

## Transport sédimentaire dans un bassin versant à régime montagnard sous influence méditerranéenne : retour d'expérience de 7 années de suivi et modélisation des flux en contexte de changement climatique (Roya, Alpes-Maritimes, France)

Sediment transport in a Mediterranean mountain stream catchment: 7 years' monitoring feedback and sediment fluxes modelling in climate change context (Roya River, Maritime Alps, France)

CHAPUIS Margot<sup>1</sup>, ADNES Cyriel<sup>2</sup>, LOMBARD Florent<sup>3</sup>, FOX Dennis<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Côte d'Azur, CNRS, ESPACE, France, [margot.chapuis@univ-cotedazur.fr](mailto:margot.chapuis@univ-cotedazur.fr)

<sup>2</sup> DEAL Réunion, SCETE/USIG, [cyriel.adnes@developpement-durable.gouv.fr](mailto:cyriel.adnes@developpement-durable.gouv.fr)

<sup>3</sup> Université Aix-Marseille, CNRS, ESPACE, France, [florent.lombard@univ-amu.fr](mailto:florent.lombard@univ-amu.fr)

### RÉSUMÉ

La Roya est un exemple caractéristique des cours d'eau de la Riviera méditerranéenne, avec une hydrologie contrastée et des flux sédimentaires importants, et une occupation dense du fond de vallée. Nous présentons ici une synthèse des recherches réalisées dans le bassin versant depuis 2016, qui ont essentiellement visé à caractériser et quantifier les dynamiques sédimentaires à l'échelle du bassin versant, pour dégager une vision prospective du devenir de ces flux à moyen terme. Le suivi de terrain a notamment couplé du traçage RFID et de la sismique passive. La tempête Alex du 02/10/2020 a donné l'occasion unique de capturer un tel événement et d'analyser la trajectoire du système après une crue de période de retour millénaire sur la partie amont du bassin. Les analyses menées sur les distances moyennes et maximales de transport, la durée de suivi et la puissance spécifique, placent résolument la Roya dans la gamme des cours d'eau à transport solide intense, même sans inclure l'événement extrême d'octobre 2020. La trajectoire du système post-crue suggère une mobilité accrue et toujours d'actualité après déstructuration du lit. Un progressif retour à une simplification du profil en travers sous l'effet de la purge sédimentaire du système peut s'envisager, mais reste fortement conditionnée par l'hydrologie à venir. L'événement extrême du 02/10/2020 permet d'approfondir l'évaluation des flux sédimentaires en Roya en contexte de changement climatique en questionnant le rythme de résilience du système.

### ABSTRACT

As other rivers of the Mediterranean Riviera, the Roya is characterized by hydrological extremes, high sediment fluxes and dense valley floor land use. The research undertaken in the catchment aimed at characterizing and quantifying sediment fluxes at catchment scale, to define a prospective modelling of sediment fluxes in climate change context. Field monitoring since 2016 notably included RFID tracking and passive seismic monitoring. A 1000 years-return period flood that occurred on 2020/10/02 was a unique opportunity to analyze the system trajectory after such an intense event. The average and maximum distances of sediment transport in relation with the duration of the study and the excess unit stream power confirm that the Roya is particularly dynamic. The post-flood trajectory suggests increased mobility but will be maintained only with sufficient hydrology in the next years. This extreme event enables to analyze sediment fluxes at catchment scale in climate change context while questioning the resilience rhythm of the system.

### MOTS CLÉS

Changement climatique, résilience post-crue, connectivité sédimentaire, traçage RFID, transport sédimentaire  
Climate change, post-flood resilience, RFID tracking, sediment connectivity, sediment transport

## 1 CADRE DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE

### 1.1 Contexte et objectifs

La Roya est un exemple caractéristique des cours d'eau de la Riviera méditerranéenne, avec une hydrologie contrastée, des flux sédimentaires importants et une occupation dense du fond de vallée. Pour un contexte topographique et lithologique donné, les transferts sédimentaires à l'échelle d'un bassin versant sont dépendants en premier lieu de l'hydrologie, mais aussi, à plus large échelle temporelle, de l'évolution du climat et de l'occupation du sol.

Dans la continuité des travaux présentés en 2022 (Chapuis et al., 2022), nous présentons ici une synthèse des recherches réalisées dans le bassin versant depuis 2016, qui ont essentiellement visé à caractériser et quantifier les dynamiques sédimentaires à l'échelle du bassin versant, pour dégager une vision prospective du devenir de ces flux à moyen terme, dans une logique de modélisation conceptuelle et prospective des transferts sédimentaires à l'échelle du bassin versant en contexte de changement climatique.

### 1.2 Méthodologie

Depuis 2016 nous avons adopté une approche source-to-sink pour appréhender la connectivité sédimentaire à l'échelle de ce bassin versant (660 km<sup>2</sup>) soumis à régime montagnard sous influence méditerranéenne, couplée à une évaluation de la (dis)continuité sédimentaire (Fryirs et al., 2007). L'étude repose en grande partie sur la production de données originales de terrain issues d'un suivi de la charge grossière par traçage RFID active et passive, ainsi que par sismique passive à partir de l'été 2020.

La tempête Alex du 02/10/2020 correspond à une crue millénaire sur le haut du bassin : précipitations de période de retour > 1000 ans sur l'amont du bassin (CEREMA, 2021) ; débit de pointe de période de retour comprise entre 100 et 500 ans ; qualification de l'effet morphogène de la crue : entre 600 ans et 1000 ans (ONF-RTM et al., 2023). Ceci a donné l'occasion unique de capturer un tel événement et d'analyser la métamorphose fluviale correspondante (Liébault et al., 2024).

La modélisation conceptuelle des transferts sédimentaires à l'échelle du bassin versant en contexte de changement climatique intègre d'une part les résultats issus du suivi de la charge sédimentaire avant et après la réactivation partielle des versants suite à une crue millénaire, et d'autre part les prévisions climatiques à 100 ans sur le bassin.

## 2 RESULTATS

### 2.1 Traçage sédimentaire pluriannuel de l'ensemble de la gamme granulométrique

L'opération de traçage sédimentaire par RFID active a donné lieu à un suivi annuel entre 2019 et 2024. Les taux de retour sont faibles, ce qui est expliqué par les difficultés de progression dans le lit du torrent. Les résultats obtenus peuvent être néanmoins analysés prudemment, notamment en termes de distances de transport maximales observées (cf. Tableau 1) : elles sont de l'ordre de quelques kilomètres par an, aussi bien avant qu'après la tempête Alex du 02/10/2020. Le déplacement des traceurs retrouvés post-crue de 2020, bien qu'il reste du même ordre de grandeur, est plus élevé et présente une plus grande incertitude du fait du très faible taux de retour associé.

Tableau 1. 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.

Année de suivi	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Q <sub>max</sub> à Breil (m <sup>3</sup> /s)	133	140	[1000 ;1500]	9*	11* <sup>μ</sup>	23 <sup>£</sup>
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 ; <sup>μ</sup> : en attente de données pour validation ; \* : débit moyen journalier ; <sup>£</sup> : à St Dalmas

## 2.2 Flux sédimentaires en Roya : éléments de connaissance issus du suivi par sismique passive

A peine installé, le suivi par sismique passive avait permis de capturer la cinétique de l'événement du 02/10/2020, permettant ainsi d'affiner les modélisations hydrologiques de l'événement (Chapuis et al., 2022). La poursuite du suivi a permis :

- de systématiser l'occurrence d'épisodes de transport sédimentaire dès qu'il y a épisode hydrologique, entérinant ainsi l'hypothèse de fonctionnement en « tout ou rien » du système
- de confirmer une relation entre intensité des épisodes hydrologiques et intensité des épisodes de transport sédimentaire, ainsi qu'en ce qui concerne la temporalité des pics de transport par rapport aux pics de crue ; une éventuelle calibration reste à l'étude tant pour la cinétique que pour l'intensité des épisodes.

## 3 DISCUSSION

### 3.1 Retour d'expérience sur le suivi des flux sédimentaires en contexte torrentiel méditerranéen

Les analyses menées sur les distances moyennes et maximales de transport, la durée de suivi et la puissance spécifique (cf. Figure 1), placent résolument la Roya dans la gamme des cours d'eau à transport solide intense, même sans inclure l'événement extrême d'octobre 2020. Dans la Figure 1(b), la crue millénaire du 02/10/2020 explique que l'on soit dans une gamme de puissance spécifique haute, qui n'ait encore jamais été suivie par traçage RFID par la communauté scientifique. Le jeu de données présenté ici constitue donc un apport particulièrement pertinent à la revue de littérature établie par Liébault et al., 2024.

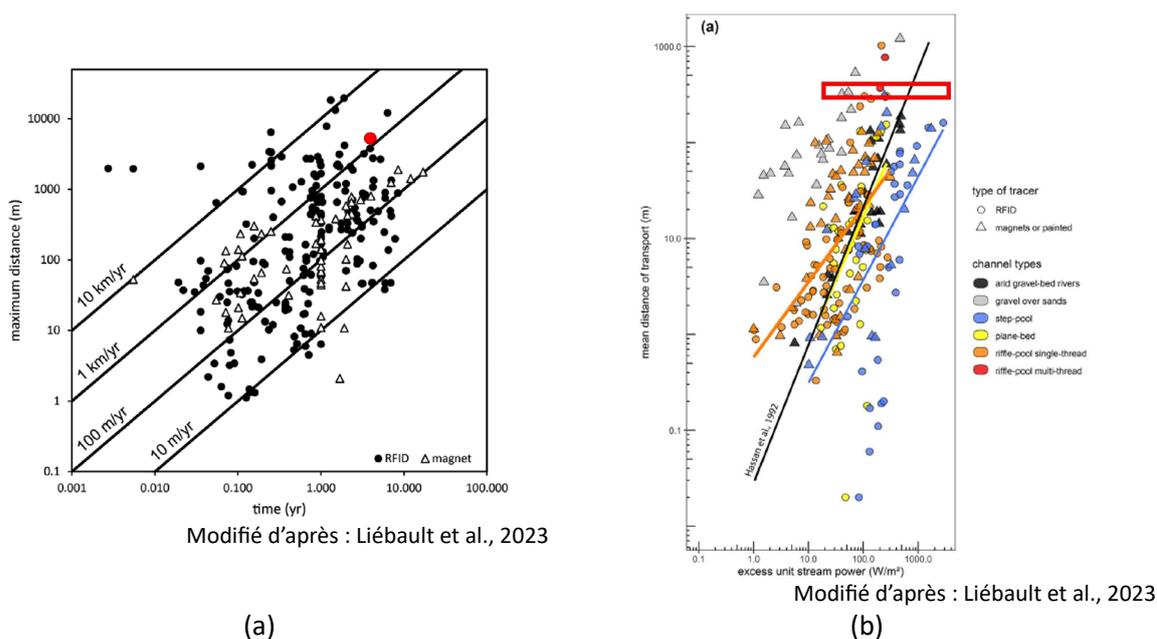


Figure 1. (a) Relation entre distance maximale de transport et durée du suivi pour des études de traçage sédimentaire par RFID (cercles,  $n=207$ ) ou traceurs magnétiques (triangles,  $n=55$ ). Notre suivi se situe dans la gamme indiquée par le cercle rouge, ce qui confirme que la Roya est un système très actif, même sans inclure l'événement extrême du 02/10/2020.

(b) Relation entre distance moyenne de transport et puissance spécifique pour des études de traçage sédimentaire. Les résultats de l'étude 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.

### 3.2 Connectivité sédimentaire à l'échelle du bassin versant : continuum terre-mer des flux et résilience post-crue

La trajectoire du système post-crue suggère une mobilité accrue et toujours d'actualité après déstructuration du lit lors de l'épisode d'octobre 2020. Un progressif retour à une simplification du profil en travers sous l'effet de

la purge sédimentaire du système peut s'envisager, mais reste fortement conditionnée par l'hydrologie à venir. L'événement extrême du 02/10/2020 permet d'approfondir l'évaluation des flux sédimentaires en Roya en contexte de changement climatique en questionnant le rythme de résilience du système.

### 3.3 Modèle conceptuel des flux hydro-sédimentaires à l'échelle du bassin versant en contexte de changement climatique

La sortie du Petit Âge Glaciaire (PAG) a induit une réduction de la production sédimentaire (symbole - sur la Figure 2), de même que la déprise rurale a 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 a induit un piégeage des sédiments et une réduction de des débits dans le chenal. Ceci correspond donc également à une diminution du transport solide (-). En sortie du PAG, 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. Ce modèle conceptuel en sortie de PAG a été réajusté (cf. Figure 2), d'une part suite aux précipitations de période de retour 1000 ans survenues le 02/10/2020, et d'autre part en intégrant les prévisions climatiques à 100 ans (Martin, 2020). Les effets complexes (symbole ? sur la Figure 2) font l'objet d'une étude qui devrait aboutir d'ici 2027.

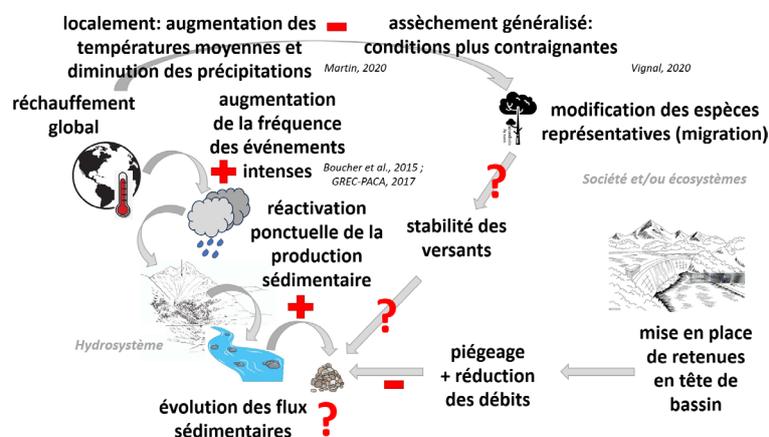


Figure 2. Modélisation conceptuelle de l'influence du changement climatique sur les flux hydro-sédimentaires en Roya. Effet d'accroissement (+) vs. effet d'atténuation (-) vs. effet indéfini (?).

## BIBLIOGRAPHIE

- CEREMA, 2021. RETEX technique ALEX – Inondations des 2 et 3 octobre 2020 – Expertise hydrologique – rapport d'étape. Rapport d'étude, juin 2021, version 1, 54 p.
- Chapuis M., Martins M., Adnès C., Tissot L., Martin N., Salvan L., Dreyfus R., Compagnon F., Douvinet J., Brigode P., Fox D., 2022. Catchments' reactions to the Oct. 2<sup>nd</sup> 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>
- 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
- 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., 2024. Channel change during catastrophic flood: example of the storm Alex in the Vésubie and Roya valleys. *Geomorphology*, 446, pp.109008. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109008>
- 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>
- ONF-RTM, ONF-DRN, INRAE-ETNA, 2023. 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