., Lespez L., Salvador P.-G., Sivan O., Vannièrre B., Argant J., Boulen M., Brochier J.-L., Carozza L., Germain-Vallée C., Lemer L., 2018. Climat et environnements : les étapes de la première anthropisation de l'espace (6000-2000 BCE) en France. J. Guilaine et D. Garcia (Dir.), traduction K. Mazurié. *La Protohistoire de la France*, 18, Editions Hermann, p. 311-324, Histoire et Archéologie, 978-2705695941. <https://hal.science/hal-02095802>
- Berger E., 2024. *Etude de la relation entre mesures sismiques par géophone et mesure du débit du fleuve de la Roya*. Rapport de stage, Université Côte d'Azur, 17 p.
- Bergeret A., George-Marcelpoil E., Delannoy J.-J., Piazza-Morel D., 2015. L'outil-frise : une expérimentation interdisciplinaire : Comment représenter des processus de changements en territoires de montagne ? *les Carnets du Labex ITEM*, <https://hal.science/hal-01230027>

- Berkes F., Colding J., Folke C. (éds.), 2002. *Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*. Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541957>
- Bernard, 1925. *Cours de restauration des montagnes*. Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Nancy. In Meunier M., 2023. *Eléments d'hydraulique torrentielle*. Editions Quaé (open e-book). <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3731-9>
- Bernard, 1927. *Cours de restauration des montagnes*. Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Nancy. In Meunier M., 1989. Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle. *La Houille Blanche*, 75(5), 361–376. <https://doi.org/10.1051/lhb/1989040>
- Berthet J., 2016. L'évolution géomorphologique des systèmes torrentiels proglaciaires de la vallée de Chamonix-Mont-Blanc, une approche du couplage sédimentaire de la fin du Petit Age Glaciaire au désenglacement récent. Thèse de doctorat, *Université Grenoble Alpes*, 303 p., <https://theses.hal.science/tel-01412350>
- Besson L., 2005. *Les risques naturels, de la connaissance pratique à la gestion administrative*. Collection Dossier d'experts, Techni.Cités, Voiron, 610 p.
- Blanchard R., 1949. *Les Alpes occidentales. Tome 5, vol. 1, Les Grandes Alpes françaises du Sud*. Arthaud : Grenoble (Isère), 514 p. [pl.]; cartes, fig.
- Blanchet S., 2022. *Impacts de la tempête Alex sur la diversité et la structuration génétique des populations de truites fario (Salmo trutta) du bassin de la Roya (06)*. Rapport technique, EDF & CNRS, 22 p.
- Boillat S., Burga C. A., Gigon A., Backhaus N., 2004. La succession végétale sur les cultures en terrasses de la Vallée de la Roya (Alpes-Maritimes, France) et sa perception par la population locale. *Geographica Helvetica*, 59, 154-167, <https://www.geogr-helv.net/59/154/2004/gh-59-154-2004.pdf>
- Boucher O., Dufresne J.-L., Vial J., Brun E., Cattiaux J., Chauvin F., Salas y Mélia D., Voltaire A., Bopp L., Braconnot P., Ciais P., Yiou P., Guilyardi E., Mignot J., Guivarch C., 2015. Projection des changements climatiques futurs. *La Météorologie*, n°88, 56–68. https://lameteorologie.fr/issues/2015/88/meteo_2015_88_56
- Bravard J.-P., Petit F., 1997. *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial*. Armand Colin, 221 pp., ISBN 978-2-200-01780-4
- Bravard J.-P., Piégay H., 2000. L'interface Nature - Sociétés dans les hydrosystèmes fluviaux / *The interface between fluvial hydrosystems and societies*. In *Géocarrefour*, vol. 75, n°4. L'interface nature-sociétés dans les hydrosystèmes fluviaux. pp. 273–274. www.persee.fr/doc/geoca_1627-4873_2000_num_75_4_2478
- Brenna A., Surian N., 2023. Coarse sediment mobility and fluxes in wide mountain streams: insights using the virtual velocity approach. *Geomorphology*, 2023, 427, 108625. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108625>
- Breteau I., 2018. *Etude de mobilité sédimentaire dans la Roya : suivi RFID*. Rapport de stage, Polytech Sorbonne.
- BRGM, 2020. Réalisation d'un modèle hydrogéologique de la nappe alluviale de la Roya tenant compte des échanges nappe-rivière. Congrès final du projet Concert-Eaux, [en ligne], 11 déc. 2020. <https://youtu.be/mU960oxPAQg>
- Brigode P., Vigoureux S., Delestre O., Nicolle P., Payrastré O., Dreyfus R., Nomis S., Salvan L., l'équipe « post-event surveys » d'HyMeX, 2021. Inondations sur la Côte d'Azur : bilan hydro-météorologique des épisodes de 2015 et 2019. *LHB*, 107:1, 1-14, <https://doi.org/10.1080/27678490.2021.1976600>
- Brousse G., Liébault F., Arnaud-Fassetta G., Breilh B., Tacon S., 2021. Gravel replenishment and active-channel widening for braided-river restoration: The case of the Upper Drac River (France). *Science of The Total Environment*, 766, 142517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142517>
- Calvet M., 2006. Accidents aléatoires ou crises morphogéniques : l'interprétation risquée des dynamiques fluvio-torrentielles holocènes et historiques en Méditerranée. In P. Allée & L.

- Lespez (dir.), *L'Érosion entre Société, Climat et Paléoenvironnement*. Table ronde en l'honneur du Prof. R. Neboit-Guilhot (Clermont-Ferrand, 25-27 mars 2004), Presses Universitaires Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand, pp. 401–406.
- Carcaud N., Arnaud-Fassetta G., Evain C., 2019. *Villes et rivières de France*, Paris CNRS Éditions, 296 pages. <https://www.cnrseditions.fr/catalogue/geographie-territoires/villes-et-rivieres-de-france>
- Carrega P., Michelot N., 2021. Une catastrophe hors norme d'origine météorologique le 2 octobre 2020 dans les montagnes des Alpes-Maritimes, *Physio-Géo*, 16, pp. 1–70. <https://journals.openedition.org/physio-geo/12370>
- CEREMA, 2021. *RETEX technique ALEX. Inondations des 2 et 3 octobre 2020. Expertise hydrologique*. Rapport d'étape (54 p.) et Consensus hydrologique (58 p.).
- Chapuis M., 2019a. The Durance. In Muhar S., Muhar A., Siegrist D., Egger G. (éds.), *Rivers of the Alps: Diversity in Nature and Culture*, Haupt, ISBN 978-3-258-08117-5, pp. 380-384. <https://hal.science/hal-02959659>
- Chapuis M., 2019b. The Var. In Muhar S., Muhar A., Siegrist D., Egger G. (éds.), *Rivers of the Alps: Diversity in Nature and Culture*, Haupt, ISBN 978-3-258-08117-5, pp. 490-491. <https://hal.science/hal-02959658>
- Chapuis M., 2019c. The Verdon. In Muhar S., Muhar A., Siegrist D., Egger G. (éds.), *Rivers of the Alps: Diversity in Nature and Culture*, Haupt, ISBN 978-3-258-08117-5, pp. 492-493. <https://hal.science/hal-02959660>
- Chapuis M., 2020. Transport sédimentaire – mesure du transport sédimentaire en Roya. *Congrès final du projet européen Interreg Alcotra Concert-Eaux*, 11 déc. 2020, [en ligne], https://youtu.be/jTr-2_LamPI
- Chapuis M., 2024. River corridors facing change in alpine and mediterranean climate: anthropogenic pressures vs. extreme events vs. climate change, a coupled geomorphic and ecologic point of view. *State of the Art Techniques in River Corridor Research and Management: An Indo French Perspective*, New Delhi, Inde, Juil. 2024. <https://hal.science/hal-04649076>
- Chapuis M., *submit*. Coupled hydro- and sediment fluxes, a proxy for the interactions between climate and society at catchment scale? *Revue Méditerranée* (in French).
- Chapuis M., Collomb D., 2012. La cicatrization des rivières méditerranéennes françaises après les grandes perturbations de la deuxième moitié du XX^e siècle : réponses des systèmes fluviaux et stratégies de gestion. Exemples de la Durance, du Var, de la Cèze. *Méditerranée*, 118(1), pp. 65-74, <https://doi.org/10.4000/mediterranee.6276>
- Chapuis M., Bright C.J., Hufnagel J., MacVicar B., 2014. Detection ranges and uncertainty of passive Radio Frequency Identification (RFID) transponders for sediment tracking in gravel rivers and coastal environments, *Earth Surf. Process. Landforms*, 39, 2109–2120. <https://doi.org/10.1002/esp.3620>
- Chapuis M., Cilici G., Maussin M., 2015. Environments continuities and flood risk mitigation at catchment scale: which management scales and which level of achievement are suitable according to the purpose of the project? *IS Rivers 2015 Conference*, juil. 2015, Lyon, France. <https://hal.science/hal-01285834>
- Chapuis M., Martins M., Tourade F., Adnès C., Vignal M., Lebourg T., Fox D., 2019a. Évolution des flux sédimentaires des frayères dans un torrent alpin. *Rencontres SHF – Changement global et morphodynamique des rivières, des bassins versants à la mer*, nov. 2019, Paris, France. <https://hal.science/hal-02960437>
- Chapuis M., Purdue L., Giusti C., 2019b. Le Paillon. In Carcaud N., Arnaud-Fassetta G., Evain C. (éds.), *Villes et rivières de France*, CNRS Éditions, 166–173. <https://hal.science/hal-02118364>
- Chapuis M., Martins M., Adnès C., Devreux L., Lebourg T., 2022a. Suivi des flux sédimentaires grossiers en contexte torrentiel méditerranéen. *Colloque TSMR – CFBR « Transport*

- sédimentaire : rivières & barrages réservoirs », mars 2022, Saclay, France. <https://hal.science/hal-02959661>
- Chapuis M., Martins M., Adnès C., Tissot L., Martin N., Salvan L., Dreyfus R., Compagnon F., Douvinet J., Brigode P., Fox D., 2022b. Catchments' reactions to the Oct. 2nd 2020 heavy rainfall in the Maritime Alps (France): sediment transport measurements, sediment connectivity model in the Roya river and reconstruction guidelines. *IS Rivers 2022 Conference*, juil. 2022, Lyon, France. <https://hal.science/hal-03855452>
- Chapuis M., Adnès C., 2023. Pluri-annual bedload monitoring in a Mediterranean mountain stream prior and after a ~200-year flood. *Gravel-Bed Rivers 9 conference (GBR9)*, janv. 2023, Villarrica, Chile. <https://hal.science/hal-03975995>
- Chapuis M., Ayrat P.-A., Cerceau J., Dubus N., Josselin D., Le Bouteiller C., Legout C., 2023. *Projet DHySed-7 – Identification des spécificités des dynamiques hydro-sédimentaires dans les Cévennes – Rapport d'activités 2021–2023*. Rapport technique + annexes. <https://hal.science/hal-04360856>
- Chapuis M., Adnès C., 2024. Transferts sédimentaires dans un bassin versant à régime montagnard sous influence méditerranéenne (Roya, Alpes-Maritimes, France): modélisation conceptuelle en contexte de changement climatique. *VIII^e Colloque de l'Association Francophone de Géographie Physique (AFGP)*, janv. 2024, Avignon, France. <https://hal.science/hal-04509906>
- Chmiel M., Godano M., Piantini M., Brigode P., Gimbert F., Bakker M., Courboux F., Ampuero J.-P., Rivet D., Sladen A., Ambrois D., Chapuis M., 2022. Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with Storm Alex. *Natural Hazards Earth System Science*, 22, 1541–1558, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1541-2022>
- Cholley A., 1950. Morphologie structurale et morphologie climatique, *Ann. Géogr.*, 59, pp. 321–335.
- Corenblit D., Tabacchi E., Steiger J., Gurnell A. M., 2007. Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. *Earth-Science Reviews*, 84, 56-86. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.05.004>
- Cossart E., 2014. Des sources sédimentaires à l'exutoire : un problème de connectivité ? Réflexions sur le fonctionnement géomorphologique des bassins versants montagnards. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Blaise Pascal – Clermont 2, 209 p., <https://theses.hal.science/tel-01097298>
- Cossart E., 2018. Le changement global : un champ scientifique fécond pour le géographe. *Géoconfluences*, oct. 2018, <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-thematiques/changement-global/articles-scientifiques/changement-global> [consulté le 19/10/2023]
- Courboux F., Mercerat E. D., Deschamps A., Migeon S., Baques M., et al., 2020. Strong site effect revealed by a new broadband seismometer on the continental shelf offshore Nice airport (Southeastern France). *Pure and Applied Geophysics*, 177 (7), pp.3205-3224, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02408-9>
- Crozat D., Dresch J., George P., Pinchemel P., Rozenblat C., Volle J.-P., s.d. GÉOGRAPHIE [en ligne]. In *Encyclopædia Universalis* [s.d., en ligne]. <https://www.universalis-edu.com/encyclopedie/geographie/6-geographie-systemique> [consulté le 19/10/2023].
- Datry T., Boulton A. J., Fritz K., Stubbington R., Cid N., Crabot J., Tockner K., 2023. Non-perennial segments in river networks. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 4, pp. 815–830. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00495-w>
- de Saint Seine, J., 1995. *Monographie hydrologique et hydraulique du Paillon de Nice en vue de la gestion du risque inondation*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 226 p.

- Deng J., Camenen B., Legout C., Nord G., 2024. Estimation of fine sediment stocks in gravel bed rivers including the sand fraction. *Sedimentology*, 71: 152-172. <https://doi.org/10.1111/sed.13132>
- Devreux L., 2023. *Outils d'évaluation de l'état de santé des hydrosystèmes en tresses restaurés*. Thèse de doctorat, Université Côte d'Azur, 401 p., <https://theses.hal.science/tel-04152884>
- Devreux L., Chapuis M., Belletti B., 2022a. Evolution du tressage suite à des opérations de restauration sur des rivières en tresses. *Colloque TSMR – CFBR « Transport sédimentaire : rivières & barrages réservoirs »*, mars 2022, Saclay, France. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108404>
- Devreux L., Chapuis M., Belletti B., 2022b. Hydromorphological analysis on restored Alpine braided rivers. *Geomorphology*, 415, pp. 108404. <https://hal.science/hal-03794714>
- Devreux L., Belletti B., Chapuis M., 2023. Tools to assess the health status of restored braided hydrosystems. *Scientific Advances in River Restoration Conference*, 06–08 Sept. 2023, Liverpool, UK. p. 47, https://www.therrc.co.uk/sites/default/files/files/SARR/sarr_programme_abstracts_vsn_2_2.pdf
- Devreux L., Belletti B., Marmonier P., Dolédec S., Chapuis M., *submit*. Restoring braided rivers: the need to account for geomorphological heterogeneity. *River Research and Applications*.
- Dib M.-O., 2024. *Détection de la signature sismique des crues de la rivière Vésubie*. Rapport de stage, Université Côte d'Azur, 45 p.
- Dufour S., Piégay H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River Res. Applic.*, 25: 568-581. <https://doi.org/10.1002/rra.1239>
- Dufour S., Rollet A.-J., Chapuis M., Provansal M., Capanni R., 2017. On the political roles of freshwater science in studying dam and weir removal policies: A critical physical geography approach. *Water Alternatives* 10(3): 853-869, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01614436>
- Dufour S., Lespez L., 2020. *Géographie de l'environnement: La nature au temps de l'anthropocène*. Armand Colin. <https://doi.org/10.3917/arco.dufou.2020.01>
- Ellis E. C., Ramankutty N., 2008. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 6, pp. 439-447. <https://doi.org/10.1890/070062>
- Friberg N., Buijse T., Carter C., Hering D., Spears B. M., Verdonschot P., Moe T. F., 2017. Effective restoration of aquatic ecosystems: scaling the barriers. *WIREs Water*, 4: e1190. <https://doi.org/10.1002/wat2.1190>
- Fryirs K. A., Brierley G. J., Preston N. J., Kasai M., 2007. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena*, 70(1), 49-67. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.07.007>
- Fryirs K. A., Brierley G. J., 2013. *Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape*. Wiley-Blackwell, ISBN 978-1-405-19275-0, 345 p.
- Gariépy-Girouard E., Buffin-Bélanger T., Biron P., 2024. Societal drivers for the integration of hydrogeomorphology and human benefits in river restoration projects. *River Research and Applications*, online early view. <https://doi.org/10.1002/rra.4304>
- Gautier E., Corbonnois J., Petit F., Arnaud-Fassetta G., Brunstein D., Grivel S., Houbrechts G., Beck T., 2009. Multi-disciplinary approach for sediment dynamics study of active floodplains. *Géomorphologie – Relief Processus Environnement*, 1, 65-78. <http://geomorphologie.revues.org/7506>
- Genevier M., Ibba M., 2020. Chute anormale du niveau de la nappe de la Roya au droit du champ captant de Porra et aux alentours. Rapport BRGM/RP-70354-FR, 37 p.
- Géoconfluences, 2023. Nexus. <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/nexus> [consulté le 19/02/2024]

- GREC-PACA, 2017. *Les ressources en eau et le changement climatique en Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Les cahiers du GREC-PACA, édités par l'Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR), juil. 2017, 52 p., ISBN : 9782956006053. <http://www.grec-sud.fr/publications/les-ressources-en-eau-et-le-changement-climatique-en-provence-alpes-cote-dazur/#art-346>
- Gregory K.J., Gurnell A.M., 1988. Vegetation and river channel form and process. In *Biogeomorphology*, H.A. Viles (ed.). Blackwell: Oxford; 11–42.
- Guillon H., Mugnier J.-L., Buoncristiani J.-F., 2017. Proglacial sediment dynamics from daily to seasonal scales in a glaciated Alpine catchment (Bossons glacier, Mont Blanc massif, France). *Earth Surf. Process. Landforms*, 43: 1478–1495. <https://doi.org/10.1002/esp.4333>
- Gurnell A. M., Bertoldi W., 2024. Plants and river morphodynamics: The emergence of fluvial biogeomorphology. *River Research and Applications*, 40(6), 887–942. <https://doi.org/10.1002/rra.4271>
- Habersack H., Piégay H., Rinaldi M., 2007. *Gravel Bed Rivers VI: from process understanding to river restoration*. Elsevier, Developments in Earth Surface Processes, vol. 11, 815 p., ISBN : 0-444-52861-X.
- Hassan M. A., Church M., Ashworth P. J., 1992. Virtual rate and mean distance of travel of individual clasts in gravel-bed channels. *Earth Surf. Process. Landforms*, 17: 617–627. <https://doi.org/10.1002/esp.3290170607>
- IPCC, 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf> [en ligne, consulté le 17/07/2024]
- Jia G., Shevliakova E., Artaxo P., De Noblet-Ducoudré N., Houghton R., House J., Kitajima K., Lennard C., Popp A., Sirin A., Sukumar R., Verchot L., 2019. Land–climate interactions. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.004>
- Julian M., 1977. Une carte géomorphologique des Alpes Maritimes franco-italiennes au 1/200 000^e en couleurs. Présentation succincte. *Méditerranée*, deuxième série, tome 28, 1-1977. pp. 45–53. <https://doi.org/10.3406/medit.1977.1709>
- Kappes H., Sundermann A., Haase P., 2010. High spatial variability biases the space-for-time approach in environmental monitoring. *Ecological Indicators*, 10, 1202–1205. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.03.012>
- Karsz S., 2017. 8. Objectivité indispensable, neutralité impossible. In S. Karsz, *Affaires sociales, questions intimes* (pp. 233–292). Paris: Dunod.
- Kemp P., Sear D., Collins A., Naden P., Jones I., 2011. The impacts of fine sediment on riverine fish. *Hydrol. Process.*, 25: 1800–1821. <https://doi.org/10.1002/hyp.7940>
- Kondolf G.M., Podolak K., Grantham T.E., 2013. Restoring mediterranean-climate rivers. *Hydrobiologia*, 719, 527–545. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1363-y>
- Kuhn T.S., 1970. *La structure des révolutions scientifiques*. Champs Sciences, réédition 2008, trad. L. Meyer.
- Lake P.S., 2013. Resistance, resilience and restoration. *Ecol. Manag. Restor.*, 14, 20–24. <https://doi.org/10.1111/emr.12016>

- Lamarre H., MacVicar B., Roy A.G., 2005. Using passive integrated transponder (PIT) tags to investigate sediment transport in gravel-bed rivers. *Journal of Sedimentary Research*, 75, 736-741. <https://doi.org/10.2110/jsr.2005.059>
- Lanini S., 2020. Présentation des études sur la nappe alluviale du fleuve Roya, réalisées par le BRGM - Bureau Recherche Géologiques et Minières dans le cadre du projet Interreg Alcotra "Concert-Eaux". *Congrès final du projet Concert-Eaux*, 11 déc. 2020, [en ligne]. Résumé de l'intervention: <https://youtu.be/mU960oxPAQg> [consulté le 01/08/2024]
- Lavabre J., Andréassian V., avec la collab. d'O. Laroussinie, 2000. *Eaux et forêts – La forêt. Un outil de gestion des eaux ?* Cemagref Éditions, collection Écosystèmes forestiers, n°1, 116 p. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1098282p#>
- Le Robert, en ligne. Proxy. Dictionnaire le Robert, <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/proxy> [consulté le 05/08/2024]
- Le Vot T., Cohen M., Nowak M., Passy P., Sumera F., 2024. Resilience of terraced landscapes to human and natural impacts: a GIS-based reconstruction of land use evolution in a Mediterranean mountain valley. *Land*, 13(5), 592. <https://doi.org/10.3390/land13050592>
- Lejeune S., 2016. *Etude préliminaire du transport sédimentaire de la Roya – Rapport final : étude des flux sédimentaires du bassin versant de la Roya, dans l'optique d'une meilleure compréhension de la dynamique des frayères*. Master thesis, Université Nice-Sophia Antipolis, 81 p.
- Liébault F., 2003. *Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massif du Diois et de Baronnies)*. Thèse de doctorat, Université Lyon 2, 375 p. http://theses.univ-lyon2.fr/documents/lyon2/2003/liebault_f
- Liébault F., Peteuil C., Remaître A., 2010. *Approches géomorphologiques de la production sédimentaire des torrents*. Sciences Eaux & Territoires, IRSTEA, 128-135. doi: 10.14758/SET-REVUE.2010.2.15, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00537554>
- Liébault F., Bellot H., Chapuis M., Klotz S., Deschâtres M., 2012. Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 385-399. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.2245>
- Liébault F., Lallias-Tacon S., Cassel M., Talaska, N., 2013. Long profile responses of alpine braided rivers in SE France. *River Res. Appl.*, 29, pp. 1253–1266. <https://doi.org/10.1002/rra.2615>
- Liébault F., Piégay H., Cassel M., Arnaud F., 2023. Bedload tracing with RFID tags in gravel-bed rivers: Review and meta-analysis after 20 years of field and laboratory experiments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(1), 147–169. <https://doi.org/10.1002/esp.5704>
- Liébault F., Melun G., Piton G., Chapuis M., Passy P., Tacon S., 2024. Channel change during catastrophic flood: example of the storm Alex in the Vesubie and Roya valleys. *Geomorphology*, 446, pp. 109008. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109008>
- Liu J., Dietz T., Carpenter S. R., Alberti M., Folke C., Moran E., Pell A. N., Deadman P., Kratz T., Lubchenco J., Ostrom E., Ouyang Z., Provencher W., Redman C. L., Schneider S. H., Taylor W. W., 2007. Complexity of Coupled Human and Natural Systems, *Science*, American Association for the Advancement of Science, 317, 1513-1516. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1144004>
- MacVicar B.J., Papangelakis E., 2022. Lost and found: Maximizing the information from a series of bedload tracer surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(2), 399–408. <https://doi.org/10.1002/esp.5255>
- Maisch M., Burga C.A., Fitze P., 1993. *Lebendiges Gletschervorfeld-Begleitbuch zum Gletscherlehrpfad Morteratsch*. Zürich. In *Géomorphologie de la montagne froide – Géomorphologie glaciaire / 4.6 Le Petit Age Glaciaire et le réchauffement récent du climat* [en ligne, consulté le 17/01/2024]. <https://geomorphologie-montagne.ch/le-petit-age-glaciaire-et-le-rechauffement-recent-du-climat/>
- Maison Régionale de l'Eau, 2018. La Roya. <https://aquateque.maisonregionaledeleau.org/wp-content/uploads/2020/07/Roya-2018-BD.pdf> [consulté le 05/08/2024]

- Marcarini A., 2016. *Le chemin de fer des merveilles – En train et à pied dans la vallée de la Roya entre l'Italie et la France*. Ed. Rossolis, ISBN : 2940365822, 200 p.
- Marteau B., Michel K., Piégay H., 2022. Can gravel augmentation restore thermal functions in gravel-bed rivers? A need to assess success within a trajectory-based before–after control–impact framework. *Hydrological Processes*, 36(2), e14480. <https://doi.org/10.1002/hyp.14480>
- Martin C., 2006. *Espaces en terrasses et prévention de risques naturels en Cévennes*. Rapport technique, UMR 6012 ESPACE, 32 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00325050>
- Martin N., 2020. Cartographies climatiques à 25 m des températures et des précipitations dans la vallée de la Roya. *Congrès final du projet Concert-Eaux, [en ligne]*, 11 déc. 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=tFC-xgCO3TE>
- Martins M., 2018. *Caractérisation des particules : constitution d'une base de données destinée à l'étude du transport solide - Méthodes et analyses de résultats*. Rapport de stage, Université Nice-Sophia Antipolis, 53 p.
- Martins M., 2019. *Etude du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant de la Roya*. Rapport de stage, Université Nice-Sophia Antipolis, 102 p.
- Martins M., 2021. *Etude des dynamiques sédimentaires du bassin versant de la Roya*. Master thesis, Université Côte d'Azur, 58 p.
- Marquis G.A., Roy A.G., 2012. Using multiple bed load measurements: toward the identification of bed dilation and contraction in gravel-bed rivers. *Journal of Geophysical Research – Earth Surface*, 117, F01014. <https://doi.org/10.1029/2011JF002120>
- Masteller C.C., Finnegan N.J., Turowski J.M., Yager E.M., Rickenmann, D., 2019. History-dependent threshold for motion revealed by continuous bedload transport measurements in a steep mountain stream. *Geophysical Research Letters*, 46, 2583–2591. <https://doi.org/10.1029/2018GL081325>
- Médail F., Quézel P., 1999. Biodiversity hotspots in the Mediterranean basin: setting global conservation priorities, *Conservation Biology*, 13(6), 1510-1513. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.98467.x>
- Médail F., Diadema K., 2006. Biodiversité végétale méditerranéenne et anthropisation : approches macro et micro-régionales, *Annales de géographie*, 651(5), 618-640. <https://doi.org/10.3917/ag.651.0618>
- Météo France, 2023. Qu'est-ce qu'un épisode méditerranéen ?, article du 28/08/2023 [en ligne, consulté le 11/01/2024], <https://meteofrance.com/comprendre-la-meteo/precipitations/quest-ce-quun-episode-mediterraneen>
- Météo France, s.d.(a). 19 septembre 2020 – Pluies diluviennes sur les Cévennes [en ligne, consulté le 17/01/2024], <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Pluies-diluviennes-sur-les-Cevennes.html>
- Météo France, s.d.(b). 9 août 2018 – Violents orages sur le Sud-Est [en ligne, consulté le 17/01/2024], <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Violents-orages-sur-le-Sud-Est-13788.html>
- Meunier M., 1989. Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle. *La Houille Blanche*, Taylor & Francis, 75, 361-376. <https://doi.org/10.1051/lhb/1989040>
- Meunier M., 2023. *Éléments d'hydraulique torrentielle*. Editions Quaé (open e-book). <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3731-9>
- Misset C., Recking A., Legout C., Bakker M., Bodereau N., Borgniet L., Cassel M., Geay T., Gimbert F., Navratil O., Piégay H., Valsangkar N., Cazilhac M., Poirel A., Zanker S., 2020. Combining multi-physical measurements to quantify bedload transport and morphodynamics interactions in an Alpine braiding river reach. *Geomorphology*, 351, 106877. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106877>
- Morelli D., Locatelli M., Corradi N., Cianfarra P., Crispini L., Federico L., Migeon S., 2022. Morpho-structural setting of the Ligurian Sea: the role of structural heritage and neotectonic

- inversion. *Journal of Marine Science and Engineering*. 10(9):1176. <https://doi.org/10.3390/jmse10091176>
- Muhar S., Muhar A., Siegrist D., Egger G., 2019. *Rivers of the Alps – Diversity in Nature and Culture*. Haupt Verlag, ISBN: 978-3-258-08117-5. <https://issuu.com/haupt/docs/9783258081175?fr=sMDI3MTUzMTc0Mg>
- Mulder T., Migeon S., Savoye B., Jouanneau J.-M., 2001. Twentieth century floods recorded in the deep Mediterranean sediments. *Geology*, 29, 1011-1014. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<1011:TCFRIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<1011:TCFRIT>2.0.CO;2)
- Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., Da Fonseca G.A.B., Kent J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities, *Nature*, 403(6772), 853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Nature, 2018. The best research is produced when researchers and communities work together. *Nature*, 562(7725), 7. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06855-7> [consulté le 05/08/2024]
- Neboit R., 2010. *L'homme et l'érosion*. [3e édition revue et augmentée], Presses universitaires Blaise Pascal, coll. Nature et Sociétés, ISBN 978-2-84516-393-5, 350 p.
- Olsson L., Barbosa H., Bhadwal S., Cowie A., Delusca K., Flores-Renteria D., Hermans K., Jobbagy E., Kurz W., Li D., Sonwa D.J., Stringer L., 2019. Land Degradation. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.006>
- ONERC, 2024. Impacts du changement climatique : Atmosphère, Températures et Précipitations. *En ligne*, [mis à jour le 10/07/2024, consulté le 17/07/2024]. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-precipitations#top>
- ONF-RTM, ONF-DRN, INRAE-ETNA, 2023a. Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Roya – Volet torrentiel. <https://doi.org/10.57745/B69M2O>, Recherche Data Gouv, V1
- ONF-RTM, ONF-DRN, INRAE-ETNA, 2023b. Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie – Volet torrentiel. <https://doi.org/10.57745/UGJZWT>, Recherche Data Gouv, V1
- Passy P., Gratacap V., *en ligne*. Evolution des paysages dans les vallées de la Roya et de la Vésubie. https://ppassy.gitpages.huma-num.fr/roya-vesubie_rephotographie/#12/43.9731/7.3025 [consulté le 15/05/2024]
- Payrastré O., Nicolle P., Bonnifait L., Brigode P., Astagneau P., Baise A., Belleville A., Bouamara N., Bourgin F., Breil P., Brunet P., Cerbelaud A., Courapied F., Devreux L., Dreyfus R., Gaume E., Nomis S., Poggio J., Pons F., Rabab Y., Sevez D., 2022. The 2 October 2020 Alex storm in south-eastern France: a contribution of the scientific community to the flood peak discharges estimation. *LHB, Taylor & Francis*, pp. 2082891. <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2082891>
- Peiry J.-L., 1988. Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments d'un cours d'eau intra-montagnard : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie). Thèse de doctorat, Université Lyon 3, 378 p.
- Peiry J.-L., Salvador P.-G., Nougier F., 1994. L'incision des rivières dans les Alpes du nord : état de la question / River incision in the Northern French Alps. In : *Revue de géographie de Lyon*, vol. 69, n°1. *Enfoncement des lits fluviaux : processus naturels et impacts des activités humaines*, pp. 47-56. <https://doi.org/10.3406/geoca.1994.4237>
- Petri L., 2023. Identification des spécificités des dynamiques hydro-sédimentaires dans les Cévennes. Master thesis, ENSIL-ENSCI, 38 p.

- Pichard G., 1999. *Espaces et Nature en Provence. L'environnement rural 1540-1789*. Thèse de doctorat, Université de Provence Aix-Marseille I, 4 vol. + ann., env. 1800 p.
- Piégay H., Darby S.E., Mosselman E., Surian N., 2005. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. *River Res. Applic.*, 21, pp. 773–789. <https://doi.org/10.1002/rra.881>
- Piégay H., Alber A., Slater L., Bourdin L., 2009. Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquat. Sci.*, 71, pp. 371–388. <https://doi.org/10.1007/s00027-009-9220-4>
- Piégay H., Arnaud F., Cassel M., Depret T., Alber A., Michel K., Rollet A.-J., Vaudor L., 2016. Suivi par RFID de la mobilité des galets : retour sur 10 ans d'expérience en grandes rivières. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 67. <https://hal.science/hal-01402008>
- Piton G., Queffelec Y., Liébault F., Kuss D., Carlados S., Robert Y., Martins C., Guitet C., 2021. Alpes-Maritimes – Gestion post-Tempête Alex : Réflexions sur l'estimation de la période de retour des changements morphologiques majeurs associés aux crues extrêmes. Note technique, version 4, INRAE & ONF-RTM, 9 p.
- Piton G., Cohen M., Flipo M., Nowak M., Chapuis M., Melun G., Robert Y., Andréis N., Liébault F., 2024. Large in-stream wood yield during an extreme flood (Storm Alex, October 2020, Roya Valley, France): estimating the supply, transport, and deposition using GIS. *Geomorphology*, 446, 108981. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108981>
- Provansal M., Leveau P., 2006. Morphogenèse, anthropisation et changements climatiques : état du champ scientifique. In Allée P., Lespez L. (dir.), *L'Érosion entre Société, Climat et Paléoenvironnement*. Table ronde en l'honneur du Prof. R. Neboit-Guilhot (Clermont-Ferrand, 25-27 mars 2004), Presses Universitaires Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand, pp. 191–202.
- Ratzov G., Migeon S., Revel M., Sabatier P. et l'équipe scientifique embarquée de SEALEX, 2023. Comment s'est enregistré l'événement hydro-météorologique extrême ALEX sur la marge Ligure ? Premiers résultats de la campagne océanographique SEALEX (SEArchiving for ALEX). Congrès RST, présentation orale.
- Recking A., Richard D., Degoutte G., 2013. *Torrents et rivières de montagne – Dynamique et aménagement*. Editions Quae. ISBN 978-2-7592-1999-5
- Regione Liguria, 2021. Progetto “Concert-Eaux” – WP 4_3 Modalità di gestione dei sedimenti del tratto terminale del Fiume Roia. Rapport technique (en italien), Regione Liguria, Dipartimento Ambiente e Protezione Civile – Settore Assetto del Territorio, 55 p. <https://www.concert-eaux.eu/it/notizie-it/prodotti-it/category/8-wp-4-studi-analisi-ed-attivita-derivate?download=148:concert-eaux-4-3-1-piano-gestione-sedimenti-rl-it>
- Rhoads B.L., 2004. Whither Physical Geography? *Annals of the Association of American Geographers*, 94(4), 748–755. <http://www.jstor.org/stable/3694094>
- Rollet A.-J., MacVicar B., Piégay H., Roy A.G., 2008. L'utilisation de transpondeurs passifs pour l'estimation du transport sédimentaire : premiers retours d'expérience. *La Houille Blanche*, 4, 110–116. <https://doi.org/10.1051/lhb:2008047>
- Roquain C., Carré C., 2023. *Archivage sédimentaire des crues exceptionnelles dans le système turbiditique de la Roya*. Rapport de stage, Université Côte d'Azur, 41 p.
- Saint-Pé K., Blanchet S., Tissot L., Poulet N., Plasserau, O., Loot G., Veyssière C., Prunier J.G., 2018. Genetic admixture between captive-bred and wild individuals affects patterns of dispersal in a brown trout (*Salmo trutta*) population. *Conservation Genetics*, 19, 1269–1279. <https://doi.org/10.1007/s10592-018-1095-2>
- Schumm S.A., 1977. *The Fluvial System*. John Wiley and Sons, New York, 338 p.
- Scorpio V., Comiti F., 2024. Channel changes during and after extreme floods in two catchments of the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 463, 109355. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109355>
- Seingier H., 2023. Florence Habets : « Notre société s'est fragilisée par rapport à la ressource en eau ». *Le Monde*, 12 déc. 2023. <https://www.lemonde.fr/le-monde-et->

- [vous/article/2023/12/12/florence-habets-notre-societe-s-est-fragilisee-par-rapport-a-la-ressource-en-eau_6205421_6065879.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/12/12/florence-habets-notre-societe-s-est-fragilisee-par-rapport-a-la-ressource-en-eau_6205421_6065879.html) [consulté le 05/08/2024]
- Serrhini-Naji G., 2021. *Monographie historique du transport sédimentaire en Cévennes: une approche par les hybrides*. Master thesis, Université de Technologie de Compiègne, 75 p.
- Sivan O., Miramont C., Pichard G., Prosper-Laget V., 2009. Les conditions climatiques de la torrentialité au cours du Petit Age Glaciaire en Provence. *Archéologie du Midi Médiéval*, Centre d'Archéologie Médiévale du Languedoc, pp. 157-167. https://www.persee.fr/doc/amime_0758-7708_2009_num_27_1_1894
- SMIAGE, 2020. Mise en place de sondes de mesure piézométriques et bancarisation des données pour une meilleure compréhension du fonctionnement de la nappe alluviale de la Roya. *Congrès final du projet Concert-Eaux, [en ligne]*, 11 déc. 2020. https://youtu.be/wVXmgODp2_8
- Smith M.D., Knapp A.K., Collins S.L., 2009. A framework for assessing ecosystem dynamics in response to chronic resource alterations induced by global change. *Ecology*, 90: 3279-3289. <https://doi.org/10.1890/08-1815.1>
- Sømme T.O., Helland-Hansen W., Martinsen O.J., Thurmond J.B., 2009. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: a basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems. *Basin Research*, 21: 361-387. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00397.x>
- Surian N., Righini M., Lucía A., Nardi L., Amponsah W., Benvenuti M., Borga M., Cavalli M., Comiti F., Marchi L., Rinaldi M., Viero A., 2016. Channel response to extreme floods: insights on controlling factors from six mountain rivers in northern Apennines, Italy. *Geomorphology*, 2016, 272, 78-91. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.002>
- Swanson K.J., 1980. Geomorphology and ecosystems. In *Forests: fresh perspectives from ecosystem analysis*. Proceedings of the 40th annual biology colloquium; 1979 Nov. 27-28. Waring, Richard H., ed, Oregon State University Press: 199 p., <https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/pubs/pdf/pub579.pdf>
- Terrier B., Piégay H., Liébault F., Dufour S., Belletti B., Le Lay Y.-F., Marmonier P., Comby E., Tacon S., Faton J.-M., Gourhand A., Marteau B., Rappelle B., Wawrzyniak V., 2019. *Les rivières en tresses du bassin Rhône-Méditerranée – Éléments de connaissance*. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, série "Eau & Connaissance", 118 p. https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2019-09/guide_riviere_en_tresses_v27_complet.pdf
- Thibaut K., Ayrat P.-A., Ozer P., 2023. Development of the chrono-systemic timeline as a tool for cross-sectional analysis of droughts—application in Wallonia. *Water*, 15(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/w15234150>
- Thorp J.H., Thoms M.C., Delong M.D., 2006. The riverine ecosystem synthesis: biocomplexity in river networks across space and time. *River Res. Applic.*, 22: 123-147. <https://doi.org/10.1002/rra.901>
- Tourade F., 2018. *Étude du transport solide sur la Roya et de l'impact des pulsations sédimentaires sur la dynamique des frayères*. Master thesis, Université Paris 7 – Denis Diderot, 143 p.
- Turowski J.M., Yager E.M., Badoux A., Rickenmann D., Molnar P., 2009. The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel. *Earth Surf. Process. Landforms*, 34: 1661-1673. <https://doi.org/10.1002/esp.1855>
- Valo M., 2022. Le sable, une ressource exploitée sans contrôle. *Le Monde*, 26 avr. 2022. https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/04/26/le-sable-une-ressource-strategique-exploitee-sans-frein_6123653_3244.html [consulté le 05/08/2024]
- Valo M., 2024. La dégradation des écosystèmes aquatiques s'accélère. *Le Monde*, 28 août 2024. https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/08/28/la-degradation-des-ecosystemes-aquatiques-s-accelere_6297289_3244.html [consulté le 28/08/2024]

- Vázquez-Tarrío D., Recking A., Liébault F., Tal M., Menéndez-Duarte R., 2018. Particle transport in gravel-bed rivers: revisiting passive tracer data. *Earth Surf. Process. Landforms*, 44, 112–28. <https://doi.org/10.1002/esp.4484>
- Vignal M., 2020. *L'impact du changement global sur la flore du Sud-Est de la France : Modélisation multiscalaire de la répartition de 25 espèces à l'horizon 2100 par la dynamique de population*. Thèse de doctorat, Université Côte d'Azur, 474 p. + vol. d'annexes, <https://theses.hal.science/tel-03105744>
- Viles H.A., 2022. Biogeomorphology. *Geological Society, London, Memoirs*, Vol. 58, p. M58-2022. <https://doi.org/10.1144/M58-2022-6>
- Weiland M., 2024. *Etude du suivi de la mobilité sédimentaire dans la Roya*. Rapport de stage, Université Côte d'Azur, 39 p.
- Yager E.M., Turowski J.M., Rickenmann D., McArdell B.W., 2012. Sediment supply, grain protrusion, and bedload transport in mountain streams. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L10402. <https://doi.org/10.1029/2012GL051654>

Liste des figures

Figure 1. Compartiments classiquement étudiés au sein de l'hydrosystème fluvial.	12
Figure 2. Interrelations entre géomorphologie et écologie.	12
Figure 3. Paysages maralpins typiques des bassins versants étudiés. (a) Le Paillon. (b) La Roya à Vintimille.....	15
Figure 4. Confluence Var-Estéron en amont de Nice en 1945 (a) et 2002 (b).	16
Figure 5. Exemples d'aménagements anthropiques typiques des systèmes étudiés : infrastructures de production hydro-électriques (a) et endiguements (b).	16
Figure 6. Dimension régionale des hydrosystèmes étudiés.	17
Figure 7. Cadre conceptuel d'étude. Le cadre rouge représente l'approche source-to-sink d'un point de vue « physique », ou encore l'approche systémique et interdisciplinaire qui sous-tend l'étude.	21
Figure 8. Schéma visant à expliciter la complexité et la variabilité spatiale et temporelle des différents forçages à intégrer dans le cadre d'une étude sur les flux hydro-sédimentaires dans les bassins versants.	22
Figure 9. Illustration des différents compartiments des cours d'eau en tresses étudiés in Devreux (2023).	23
Figure 10. Systèmes de contraintes associés aux travaux menés. Le périmètre spatial des études associées est rappelé par le codage couleur, en relation avec les ensembles hydrographiques identifiés dans la Figure 6.	25
Figure 11. Une pluralité d'outils issus de disciplines différentes, pour une approche complémentaire entre instrumentation de terrain et outils informatisés.	26
Figure 12. (a) et (b) Bassin versant de la Lieure, affluent du Gardon de Saint-Jean amont suite à la crue du 19/09/2020 – Cumul de pluie supérieur à 600 mm en 24h. In Chapuis et al., 2023. (c) et (d) Montclus sur la RD980, Valat de Boudouyre, un affluent de la Cèze. Débit estimé à 300 m ³ /s lors de la crue du 09/09/2018.....	32
Figure 13. Les 4 bassins versants étudiés dans le cadre du projet DHySed-7.	33
Figure 14. Exemples de productions réalisées dans le cadre du projet DHySed-7. (a) Frise chrono-systémique de l'histoire extractive des sédiments en Cévennes, depuis le XVII ^{ème} siècle (modifié d'après G. Serrhini Naji, 2021). (b) Mind map des interconnexions entre climat, pluie, débits, érosion, transport sédimentaire et société (modifié d'après L. Petri, 2023).....	34
Figure 15. Modélisation conceptuelle du changement climatique sur le transport sédimentaire dans les Cévennes et influences croisées sur les socio-écosystèmes. Effet d'accentuation (+) vs. effet d'atténuation (-) vs. effet indéfini (?) du processus.....	35
Figure 16. Modélisation conceptuelle de l'influence du changement climatique sur les flux hydro-sédimentaires en Roya suite à la sortie du Petit Âge Glaciaire (PAG). Effet d'accentuation (+) vs. effet d'atténuation (-).	36
Figure 17. Réajustement du modèle conceptuel des flux hydro-sédimentaires en Roya suite aux précipitations de période de retour 1000 ans survenues le 02/10/2020. Effet d'accentuation (+) vs. effet d'atténuation (-) vs. effet indéfini (?).....	37
Figure 18. Les flux hydro-sédimentaires, un proxy des interactions climat-société à l'échelle d'un bassin versant : schématisation conceptuelle du système d'analyse utilisé en géomorphologie fluviale.....	38
Figure 19. Le bassin versant de la Roya dans le cadre de la Riviera méditerranéenne.....	40
Figure 20. Topographie du bassin versant de la Roya et affluents principaux.	42

Figure 21. Cumul journalier des précipitations à Tende entre le 25/11/2015 et le 30/06/2024 (en mm).....	43
Figure 22. Instrumentation des bassins versants maralpains en termes de mesures pluviométriques.	44
Figure 23. Géologie simplifiée du bassin versant de la Roya.	46
Figure 24. Extrait de la carte géomorphologique du bassin versant de la Roya (Julian, 1977).	46
Figure 25. Débits moyens mensuels à St Dalmas-de-Tende (1985-2024, en gris) et Breil-sur-Roya (1969-2017, en blanc).....	47
Figure 26. Débit instantané maximal à St Dalmas-de-Tende (1985-2021).	48
Figure 27. Chaîne de production hydroélectrique en Roya.	50
Figure 28. Obstacles à l'écoulement et leurs usages sur le bassin versant de la Roya. Dans la partie italienne, les dérivations sont largement à usage agricole et pour l'alimentation en eau potable (champ captant).	51
Figure 29. Sites instrumentés en Roya dans le cadre des projets Interreg Alcotra Concert-Eaux (2017-2020) et Concert-Eaux OPERA (2023-2024).....	57
Figure 30. Situation géographique des géophones installés en Roya. (a) et (c) Site de l'Arbousset. (b) et (d) Site de Viévola.	61
Figure 31. Distributions granulométriques (GSD, Grain Size Distribution) sur les 3 sites d'étude Fontan/Ambo, Pertus/Arbousset et Airole/Lamberta.	63
Figure 32. Précipitations journalières et débit moyen journalier à St Dalmas-de-Tende, 01/10/2017 – 30/04/2018.	64
Figure 33. Résultats du traçage sédimentaire 2018 à Pertus. (a) Site d'étude : la Roya à Pertus. (b) Positions initiale, position finale, déplacement des traceurs retrouvés, et évolution topographique de la zone entre mars et sept. 2018.	65
Figure 34. Résultats du traçage sédimentaire 2018 sur le site d'Airole/Lamberta.	66
Figure 35. Cartographie des résultats du traçage sédimentaire par RFID active post-Alex (campagne 2021) pour les traceurs initialement situés sur le site Fontan/Ambo.	71
Figure 36. Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 24/06/2020 et le 11/05/2023. On notera en particulier l'épisode de transport solide associé à la tempête Alex du 02/10/2020.	72
Figure 37. Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 28/08/2020 et le 16/12/2020. On notera en particulier l'épisode de transport solide associé à la tempête Alex du 02/10/2020 dont l'unique pic mesuré est situé vers 19h50 à l'aval de Breil.	73
Figure 38. Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 07/09/2023 et le 20/02/2024. On notera en particulier l'épisode de transport solide associé à la « tempête Aline » fin octobre 2023.	74
Figure 39. (a) Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 07/09/2023 et le 01/12/2023. (b) Hauteur d'eau instantanée à la station de St Dalmas-de-Tende entre le 01/09/2023 et le 30/11/2023.	75
Figure 40. Relation entre distance maximale de transport et durée du suivi pour des études de traçage sédimentaire par RFID (cercles, n=207) ou traceurs magnétiques (triangles, n=55). Notre suivi se situe dans la gamme indiquée par le cercle rouge, ce qui confirme que la Roya est un système très actif, même sans inclure l'événement extrême du 02/10/2020.	77
Figure 41. Relation entre distance moyenne de transport et puissance spécifique pour des études de traçage sédimentaire. Les résultats du Tableau 10 et du Tableau 11 indiquent des distances de transport moyennes de l'ordre de 300 à 400 m/an sur 4 ans tant sur le secteur amont que sur le secteur aval (morphologie riffle-pool single-thread à step-pool), ce qui correspond au rectangle rouge sur le graphique. La Roya se situe donc nettement dans la	

gamme des cours d'eau à transport solide intense, et l'événement extrême suivi explique que l'on soit dans une gamme de puissance spécifique haute, qui n'ait pas encore été suivie par traçage.....	78
Figure 42. Les différentes réponses possibles d'un système fluvial suite à une perturbation, en fonction de sa capacité d'ajustement.....	80
Figure 43. Trajectoires d'un hydrosystème dans le cas d'une restauration, et notion d'état de référence qui doit être défini à partir d'objectifs plutôt qu'à partir d'une référence historique. ...	82
Figure 44. Photographies du tronçon restauré du Drac à St Bonnet-en-Champsaur (a) avant restauration en 2012 et (b) après restauration en 2014. Devreux et al., submit.	88
Figure 45. Localisation du site d'étude. (A) Le bassin versant du Drac. (B) Le tronçon restauré (rectangle bleu) et le tronçon cible (rectangle jaune) au sein des deux tronçons homogènes d'un point de vue géomorphologique (rectangles vert et orange ; St Bonnet-en-Champsaur est situé à 44.6 N - 6.0 W dans le système de coordonnées WGS 84). Ces tronçons homogènes ont été étudiés dans Devreux et al., 2022b.	88
Figure 46. Résumé graphique de la méthodologie employée. Le détail est précisé dans Devreux et al., submit.	89
Figure 47. Démarche BACI (Before/After-Control/Impact) adoptée dans l'étude (rectangle rose).	89
Figure 48. Localisation et caractérisation des habitats pour chaque échantillon sur le tronçon restauré (C) et le tronçon cible (D).	90
Figure 49. Résultat des analyses statistiques (nMDS) de la composition des communautés d'invertébrés en fonction des caractéristiques des habitats, entre le tronçon restauré (en bleu) et le tronçon cible (en brun). On note une plus faible variabilité des communautés sur le tronçon restauré que sur le tronçon cible.	91
Figure 50. Conditions hydro-climatiques et production sédimentaire associée : hypothèses de travail en géoarchéologie fluviale et agraire pour le bassin versant de la Roya.	96
Figure 51. Hypothèse de l'influence des politiques gouvernementales sur l'occupation du sol et, in fine, sur la production sédimentaire dans le cas de la Roya.	97
Figure 52. Synthèse graphique des questionnements du projet StS-SEALEX et des objets de recherche associés.	101
Figure 53. Relation entre approche « objet » (cercles pleins) et approche « nexus » (pointillés) pour favoriser l'émergence d'une transdisciplinarité à l'issue du projet.	103
Figure 54. Précipitations en Roya au cours du 02/10/2020 (tempête Alex). L'interpolation des valeurs mesurées indique que presque un quart du bassin versant amont a été soumis à des précipitations de période de retour 1000 ans.	105
Figure 55. Le bassin versant de la Roya est prolongé par un canyon sous-marin ; entre les deux, un plateau continental étroit.	106

Liste des tableaux

Tableau 1. Synthèse des périodes de retour correspondant à la tempête Alex du 02/10/2020 en Roya, en fonction du paramètre considéré (précipitations, débits, morphologie, débordements).	30
Tableau 2. Date de mise en service de quelques stations pluviométriques sur le bassin versant (non exhaustif).	44
Tableau 3. Débits (en m ³ /s) des périodes de retour caractéristiques à St Dalmas-de-Tende et Breil-sur-Breil. Les valeurs entre crochets correspondent à la gamme d'incertitude. Calculs CRUCAL réalisés le 24/04/2024 à 02:15 (TU) pour la station de St Dalmas, et le 24/01/2024 à 03:18 (TU) pour la station de Breil.	48
Tableau 4. Valeur du module pour St Dalmas-de-Tende et Breil-sur-Roya.....	48
Tableau 5. Mises en service des ouvrages de production hydroélectrique, depuis l'amont vers l'aval (cf. Figure 27).	50
Tableau 6. Axes d'étude explorés dans le cadre de l'étude des transferts sédimentaires en Roya, protocole succinct mis en œuvre et actuel document de référence sur le sujet.....	55
Tableau 7. Spécifications techniques des géophones installés en Roya.	60
Tableau 8. Bilan des campagnes de suivi RFID passive 2018 et 2019.....	67
Tableau 9. Synthèse du déploiement de traceurs RFID passifs post-Alex à l'été 2021.	68
Tableau 10. Résultats annuels des campagnes de traçage sédimentaire par RFID active à partir de 2019. Les débits mentionnés sont au-dessus de la Q2 et sont donc morphogènes. Les chiffres en italique sont des valeurs réexpertisées. Précision de la localisation : environ 150-200 m. Pour mémoire, les données issues du suivi par RFID passive à Pertus de 2024 ont concerné 2 traceurs, dont la distance de transport a été respectivement de 771 m entre 2018 et 2024, et 947 m entre 2021 et 2024.....	69
Tableau 11. Vitesse annuelle virtuelle moyenne sur la période considérée (m/an). Sont indiqués le nombre de traceurs à partir duquel la valeur a été calculée. Les résultats se situant dans la gamme d'incertitude des mesures de terrain sont indiqués entre parenthèses.	70
Tableau 12. Synthèse de l'évolution des conditions d'occupation du sol sur les versants en Roya en fonction des politiques gouvernementales.....	96
Tableau 13. Organisation du manuscrit et lien des différentes parties abordées avec les projets financés, classés chronologiquement. Mon degré d'implication dans ces différents projets est précisé par le code couleur : montage et portage (vert), (co)portage du projet (orange), (co)portage d'un workpackage (bleu) ou implication simple (noir).	111