

Interreg Alcotra 2023-2024

## Projet Concert-Eaux OPERA

WP 3.1.b, volet « Analyse des flux sédimentaires et impact  
de la tempête Alex »

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

Rapport final au 09/01/2025

Portage du volet : M. CHAPUIS

Autres membres CNRS UMR 7300 ESPACE impliqués :

C. ADNES, M. BANITALEBI, S. CADET-MARTHE, D. FOX, F. LOMBARD, M. WEILAND





## Table des matières

1	Contexte .....	5
1.1	Contexte de l'étude .....	5
1.2	Présentation du bassin versant de la Roya.....	6
1.2.1	Contexte géographique général .....	6
1.2.2	Topographie et organisation du réseau hydrographique.....	7
1.2.3	Climat.....	8
1.2.4	Géologie, géomorphologie et sensibilité des formations superficielles à l'érosion .....	11
1.2.5	Hydrologie.....	13
1.2.6	Aménagements anthropiques en lien avec la ressource en eau .....	15
1.2.7	Occupation du sol, végétation et biodiversité .....	19
2	Méthodologie .....	22
2.1	Démarche méthodologique générale .....	22
2.2	Méthodologie générale du traçage sédimentaire par RFID .....	23
2.3	Suivi des flux sédimentaires par sismique passive.....	26
3	Résultats .....	29
3.1	Dynamique sédimentaire des frayères en Roya : apports d'un suivi par RFID passive.....	29
3.2	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.....	36
3.3	Etude des flux sédimentaires en Roya : éléments de connaissance issus du suivi par sismique passive, discussions et perspectives de recherche .....	39
4	Discussion et perspectives.....	43
4.1	Au sujet du suivi des flux sédimentaires en Roya par traçage RFID.....	43
4.1.1	Distances de transport en Roya : mise en perspective des résultats.....	43
4.1.2	Faible taux de retour du traçage RFID : hypothèses et perspectives de recherche.....	45
4.1.3	Perspectives de poursuite du suivi RFID .....	48
4.2	Modèle conceptuel des flux hydro-sédimentaires à l'échelle du bassin versant.....	49
4.3	Au sujet de la gestion des flux sédimentaires en Roya .....	50
4.3.1	Temps de relaxation, résilience et trajectoire du système .....	50
4.3.2	Enjeux de la reconstruction .....	52
4.3.3	Evolution des flux sédimentaires en Roya en contexte de changement climatique .....	53
4.4	Perspectives de suivi des flux sédimentaires en Roya .....	54

Références bibliographiques .....	56
Liste des figures .....	62
Liste des tableaux .....	65

*Nous présentons ici les 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 (tempête Alex du 02/10/2020) a donné l'occasion unique de capturer un tel événement. Nous présentons 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.*

# 1 Contexte

## 1.1 Contexte de l'étude

Cette étude a débuté dans le cadre 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**. Une étude préliminaire au projet européen Concert-Eaux (Lejeune, 2016) 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) puis du projet Concert-Eaux OPERA (2023-2024) nous avons travaillé selon 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.

## 1.2 Présentation du bassin versant de la Roya

### 1.2.1 Contexte géographique général

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 1).

#### Riviera méditerranéenne

■ La Roya



M. Chapuis, Aug. 2024.

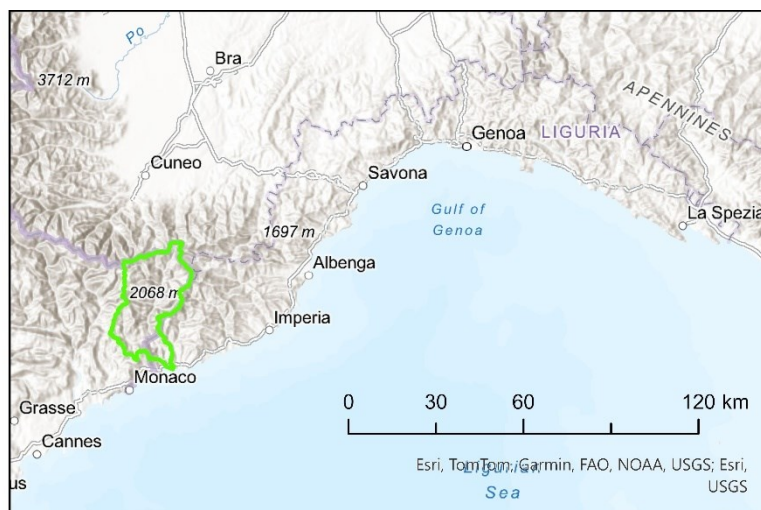


Figure 1. Le bassin versant de la Roya dans le cadre de la Riviera méditerranéenne.

Le caractère transfrontalier de la Roya rend son étude particulièrement intéressante d'un point de vue géographique, 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 2 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*). 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).

## 1.2.2 Topographie et organisation du réseau hydrographique

Le bassin versant de la Roya, d'une superficie de 671 km<sup>2</sup> (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 2). 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 par 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 2), on notera en particulier la Bévéra : elle constitue le plus grand sous-bassin versant (160 km<sup>2</sup>) 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.

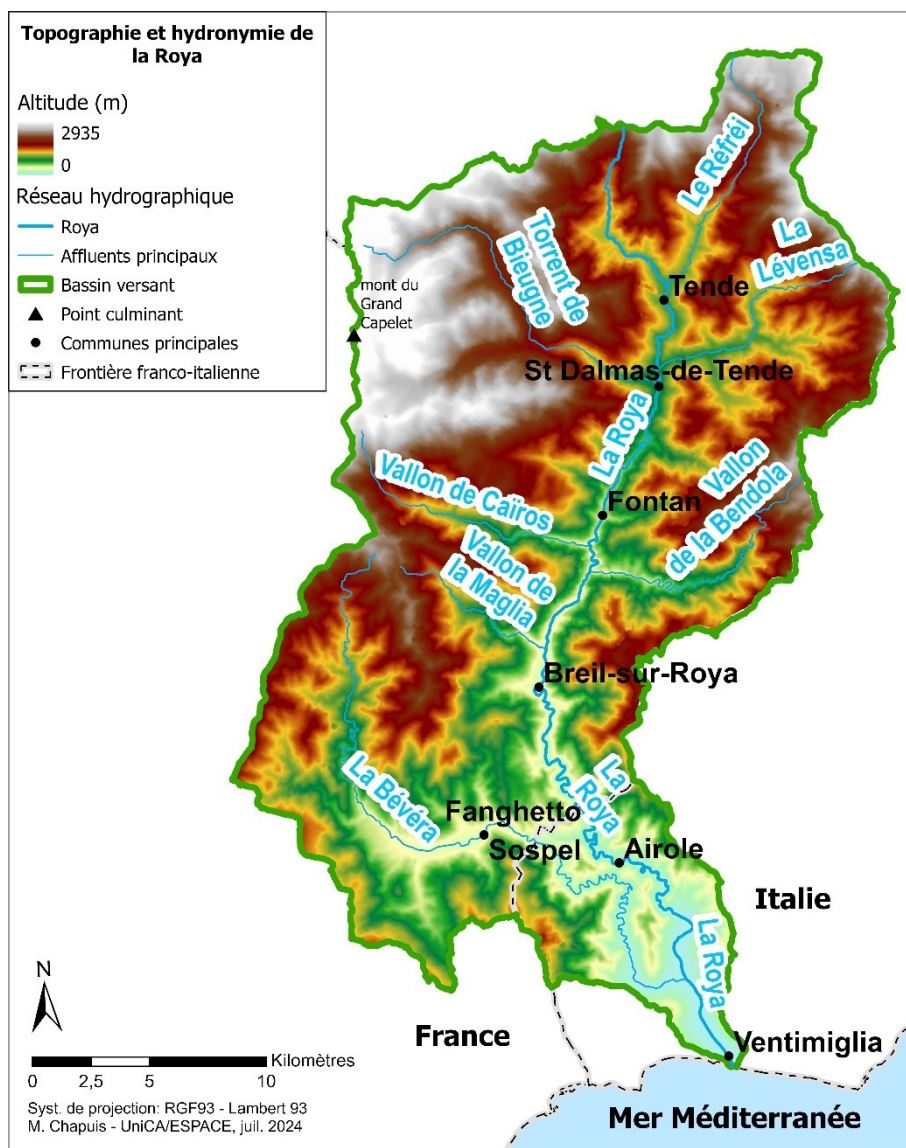


Figure 2. Topographie du bassin versant de la Roya et affluents principaux.

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

### 1.2.3 Climat

Avec une dénivellée 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 Tende<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> [https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id\\_produit=117&id\\_rubrique=39](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]

altitude (et en latitude) (Vignal, 2020). La variabilité infra-annuelle des précipitations est forte, de même que la variabilité interannuelle (cf. Figure 3).

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 »<sup>2</sup>, 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.

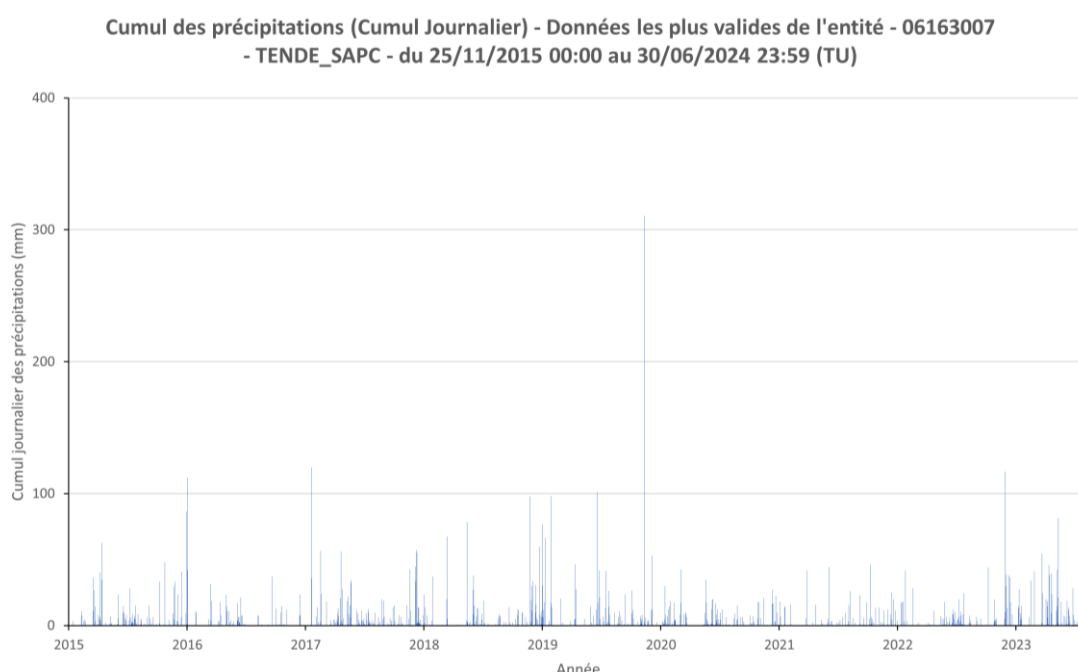


Figure 3. Cumul journalier des précipitations à Tende entre le 25/11/2015 et le 30/06/2024 (en mm).

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>

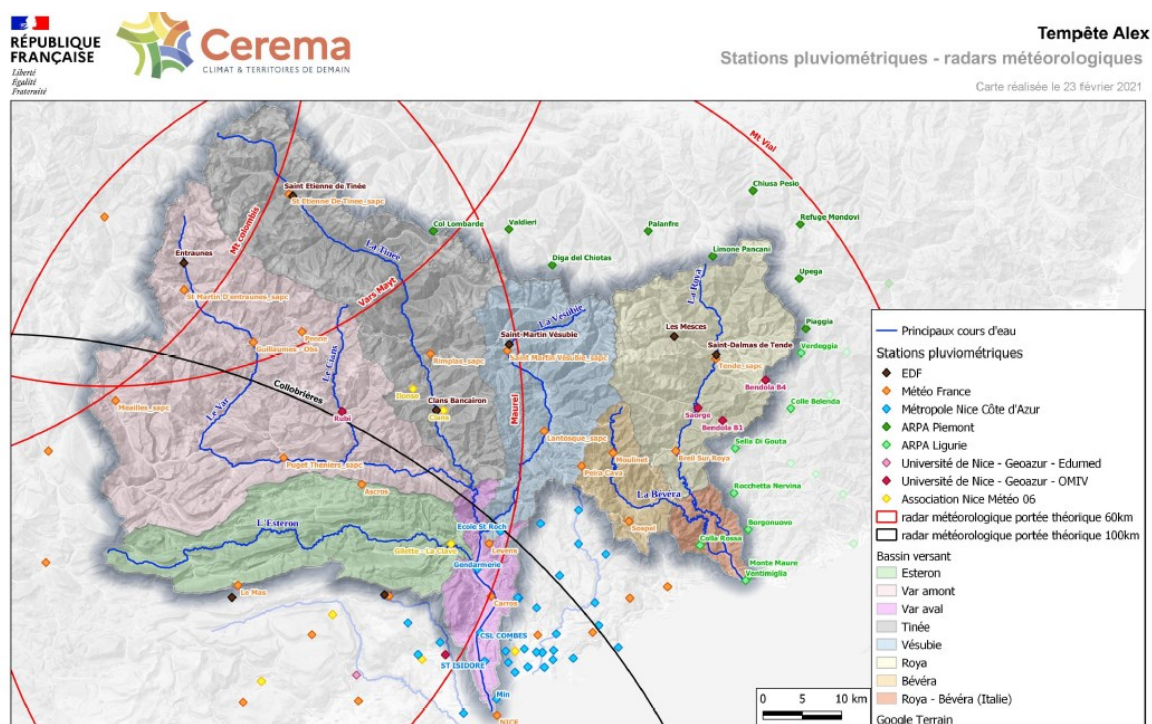
Le bassin versant est historiquement faiblement équipé en termes de stations de mesures pluviométriques (cf. Tableau 1, Figure 4, et CEREMA, 2021). Dans le cadre des projets Concert-Eaux et Concert-Eaux OPERA, un effort d'instrumentation a eu pour objectif de pallier ce déficit de données indispensables à toute étude hydrologique ou relative au transport solide, avec la mise en place de

<sup>2</sup> <https://meteofrance.com/comprendre-climat/france/les-situations-meteorologiques-types-en-france>  
[consulté le 29/07/2024]

l'Observatoire de la Roya<sup>3</sup> et un suivi en temps réel mis en place par le SMIAGE<sup>4</sup> (non accessibles au grand public).

Tableau 1. 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



Cerema Méditerranée [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr) Direction territoriale Méditerranée - 30 Avenue Albert Einstein - CS 70489 - 13293 AIX EN PROVENCE Cedex 3 - Tél : +33 (0)4 42 34 76 76  
Site social : C86 des PISSEIRS - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-06674 Biot Cedex - Tél : +33 (0)4 72 54 30 30

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

Figure 4. Instrumentation des bassins versants maralpins en termes de mesures pluviométriques.

Source : CEREMA, 2021

<sup>3</sup> <https://observatoire-nappe-roya.com/> [consulté le 22/07/2024]

<sup>4</sup> <http://supervision.smiage.fr> [consulté le 22/07/2024]

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

La géologie du bassin versant de la Roya est particulièrement complexe (cf. Figure 5) et mérite d'être analysée en même temps que la géomorphologie (cf. Figure 6).

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 5). Ces formations sont plus résistantes à l'érosion que les autres (lithofaciès du socle, en rose sur la Figure 6)
- A la pointe Nord, le massif du Marguaréis caractérisé par des formations karstiques (en rouge sur la Figure 6) 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 6)
- 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 6).

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 une grande partie, été utilisés dans le cadre de la reconstruction.

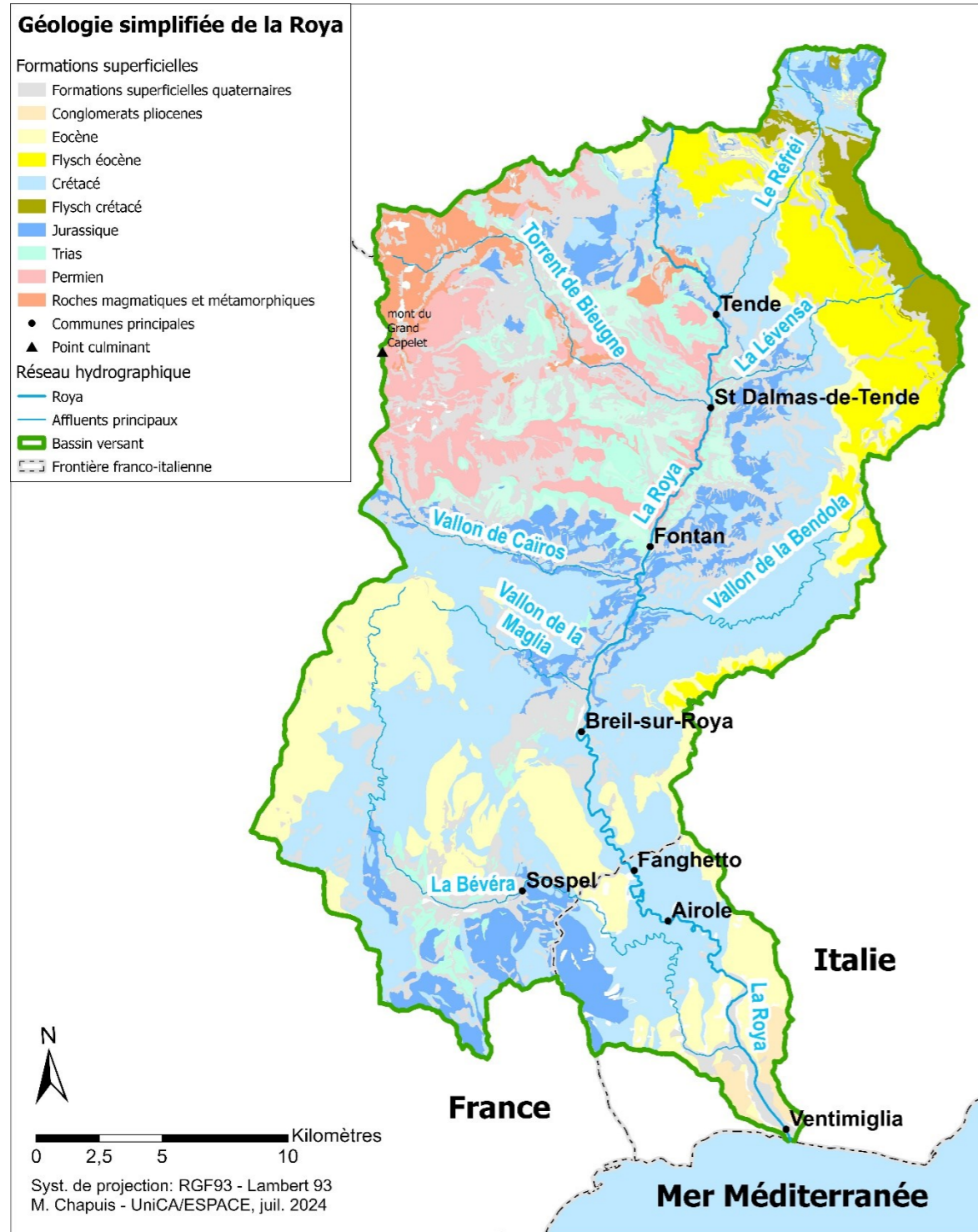
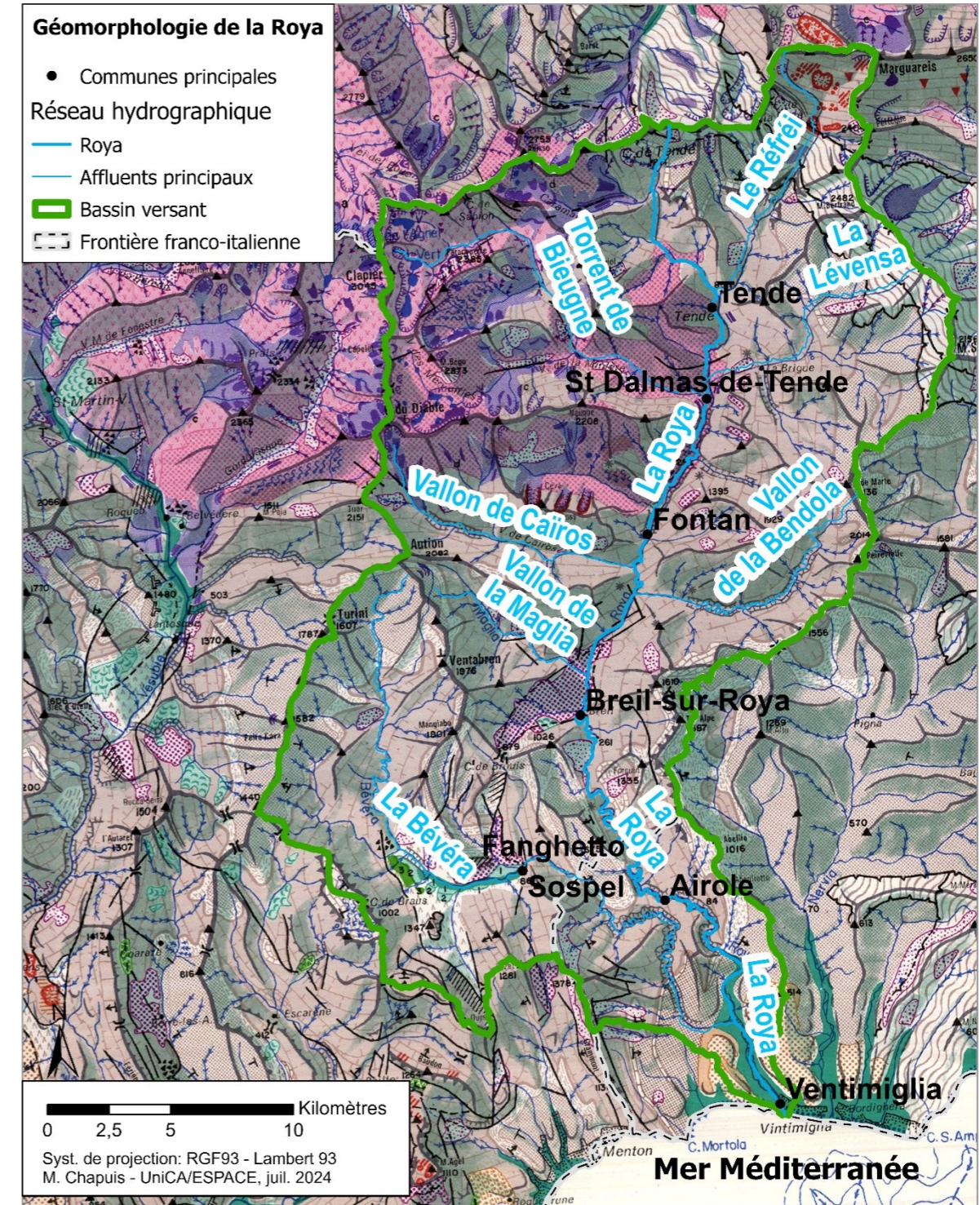


Figure 5. Géologie simplifiée du bassin versant de la Roya.

Sources : interprétation d'après la BD CHARM-50 (BRGM) pour la partie française ; pour la partie italienne, digitalisation et interprétation d'après le Carte Geologiche Regionali (CGR) scala 1:25000 – Ventimiglia e Dolceacqua, données issues du geoportale della Regione Liguria : <https://svcarto.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 6. 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](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 lithofaciés du socle sont de couleur rose, les lithofaciés 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.

## 1.2.5 Hydrologie

Du fait de la double influence alpine et méditerranéenne (régime méditerranéo-nival), l'hydrologie de la Roya est typique des cours d'eau maralpins avec une forte variabilité infra-annuelle (cf. Figure 7), couplée à une forte variabilité inter-annuelle (cf. Tableau 2 et Figure 8).

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 m<sup>3</sup>/s.

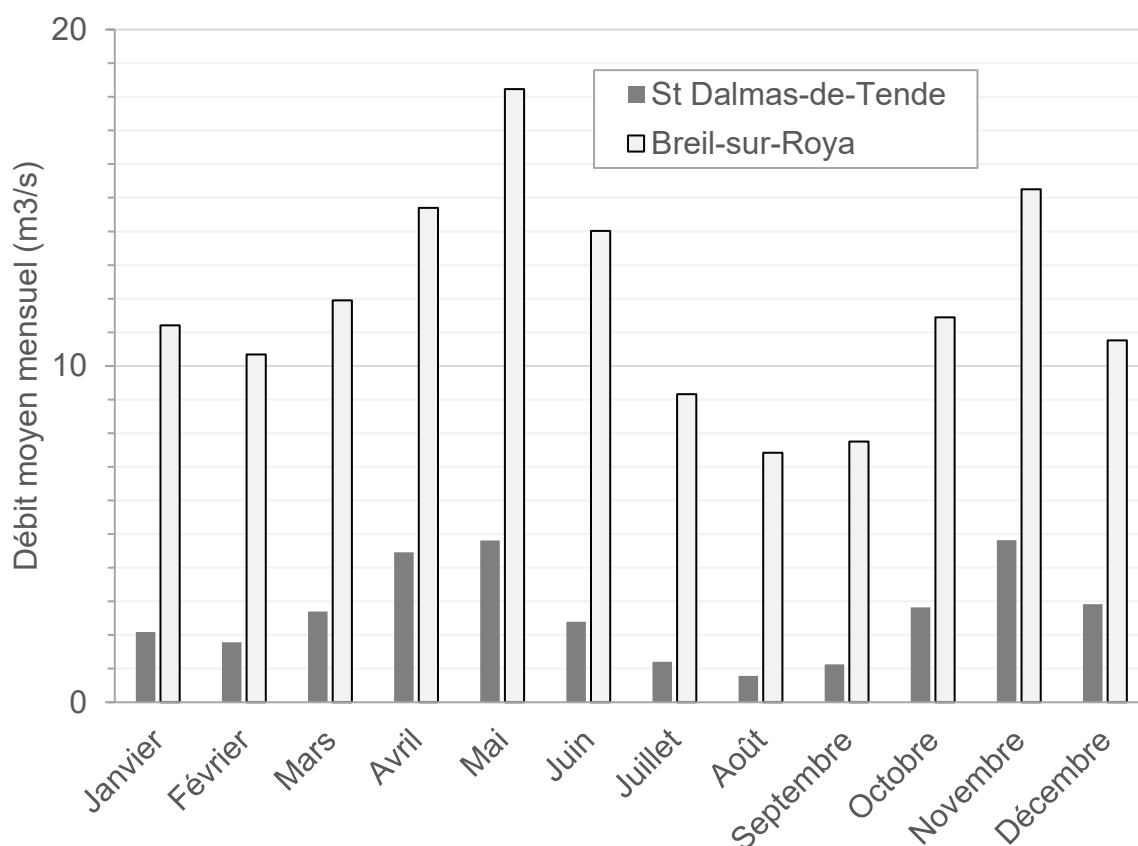


Figure 7. Débits moyens mensuels à St Dalmas-de-Tende (1985-2024, en gris) et Breil-sur-Roya (1969-2017, en blanc).

*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 2). 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 3).

Tableau 2. Débits (en m<sup>3</sup>/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	01/01/1985 23/07/2024	- 20/05/1960 23/07/2024	- 01/01/1969 - 31/12/2022	
Type de calcul	Q-X	QJ-X	QJ-X	
Nb de pts retenus	27	46	48	
Période de retour	Débit (m <sup>3</sup> /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 3. Valeur du module pour St Dalmas-de-Tende et Breil-sur-Roya.

Station	Période de mesure	Module (m <sup>3</sup> /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.

Débit instantané maximal n journalier (n=1, non glissant) - Données les plus valides de l'entité - Y661 4010 01 - La Roya à Tende [Saint-Dalmas-de-Tende] - du 01/01/1985 00:00 au 31/12/2021 23:59 (TU)

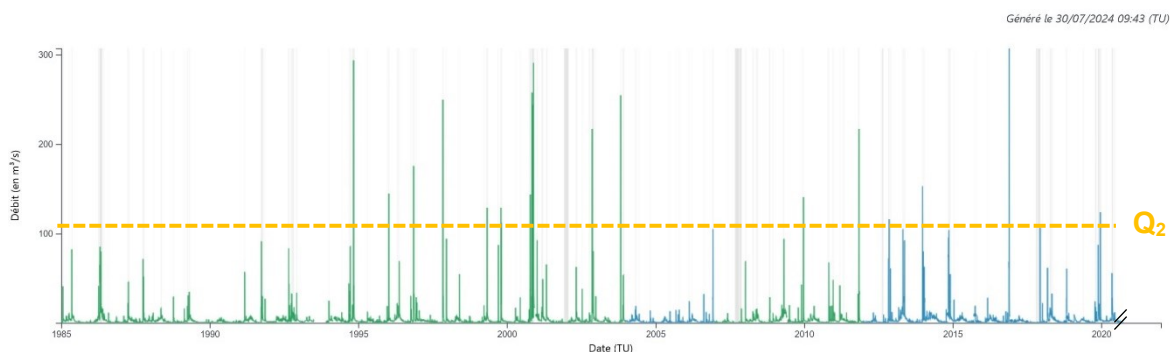


Figure 8. Débit instantané maximal à St Dalmas-de-Tende (1985-2021).

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 3.3) propose plutôt des valeurs basses vis-à-vis de cette gamme.

### 1.2.6 Aménagements anthropiques en lien avec la ressource en eau

Les aménagements anthropiques en Roya sont essentiellement liés aux infrastructures de production hydroélectrique (cf. Figure 9) : la retenue d'altitude principale est le barrage des Mesces, sur la Bieugne, à la confluence des vallons de la Minière et de Castérino<sup>5</sup>. 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 4).

---

<sup>5</sup>*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]

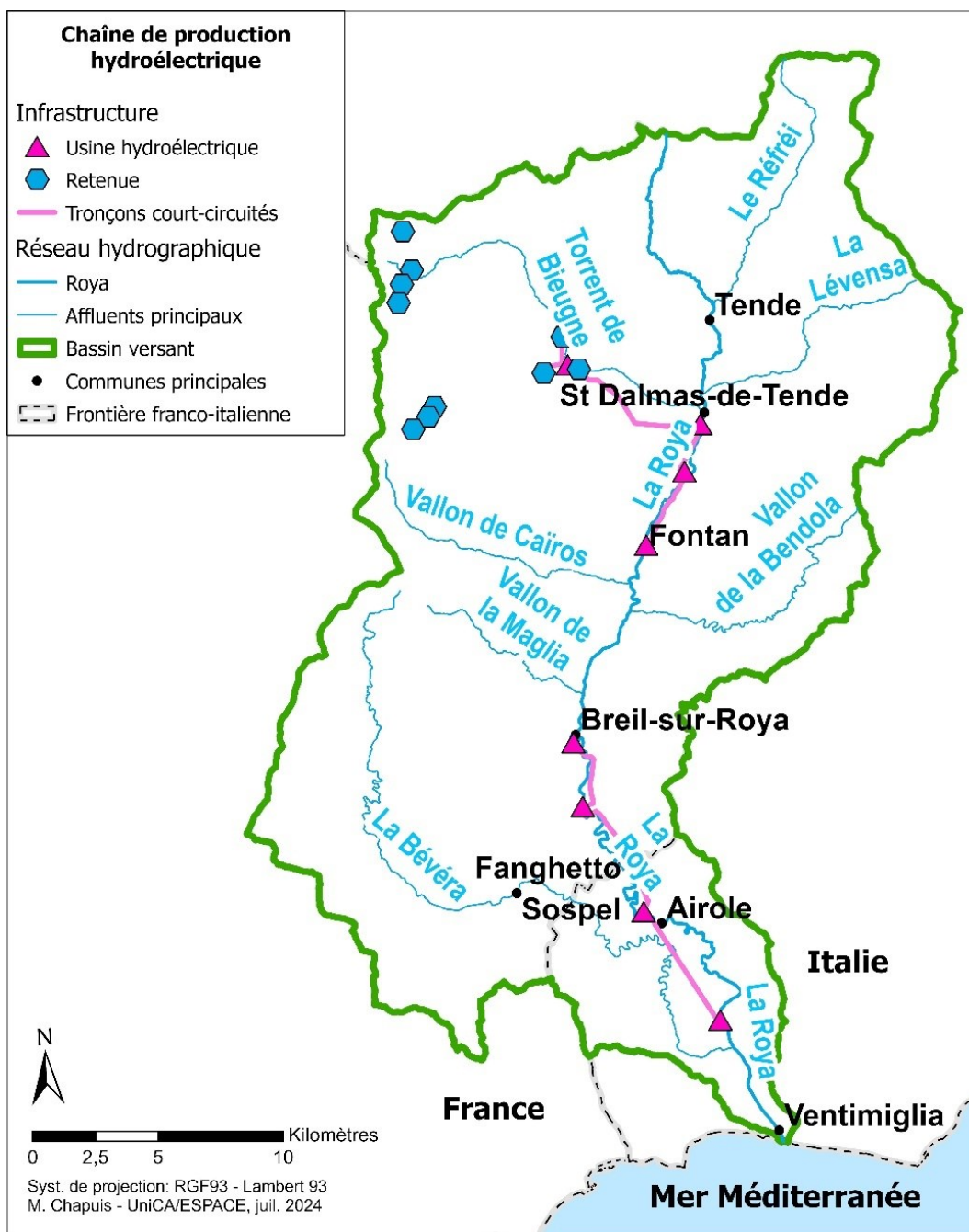


Figure 9. Chaîne de production hydroélectrique en Roya.

Sources : IGN, OpenStreetMap

Tableau 4. Mises en service des ouvrages de production hydroélectrique, depuis l'amont vers l'aval (cf. Figure 9).

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 10). 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).

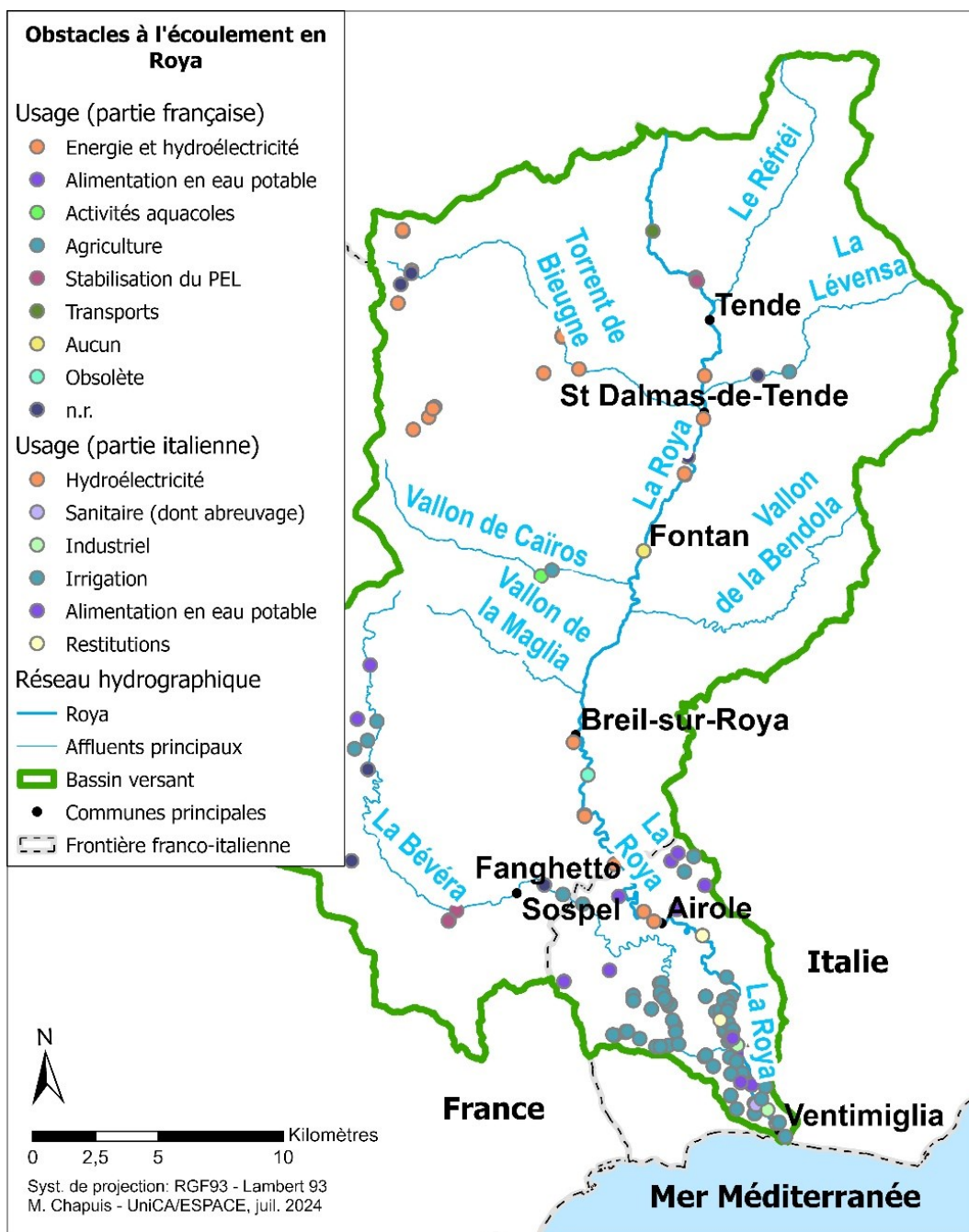


Figure 10. Obstacles à l'écoulement et leurs usages sur le bassin versant de la Roya. Dans la partie italienne, les dérivations sont largement à usage agricole et pour l'alimentation en eau potable (champ captant).

L'harmonisation des catégories d'usage entre parties française et italienne est proposée via un code couleur commun.

Sources : <https://www.sandre.eaufrance.fr> et <https://geoportal.regione.liguria.it>

## 1.2.7 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 versant<sup>6</sup>.

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 10).

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).

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<sup>e</sup> 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

---

<sup>6</sup> <https://fr.marittimemercantour.eu/histoire-et-culture/atlas-de-la-culture/25> [consulté le 31/07/2024]

tempête Alex de 2020, et depuis l'axe de communication routier Vintimille-Cuneo par 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 (*Achnantheidium pyrenaicum* et *Achnantheidium 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 de la Roya.

### *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 Bévéra<sup>7</sup>. 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.

---

<sup>7</sup> <https://www.mercantour-parcnational.fr/fr/actualites/presence-de-loutres-en-roya> [consulté le 31/07/2024]

## 2 Méthodologie

### 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 5, 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 5. 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
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 5 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'HydroPortail<sup>8</sup> (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 SMIAGE<sup>9</sup>, 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 Roya<sup>10</sup>.

## 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 d'études antérieures (exemple : 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 11) :

- 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.

---

<sup>8</sup> <https://hydro.eaufrance.fr/> [consulté le 22/07/2024]

<sup>9</sup> <http://supervision.smiage.fr> [consulté le 22/07/2024]

<sup>10</sup> <https://observatoire-nappe-roya.com/> [consulté le 22/07/2024]

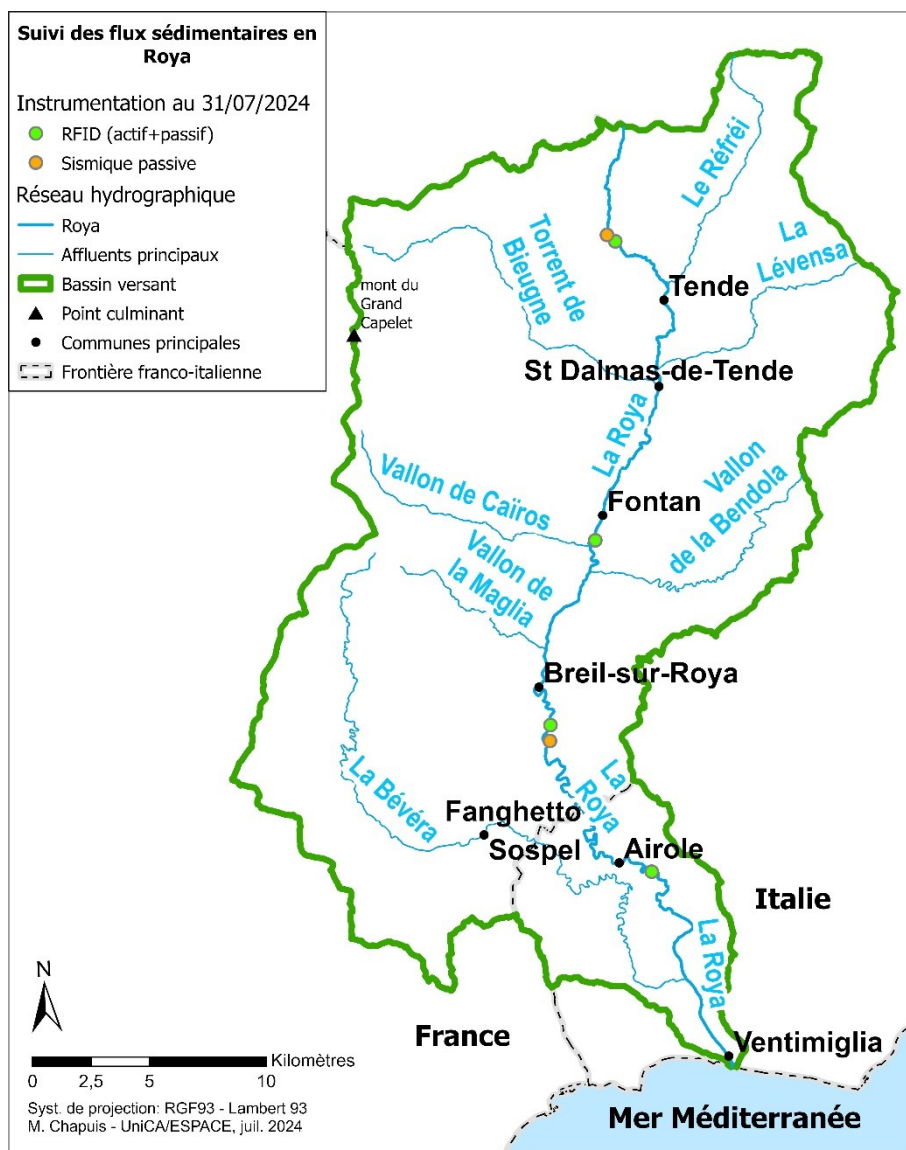


Figure 11. Sites instrumentés en Roya dans le cadre des projets Interreg Alcotra Concert-Eaux (2017-2020) et Concert-Eaux OPERA (2023-2024).

Sont indiqués les secteurs d’implantation des traceurs RFID, et la localisation des 2 géophones installés (suivi en continu par sismique passive, cf. section 2.3).

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 2.3) 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 3.2).

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 m<sup>2</sup>
  - 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.

## 2.3 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, nous avons 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 nous avons 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 11). 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 ; Missot 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. A noter que d'autres dispositifs sismiques, non dédiés au suivi du transport sédimentaire en Roya, ont aussi détecté l'événement (Chmiel et al., 2022). 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 6. 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 12) : 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 6. Spécifications techniques des géophones installés en Roya.

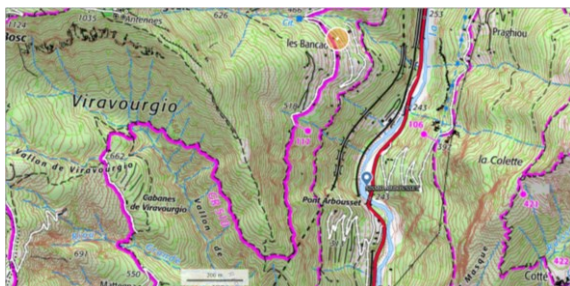
Site d'installation	Arbousset	Viévol
Date d'installation	23/06/2024	28/05/2024

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 <sup>3</sup> . Enregistrement sur une unique composante (z).	idem
Centrale d'acquisition	Digos DATA-CUBE <sup>3</sup> 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) Arbousset, 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 Viévolà, la vue est prise vers l'amont et le géophone est localisé en rive droite (à gauche de la photo). Cliché juil. 2024.



(c) Arbousset. 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](http://www.geoportail.gouv.fr), IGN 2023 [carte produite le 26/07/2024].



(d) Madone de Viévolà. 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](http://www.geoportail.gouv.fr), IGN 2023 [carte produite le 26/07/2024].

Figure 12. Situation géographique des géophones installés en Roya. (a) et (c) Site de l'Arbousset. (b) et (d) Site de Viévolà.

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) et optimisée par F. Lombard (ESPACE-AMU). 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).

## 3 Résultats

### 3.1 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 11 : 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 13), 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 13).

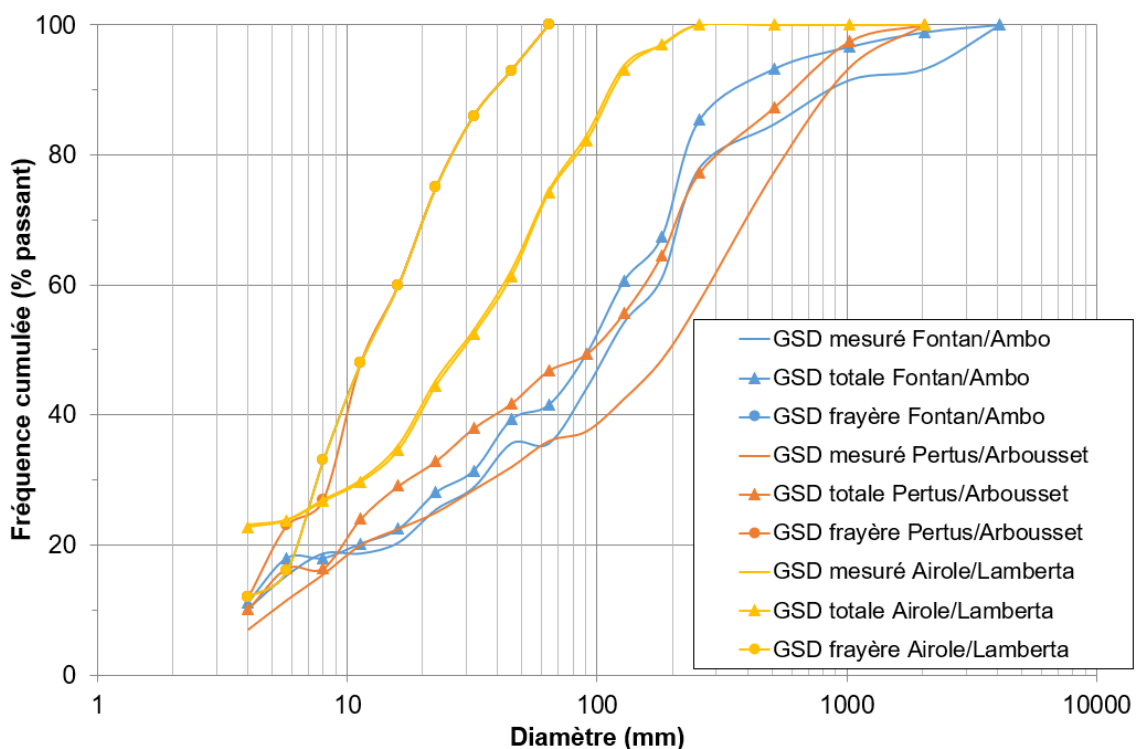
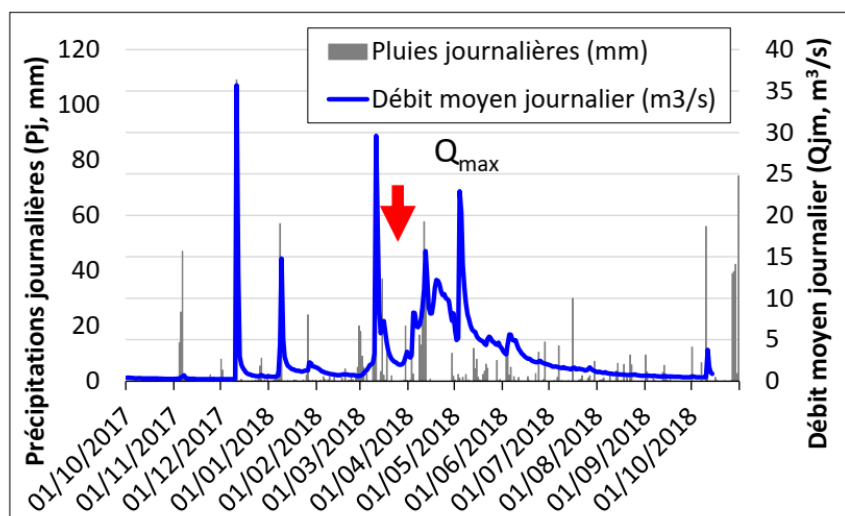


Figure 13. Distributions granulométriques (GSD, Grain Size Distribution) sur les 3 sites d'étude Fontan/Ambo, Pertus/Arbousset et Airole/Lamberta.

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 =  $63 \text{ m}^3/\text{s}$  le 04/05/2018, cf. Figure 14) qui remobilisé l'ensemble du matériel du lit de diamètre  $< 512 \text{ mm}$  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 15) et sur le site d'Airole/Lamberta (cf. Figure 16). 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 14. 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.

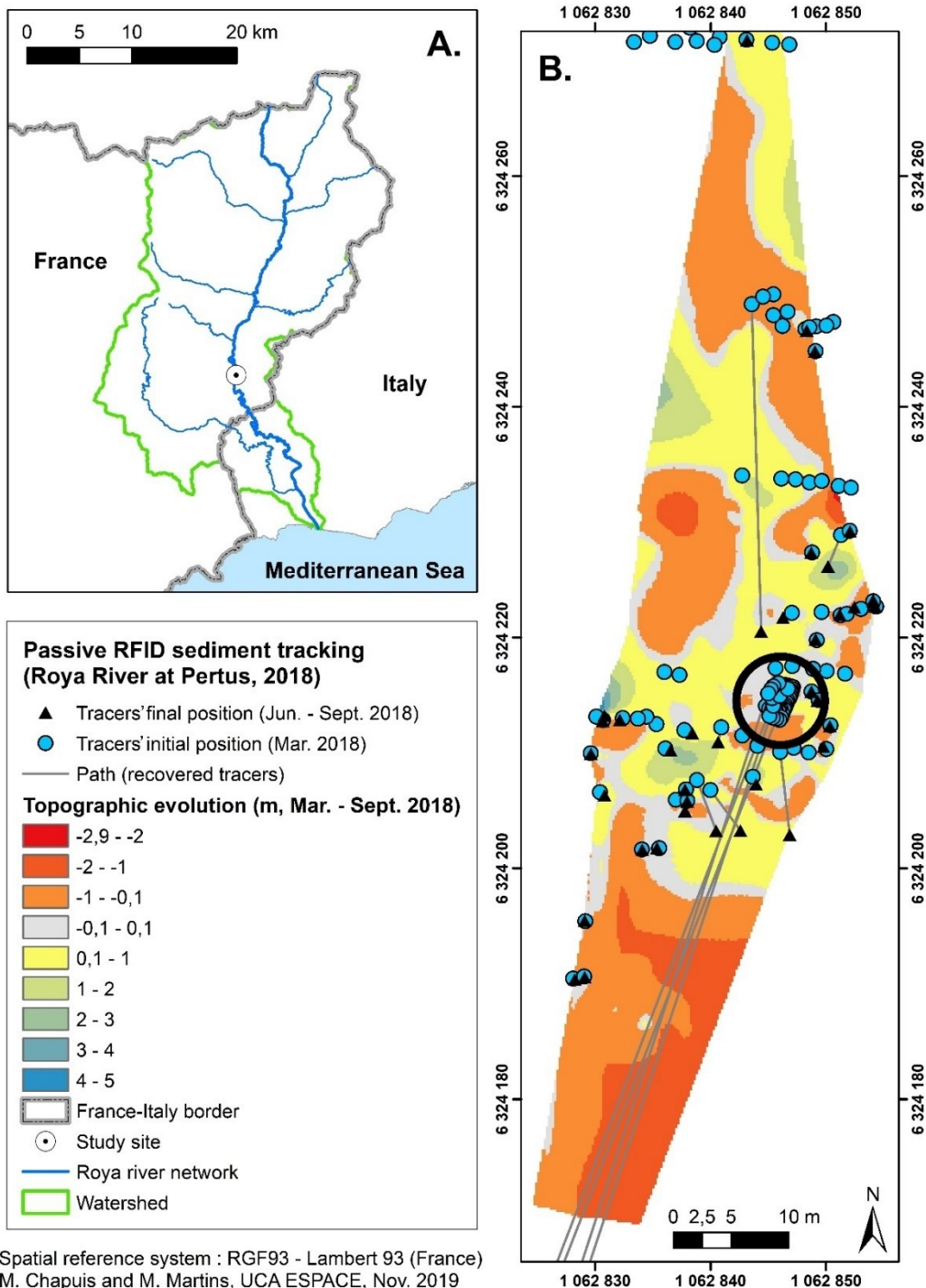


Figure 15. Résultats du traçage sédimentaire 2018 à Pertus. (a) Site d'étude : la Roya à Pertus. (b) Positions initiale, position finale, déplacement des traceurs retrouvés, et évolution topographique de la zone entre mars et sept. 2018.

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.

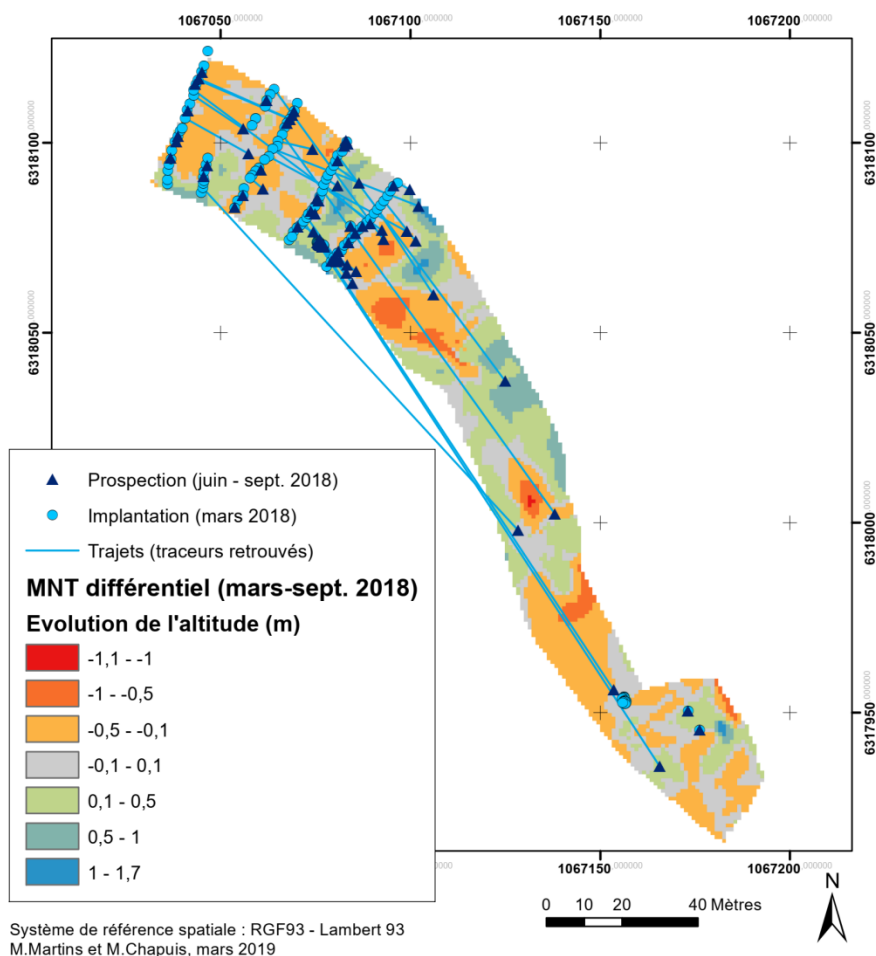


Figure 16. Résultats du traçage sédimentaire 2018 sur le site d'Airole/Lamberta.

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 =  $133 \text{ m}^3/\text{s}$  le 24/04/2019), qui a elle aussi remobilisé l'ensemble du matériel du lit de diamètre < 512 mm.

Tableau 7. 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 7), 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 11). 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 4). 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 8 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 8. 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 3.2), 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).

### 3.2 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 et Martins, 2019). Les sites de Fontan/Ambo et Pertus ont subi immédiatement après implantation une crue de printemps de 133 m<sup>3</sup>/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 est présenté dans le Tableau 9. 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 9. 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 <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	Viévola	/	/	/	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

<sup>μ</sup> : en attente de données pour validation

<sup>£</sup> : à St Dalmas

Tableau 10. 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 17 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).

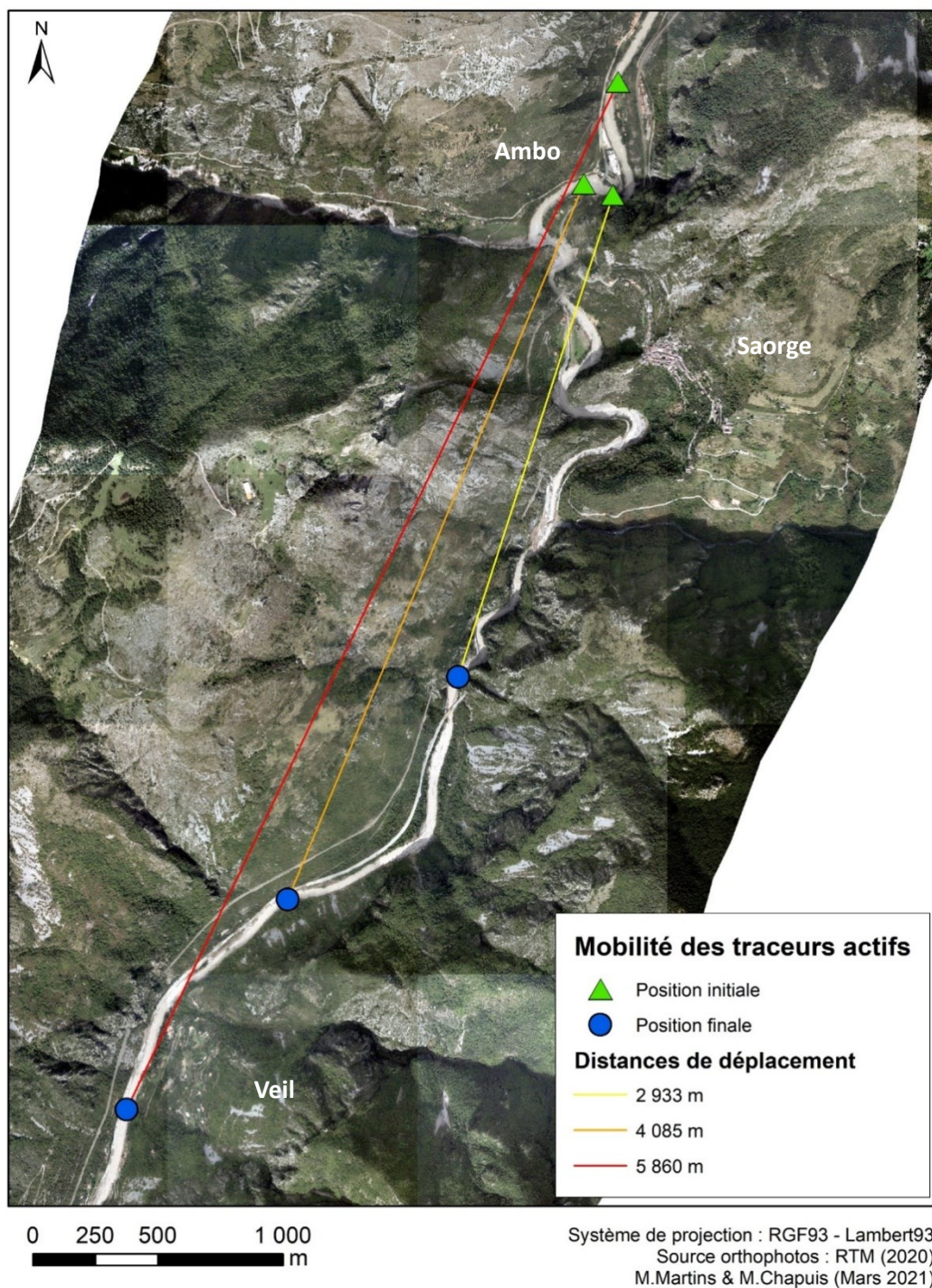


Figure 17. Cartographie des résultats du traçage sédimentaire par RFID active post-Alex (campagne 2021) pour les traceurs initialement situés sur le site Fontan/Ambo.

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.  
Modifié d'après Martins et Chapuis, 2021.

### 3.3 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, nous avons 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 2.3) 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 (Viévolle le 28/05/2024, cf. Figure 11 et Tableau 6).

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 18) :

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

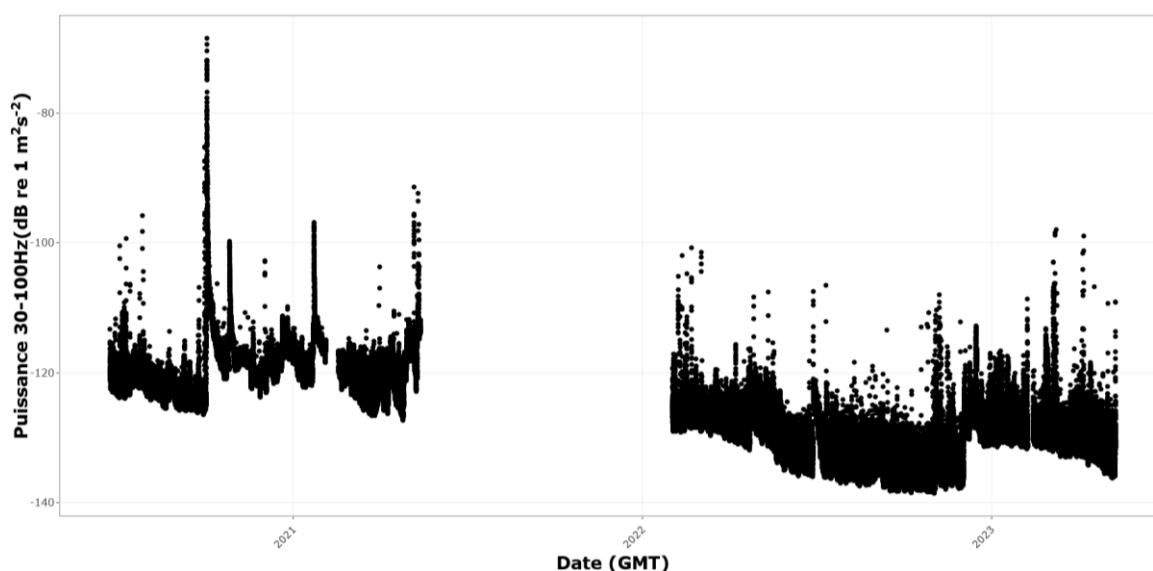


Figure 18. Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 24/06/2020 et le 11/05/2023. On notera en particulier l'épisode de transport solide associé à la tempête Alex du 02/10/2020.

*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 2.3, 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 19). 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.

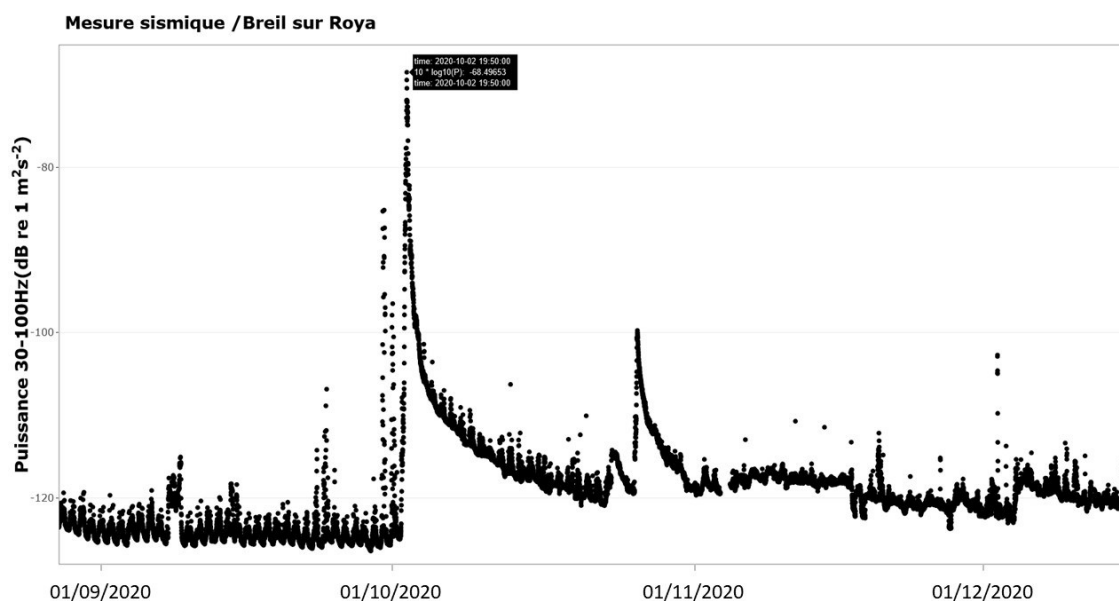


Figure 19. Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 28/08/2020 et le 16/12/2020. On notera en particulier l'épisode de transport solide associé à la tempête Alex du 02/10/2020 dont l'unique pic mesuré est situé vers 19h50 à l'aval de Breil.

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 19 et Figure 20). 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 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 19).

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 18, Figure 19, Figure 20 et Figure 21a). 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 3.2 et particulièrement Tableau 9). 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 20 et Figure 21a).

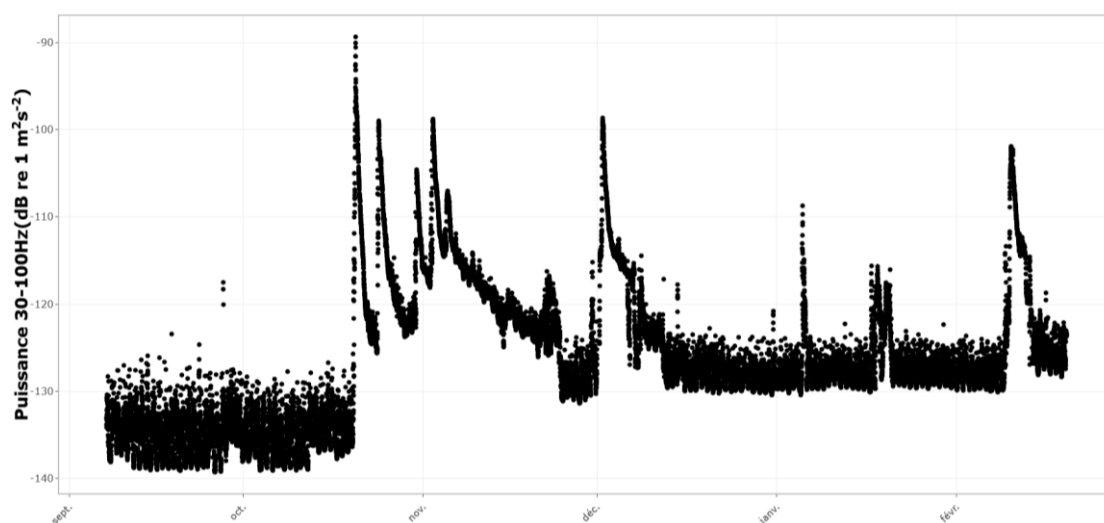
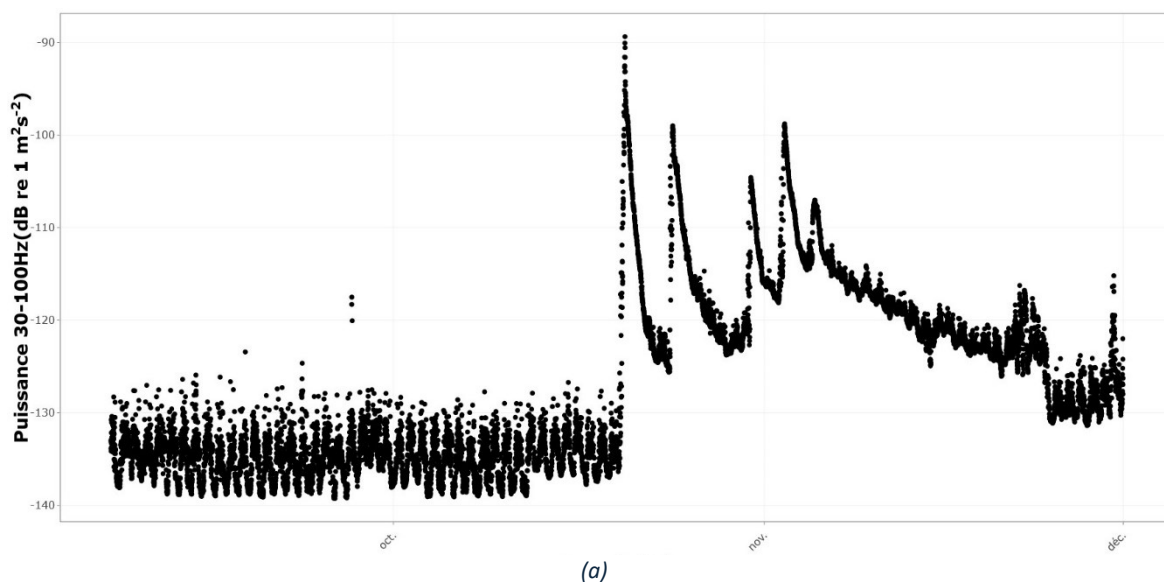


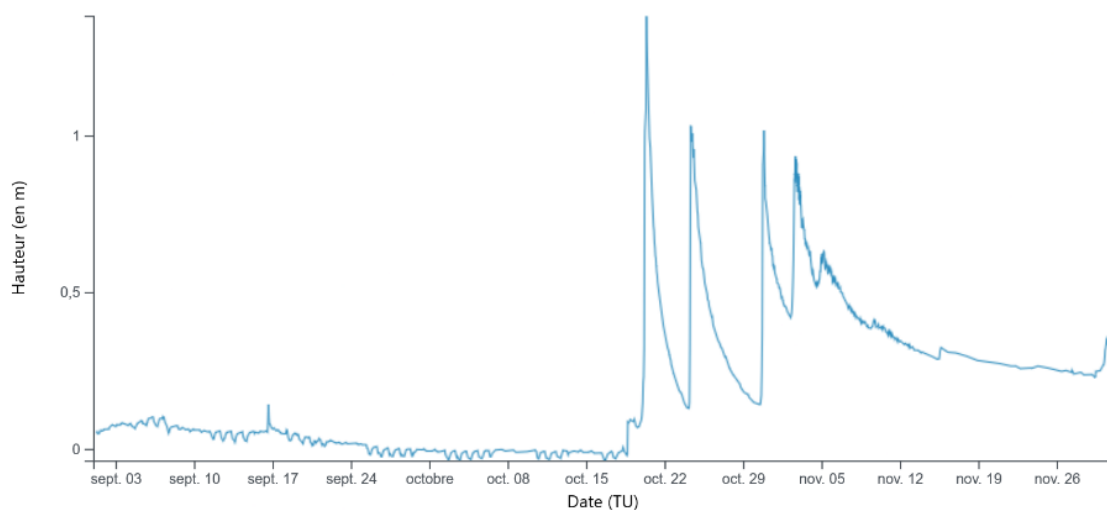
Figure 20. Résultats du suivi par sismique passive sur le secteur de l'Arbousset entre le 07/09/2023 et le 20/02/2024. On notera en particulier l'épisode de transport solide associé à la « tempête Aline » fin octobre 2023.

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 21. (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 20) 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 11).

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).

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).

## 4 Discussion et perspectives

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

#### 4.1.1 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-Tarrio et al. (2018).

On peut tout de même tirer des enseignements du traçage actif, notamment en dégagant 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 22), et ce même sans inclure les résultats liés à l'épisode de période de retour 1000 ans du 02/10/2020.

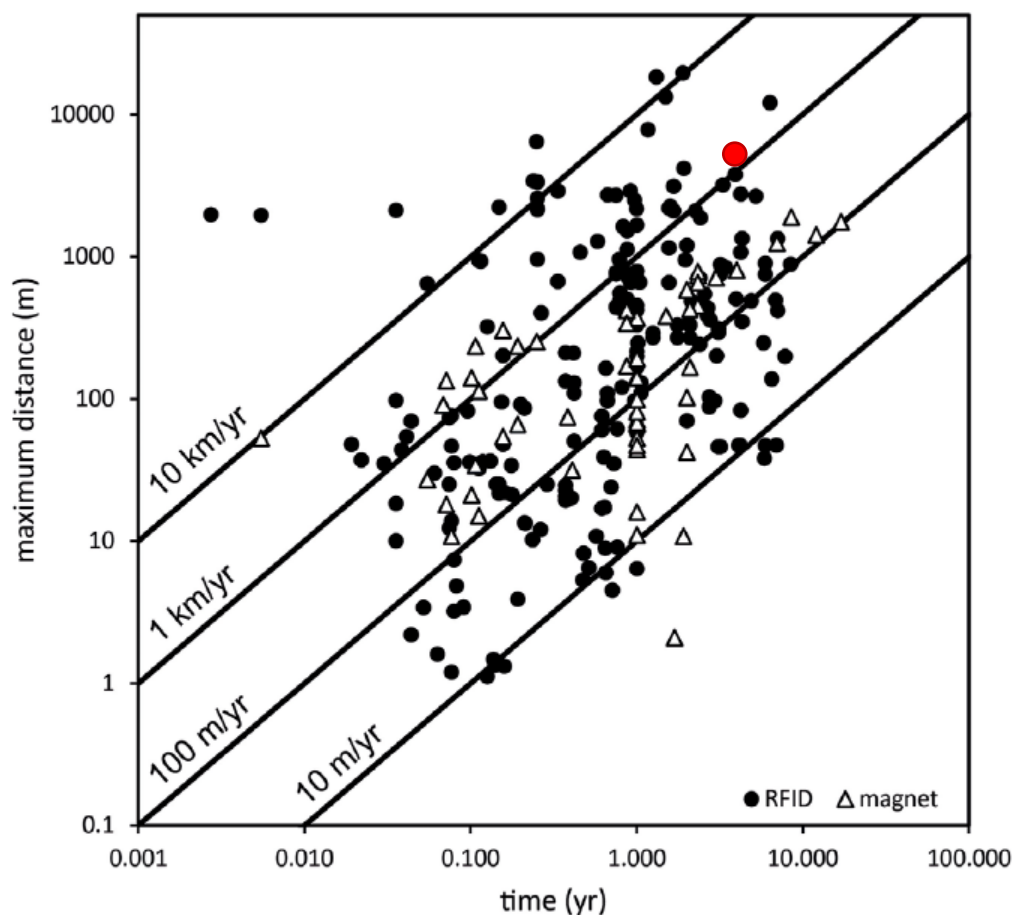


Figure 22. Relation entre distance maximale de transport et durée du suivi pour des études de traçage sédimentaire par RFID (cercles,  $n=207$ ) ou traceurs magnétiques (triangles,  $n=55$ ). Notre suivi se situe dans la gamme indiquée par le cercle rouge, ce qui confirme que la Roya est un système très 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 précaution 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 23).

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.

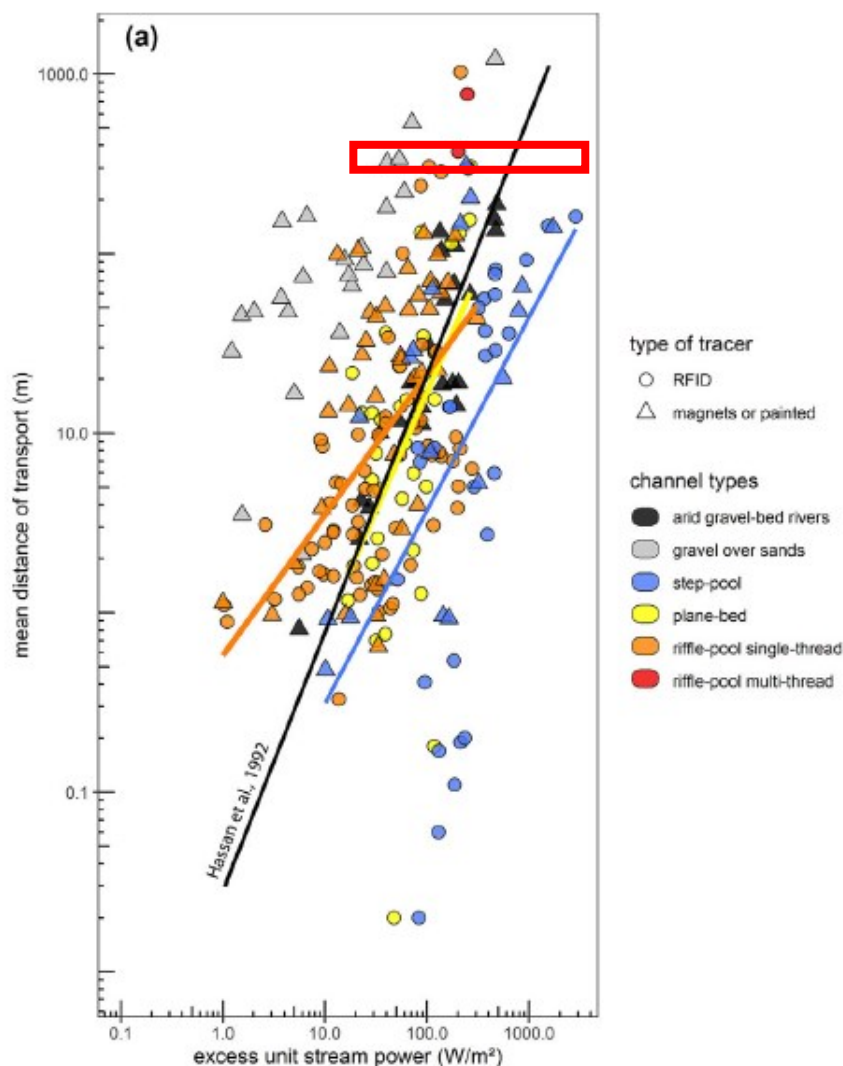


Figure 23. Relation entre distance moyenne de transport et puissance spécifique pour des études de traçage sédimentaire. Les résultats du Tableau 9 et du Tableau 10 indiquent des distances de transport moyennes de l'ordre de 300 à 400 m/an sur 4 ans tant sur le secteur amont que sur le secteur aval (morphologie 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

#### 4.1.2 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 3.2).

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 (financement Université Côte d'Azur 2025) en collaboration avec S. Migeon (Géoazur) vise justement à aller prospecter le plateau continental à l'exutoire de la Roya. 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 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.

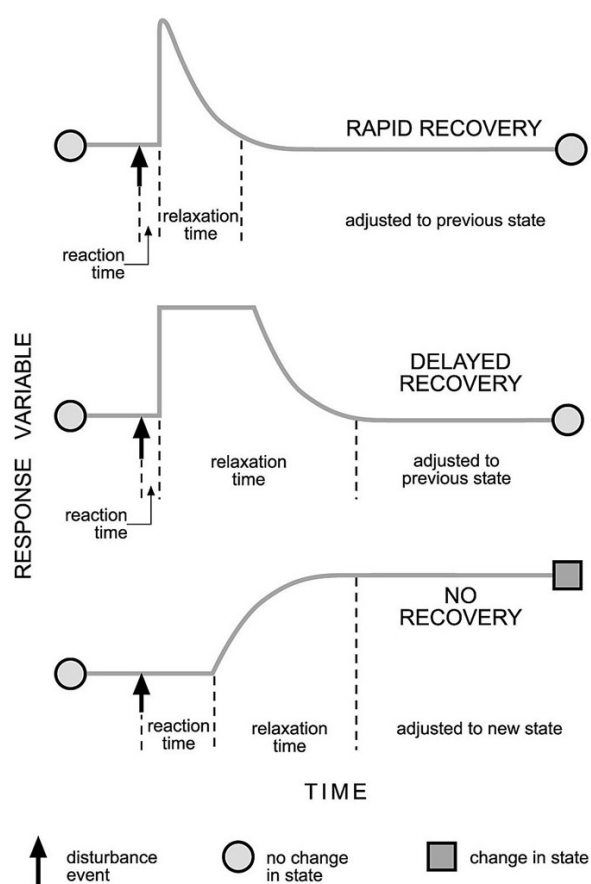
Une autre hypothèse de travail à approfondir lors des prochains suivis consiste à évaluer dans quelle mesure les traceurs « non retrouvés » ont une forte probabilité d'être enfouis trop profondément pour être détectés. En effet, avant la tempête Alex, l'hypothèse de travail était que le substratum étant 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 évoqué plus haut.

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 3.3) : 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 24). 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 24. 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 4.3). A noter que cette éventuelle stabilisation du lit ne semble pour l'instant pas confirmée par les résultats de la sismique (cf. section 3.3).

### 4.1.3 Perspectives de poursuite du suivi RFID

Nous prévoyons 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 nous disposons à l'heure actuelle 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 m<sup>3</sup>/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.

## 4.2 Modèle conceptuel des flux hydro-sédimentaires à l'échelle du 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 25). Il a notamment servi de support pour élaborer une réflexion sur les priorités de gestion des flux sédimentaires en Roya italienne (Regione Liguria, 2021).

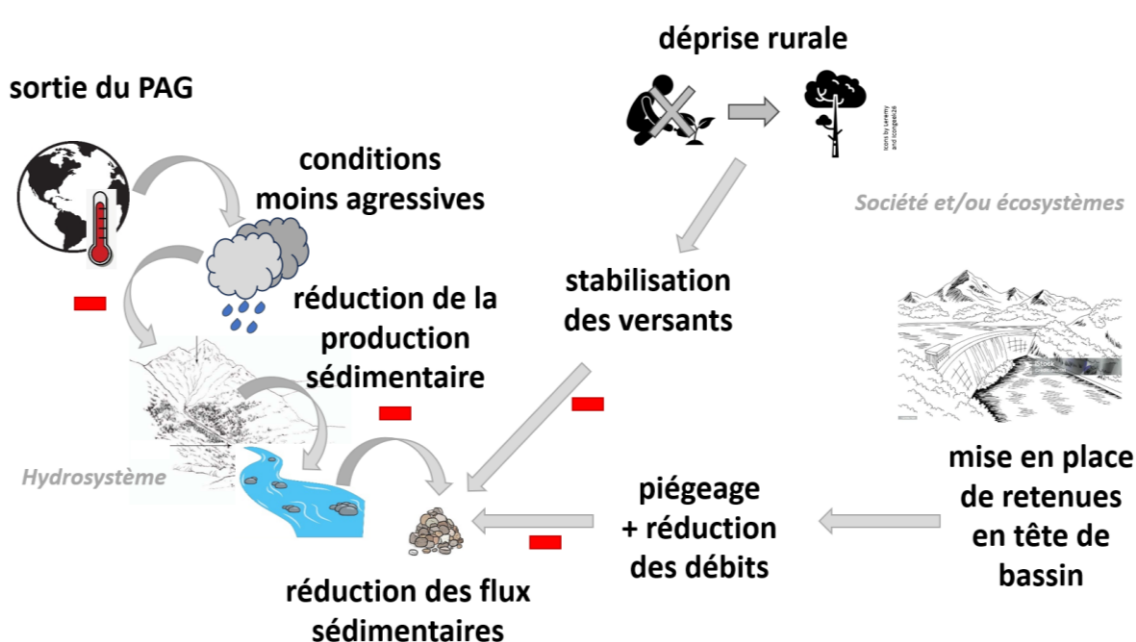


Figure 25. Modélisation conceptuelle de l'influence du changement climatique sur les flux hydro-sédimentaires en Roya suite à la sortie du Petit Âge Glaciaire (PAG). Effet d'accentuation (+) vs. effet d'atténuation (-).

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, Payrastra 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 26).

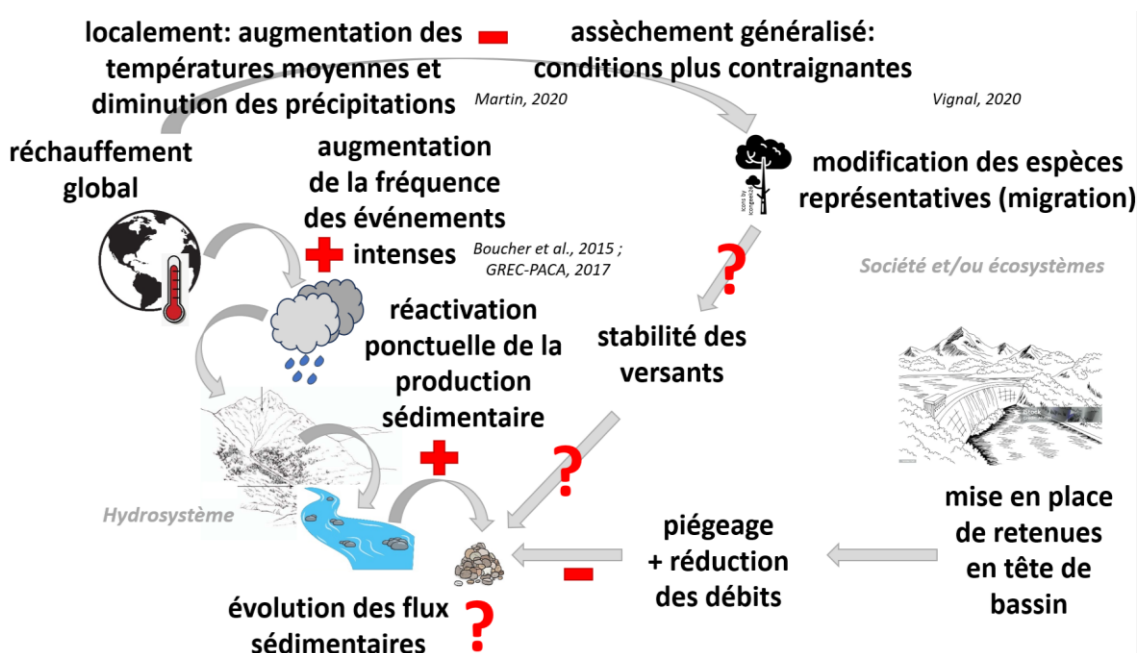


Figure 26. Réajustement du modèle conceptuel des flux hydro-sédimentaires en Roya suite aux précipitations de période de retour 1000 ans survenues le 02/10/2020. Effet d'accentuation (+) vs. effet d'atténuation (-) vs. effet indéfini (?).

## 4.3 Au sujet de la gestion des flux sédimentaires en Roya

### 4.3.1 Temps de relaxation, résilience et trajectoire du système

Comme évoqué en fin de section 3.2, la question de la résilience du système post-crise 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 24) 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 27) 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).

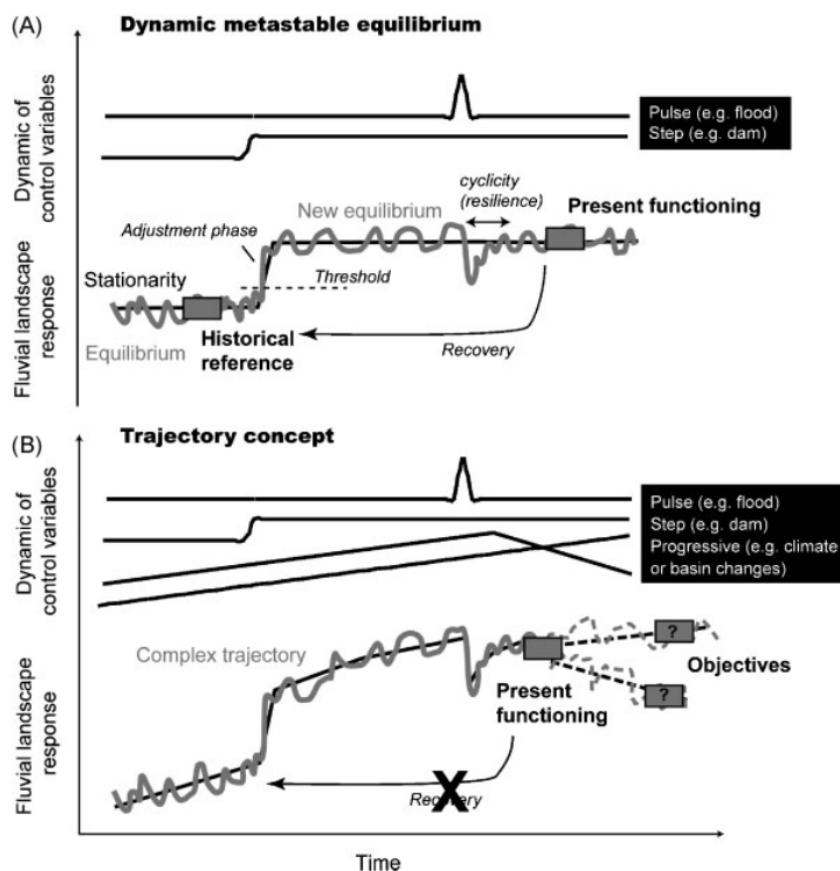


Figure 3. Fluvial landscape evolution results from the combination of numerous control variables ; thus it follows a complex trajectory that justifies moving from a reference-based strategy to an objective-based strategy in restoration schemes

Figure 27. 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 3.2). Mais les données de la sismique (cf. section 3.3) 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).

### 4.3.2 Enjeux de la reconstruction

D'un point de vue écologique (puisqu'il semble essentiel de ne pas dissocier les approches géomorphologique et écologique), 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) 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. Genevier 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 rapport. Dans la lignée de l'approche de la GEMAPI (GEstion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations<sup>11</sup>) 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

---

<sup>11</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/gestion-milieux-aquatiques-prevention-inondations-gemapi> [consulté le 06/08/2024]

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.

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. Nous avons 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 notre 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 4.2). 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.

#### 4.3.3 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'attribution<sup>12</sup>) ; retenons seulement que de tels événements extrêmes deviendront plus intenses et fréquents (cf. Boucher et al., 2015 ; GREC-PACA, 2017 ; Jia et al., 2019).

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.

---

<sup>12</sup> <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. Figure 26)
- 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.

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.

## 4.4 Perspectives de suivi des flux sédimentaires en Roya

En termes de perspectives de suivi, et pour synthétiser les éléments mentionnés dans les sections 2.3 et 3, nous reprenons ci-après les éléments-clefs qui dessinent notre investissement en termes d'instrumentation et de monitoring de terrain en Roya au-delà de l'horizon 2027.

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 4.1). 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 nous renouvelions 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 nous semblera suffisant pour contribuer, à notre échelle, à une meilleure compréhension de la dynamique de la charge grossière en contexte torrentiel.

Concernant la sismique passive, et comme mentionné en section 2.3, nous venons tout juste d'installer un 2<sup>e</sup> géophone sur le bassin versant de la Roya et comptons installer la télétransmission des données très rapidement pour les 2 instruments (matériel acquis, en cours de déploiement). Nous pensons donc recentrer nos 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 météorologique via la calibration d'une instrumentation *low-cost* (collaboration OMEAA/EVS).

## Références bibliographiques

- 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., Missot 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>
- 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.
- Bernard, 1925. *Cours de restauration des montagnes*. Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Nancy. In Meunier M., 2023. *Éléments d'hydraulique torrentielle*. Editions Quae (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>
- 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.
- Boucher O., Dufresne J.-L., Vial J., Brun E., Cattiaux J., Chauvin F., Salas y Mélia D., Voldoire 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](https://lameteorologie.fr/issues/2015/88/meteo_2015_88_56)
- 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.
- Brigode P., Vigoureux S., Delestre O., Nicolle P., Payrastre 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>
- 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.
- 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., 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](https://youtu.be/jTr-2_LamPI)
- 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<sup>e</sup> 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., 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. 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>
- 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., 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<sup>e</sup> 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., Courboulex 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>
- 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].
- 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., 2022b. Hydromorphological analysis on restored Alpine braided rivers. *Geomorphology*, 415, pp. 108404. <https://hal.science/hal-03794714>
- 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>
- 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.
- 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.
- 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>
- 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>
- 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<sup>e</sup> en couleurs. Présentation succincte. *Méditerranée*, deuxième série, tome 28, 1-1977. pp. 45–53. <https://doi.org/10.3406/medit.1977.1709>
- 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>
- 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]
- 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., 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., 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 Vésubie and Roya valleys. *Geomorphology*, 446, pp. 109008. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109008>
- 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>
- Maison Régionale de l'Eau, 2018. La Roya. <https://aquatheque.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.
- 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>
- 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. *Eléments d'hydraulique torrentielle*. Editions Quae (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>
- 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>
- 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
- 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., Sevrez 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>
- 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>
- 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>
- l'estimation du transport sédimentaire : premiers retours d'expérience. *La Houille Blanche*, 4, 110–116. <https://doi.org/10.1051/lhb:2008047>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- Vázquez-Tarrió 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>

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., McArdeil 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. Le bassin versant de la Roya dans le cadre de la Riviera méditerranéenne. ....	6
Figure 2. Topographie du bassin versant de la Roya et affluents principaux.....	8
Figure 3. Cumul journalier des précipitations à Tende entre le 25/11/2015 et le 30/06/2024 (en mm).9	
Figure 4. Instrumentation des bassins versants maralpins en termes de mesures pluviométriques. ..	10
Figure 5. Géologie simplifiée du bassin versant de la Roya.....	12
Figure 6. Extrait de la carte géomorphologique du bassin versant de la Roya (Julian, 1977). ....	12
Figure 7. Débits moyens mensuels à St Dalmas-de-Tende (1985-2024, en gris) et Breil-sur-Roya (1969-2017, en blanc). ....	13
Figure 8. Débit instantané maximal à St Dalmas-de-Tende (1985-2021). ....	14
Figure 9. Chaîne de production hydroélectrique en Roya. ....	16
Figure 10. 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). ....	18
Figure 11. Sites instrumentés en Roya dans le cadre des projets Interreg Alcotra Concert-Eaux (2017-2020) et Concert-Eaux OPERA (2023-2024). ....	24
Figure 12. Situation géographique des géophones installés en Roya. (a) et (c) Site de l'Arbousset. (b) et (d) Site de Viévol. ....	28
Figure 13. Distributions granulométriques (GSD, Grain Size Distribution) sur les 3 sites d'étude Fontan/Ambo, Pertus/Arbousset et Airole/Lamberta. ....	30
Figure 14. Précipitations journalières et débit moyen journalier à St Dalmas-de-Tende, 01/10/2017 – 30/04/2018.....	31
Figure 15. 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. ....	32
Figure 16. Résultats du traçage sédimentaire 2018 sur le site d'Airole/Lamberta. ....	33
Figure 17. Cartographie des résultats du traçage sédimentaire par RFID active post-Alex (campagne 2021) pour les traceurs initialement situés sur le site Fontan/Ambo. ....	38
Figure 18. 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.....	39
Figure 19. 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. ....	41
Figure 20. 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. ....	41
Figure 21. (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. ....	42
Figure 22. 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. .... 44

Figure 23. Relation entre distance moyenne de transport et puissance spécifique pour des études de traçage sédimentaire. Les résultats du Tableau 9 et du Tableau 10 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..... 45

Figure 24. Les différentes réponses possibles d'un système fluvial suite à une perturbation, en fonction de sa capacité d'ajustement..... 47

Figure 25. 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 (-)..... 49

Figure 26. 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 (?). .... 50

Figure 27. 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. .... 51



## Liste des tableaux

Tableau 1. Date de mise en service de quelques stations pluviométriques sur le bassin versant (non exhaustif).....	10
Tableau 2. Débits (en m <sup>3</sup> /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.....	14
Tableau 3. Valeur du module pour St Dalmas-de-Tende et Breil-sur-Roya. ....	14
Tableau 4. Mises en service des ouvrages de production hydroélectrique, depuis l'amont vers l'aval (cf. Figure 9).....	16
Tableau 5. 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. ....	22
Tableau 6. Spécifications techniques des géophones installés en Roya.....	26
Tableau 7. Bilan des campagnes de suivi RFID passive 2018 et 2019. ....	34
Tableau 8. Synthèse du déploiement de traceurs RFID passifs post-Alex à l'été 2021.....	35
Tableau 9. 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. ....	36
Tableau 10. 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. ....	37

Interreg Alcotra 2023-2024

## Progetto Concert-Eaux OPERA

WP 3.1.b, sezione “Analisi dei flussi sedimentari  
e impatto della tempesta Alex”

# Trasporto sedimentario in un bacino idrografico a regime montano sotto influenza mediterranea (Roya, Alpi Marittime, Francia)

Rapporto finale del 09/01/2025

*(traduzione automatica dall'originale francese ricontrollata da  
Dott. Geol. Rolando Pozzani e Margot Chapuis; in caso di  
dubbio, la versione francese fa fede)*

Autrice del rapporto : M. CHAPUIS

Altri membri CNRS UMR 7300 ESPACE coinvolti:

C. ADNES, M. BANITALEBI, S. CADET-MARTHE, D. FOX, F. LOMBARD, M.  
WEILAND





## Indice

1	Contesto.....	5
1.1	Contesto dello studio.....	5
1.2	Presentazione del bacino idrografico del Roia.....	6
1.2.1	Contesto geografico generale.....	6
1.2.2	Topografia e organizzazione della rete idrografica.....	7
1.2.3	Clima.....	8
1.2.4	Geologia, geomorfologia e sensibilità delle formazioni superficiali all'erosione.....	10
1.2.5	Idrologia.....	13
1.2.6	Infrastrutture antropiche in relazione alla risorsa idrica.....	15
1.2.7	Uso del suolo, vegetazione e biodiversità.....	18
2	Metodologia.....	21
2.1	Procedura metodologica generale.....	21
2.2	Metodologia generale del tracciamento sedimentario tramite RFID.....	22
2.3	Monitoraggio dei flussi sedimentari tramite sismica passiva.....	25
3	Risultati.....	28
3.1	Dinamica sedimentaria delle zone di frega nel Roia: contributi di un monitoraggio tramite RFID passivo.....	28
3.2	Trasporto solido dell'intera distribuzione granulometrica: elementi di conoscenza derivanti da un'operazione pluriennale di tracciamento sedimentario, discussioni e prospettive di ricerca.....	35
3.3	Studio dei flussi sedimentari nel Roia: elementi di conoscenza derivanti dal monitoraggio tramite sismica passiva, discussioni e prospettive di ricerca.....	38
4	Discussione e prospettive.....	43
4.1	Sul monitoraggio dei flussi sedimentari nel Roia tramite tracciamento RFID.....	43
4.1.1	Distanze di trasporto nel Roia: messa in prospettiva dei risultati.....	43
4.1.2	Basso tasso di recupero del tracciamento RFID: ipotesi e prospettive di ricerca... ..	45
4.1.3	Prospettive per la continuazione del monitoraggio RFID.....	48
4.2	Modello concettuale dei flussi idro-sedimentari a livello di bacino.....	49
4.3	Riguardo alla gestione dei flussi sedimentari nel Roia.....	50
4.3.1	Tempo di rilassamento, resilienza e tendenza del sistema.....	50
4.3.2	Tematiche della ricostruzione.....	52

4.3.3	Evoluzione dei flussi sedimentari nel Roia in un contesto di cambiamento climatico .....	53
4.4	Prospettive di monitoraggio dei flussi sedimentari nel Roia .....	54
	Riferimenti bibliografici .....	55
	Elenco delle figure .....	60
	Elenco delle tabelle .....	62

*Presentiamo qui le ricerche realizzate nel bacino idrografico del Roia, che hanno mirato essenzialmente a caratterizzare e quantificare le dinamiche sedimentarie a diverse scale spaziali e temporali. In particolare, l'occorrenza di una piena con un periodo di ritorno millenario nella parte a monte del bacino nel 2020 (tempesta Alex del 02/10/2020) ha offerto l'opportunità unica di documentare un tale evento. Presentiamo innanzitutto il contesto e il bacino idrografico studiato, poi le metodologie impiegate. I risultati ottenuti vengono poi analizzati seguendo tre assi corrispondenti a tre strategie di misurazione: la dinamica sedimentaria dei letti di frega delle trote mediante RFID passiva con frequenza annuale, il trasporto sedimentario di tutta la distribuzione granulometrica tramite RFID attiva lungo l'intero corso d'acqua grazie a un monitoraggio pluriennale, e infine tramite sismica passiva per una caratterizzazione continua dei flussi sedimentari. La discussione, infine, si concentra sul monitoraggio sul campo in un contesto torrentizio e sulla gestione dei flussi sedimentari nel Roia, che include in particolare la tendenza del sistema dopo una piena estrema e nel contesto del cambiamento climatico.*

# 1 Contesto

## 1.1 Contesto dello studio

Questo studio è iniziato nell'ambito del progetto Interreg Alcotra Concert-Eaux (2017-2020). Nel contesto della gestione della sua catena idroelettrica, EDF aveva individuato diversi punti che richiedevano un approfondimento delle conoscenze relative al funzionamento idrosedimentario del Roia. Questi aspetti erano emersi a seguito di un evento idrologico importante (piena di novembre 2014), di studi ittici recenti condotti sul corso d'acqua in collaborazione con l'AAPPMA la Patraque del Roia, e dal rinnovo delle concessioni amministrative degli impianti idroelettrici. Le questioni principali si articolavano su due assi:

- Capire meglio il legame tra il funzionamento idrosedimentario e l'evoluzione della fauna ittica, in particolare la formazione delle aree potenziali di frega.
- Come gestire i materiali intrappolati nei bacini d'alta quota?

A queste si aggiungevano altre problematiche emerse nell'ambito della preparazione del progetto europeo, relative ai flussi sedimentari grossolani su scala del bacino idrografico, in particolare le questioni legate ad un'intensa estrazione della frazione grossolana nella parte a valle del bacino (parte italiana).

Tali questioni richiedevano, in primo luogo, una quantificazione dei flussi sedimentari grossolani su scala del bacino idrografico e, in secondo luogo, l'elaborazione di una visione prospettica sul futuro di questi flussi a medio termine, con l'obiettivo finale di proporre elementi per un piano di gestione dei sedimenti su scala del bacino.

Uno studio preliminare al progetto europeo Concert-Eaux (Lejeune, 2016) mirava in particolare a:

- Realizzare una sintesi dei documenti esistenti sul trasporto solido nel Roia.
- Definire un protocollo dettagliato di misurazione del trasporto solido da implementare nel futuro progetto europeo.

Successivamente, con l'ottenimento del finanziamento del progetto Concert-Eaux (2017-2020) e poi del progetto Concert-Eaux OPERA (2023-2024), lavoravamo secondo i seguenti tre assi:

- Raccomandazioni sul destino dei materiali rimossi dai bacini di alta quota.
- Quantificazione dei flussi sedimentari attuali, valutazione della disponibilità sedimentaria nel bacino idrografico e caratterizzazione dell'evoluzione probabile dei flussi.
- Proposte di gestione dei flussi sedimentari nel Roia in vista dell'implementazione di un piano di gestione.

Questo rapporto finale si struttura seguendo tre assi di ricerca, ed è preceduto da una sintesi degli elementi geografici che intervengono nei flussi idrosedimentari nel bacino:

- Lo studio della dinamica sedimentaria delle zone di frega tramite un monitoraggio con RFID passiva.
- Lo studio del trasporto solido associato a tutta la distribuzione granulometrica, tramite un monitoraggio con RFID attiva e passiva.
- Lo studio dei flussi sedimentari tramite sismica passiva.

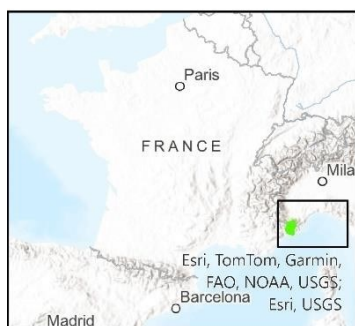
## 1.2 Presentazione del bacino idrografico del Roia

### 1.2.1 Contesto geografico generale

Il bacino idrografico del Roia è soggetto sia all'influenza alpina “dall'alto” (Nord) che all'influenza mediterranea “dal basso” (Sud), il che conferisce una variabilità idrologica marcata. Inoltre, è caratterizzato da piene a cinetica rapida e da un'elevata mobilità dell'alveo nelle aree non comprese nelle gole. Per tutti questi elementi, costituisce un esempio tipico dei corsi d'acqua maralpini con carico grossolano, le cui caratteristiche sono rappresentative dei fiumi della Riviera mediterranea tra il fiume Var e La Spezia (cfr. Figura 1).

#### Riviera méditerranéenne

■ La Roya



M. Chapuis, Aug. 2024.

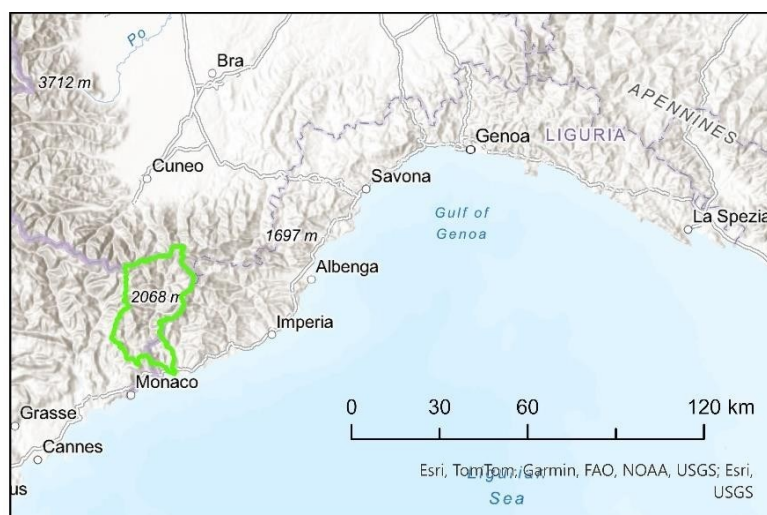


Figura 1. Il bacino idrografico del Roia nel contesto della Riviera mediterranea

Il carattere transfrontaliero del Roia rende il suo studio particolarmente interessante dal punto di vista geografico, poiché l'uso del suolo è strettamente legato alla storia geopolitica della regione. Infatti, quasi il 90% del bacino idrografico si trova attualmente in territorio francese (cfr. Figura 2 e ONF-RTM et al., 2023a), ma per i comuni di Tenda e La Briga, e per i villaggi di Libre e Piene, tale appartenenza è relativamente recente (trattato di Parigi, 1947).

D'altra parte, il Roia è un fiume e costituisce quindi un'unità topografica pertinente per lo studio dei trasferimenti idrosedimentari (cfr. nozione di perimetro tecnico pertinente, Chapuis e Collomb, 2012, e concetto di "source-to-sink"). A ciò si aggiunge la nozione di connettività sedimentaria, che in un contesto alpino è particolarmente critica per spiegare le dinamiche sedimentarie ed i paesaggi ereditati dalle glaciazioni (massimo di estensione würmiana nel Roia: Saorge, cfr. Blanchard, 1949 in ONF-RTM et al., 2023a).

## 1.2.2 Topografia e organizzazione della rete idrografica

Il bacino idrografico del Roia, con una superficie di 671 km<sup>2</sup> (ONF-RTM et al., 2023a), è caratterizzato da rilievi molto accentuati e una pendenza particolarmente marcata (quasi 3.000 metri in meno di 50 km, cfr. Figura 2). Il Roia ha la sua sorgente al Colle di Tenda e la sua foce, il Mar Mediterraneo, si trova a Ventimiglia (IM, Italia): la sua direzione di deflusso generale è orientata lungo un asse Nord-Sud. Il suo punto più alto, il monte Grand Capelet, si trova a 2.935 metri di altitudine e la sua pendenza media è elevata, intorno al 56% (ONF-RTM et al., 2023a). Il corso principale del Roia, la cui morfologia è attualmente pluricursale e di transizione (*wandering*, cfr. Rinaldi et al., 2010) dove non ci sono costrizioni laterali, è caratterizzato da numerosi tratti in gole e, più in generale, da una valle a "V" molto incassata di origine messiniana, ad eccezione di rari settori che corrispondono a zone di divagazione laterale, dove sono concentrate le aree abitate.

Il Roia è un fiume torrentizio (con una pendenza compresa tra l'1,5% e il 6%, cfr. classificazione di Bernard, 1925 in Meunier, 2023; Bernard, 1927 in Meunier, 1989) il cui ramo principale è lungo circa sessanta chilometri. Nonostante un indice di Gravelius di 2,15 (Tourade, 2018) che evidenzia il suo carattere relativamente allungato, il bacino idrografico presenta piene a cinetica rapida (piene rapide ovvero *flash floods*) parzialmente spiegate dai suoi versanti ripidi. Tra i suoi affluenti principali (cfr. Figura 2), si distingue in particolare la Bevera: costituisce il più grande sotto-bacino idrografico (160 km<sup>2</sup>) e confluisce nella pianura alluvionale del Roia a meno di 5 km a monte di Ventimiglia, in una configurazione tipica della Riviera mediterranea francese, che ricorda i Paillons all'ingresso di Nizza o la confluenza Estéron-Var.

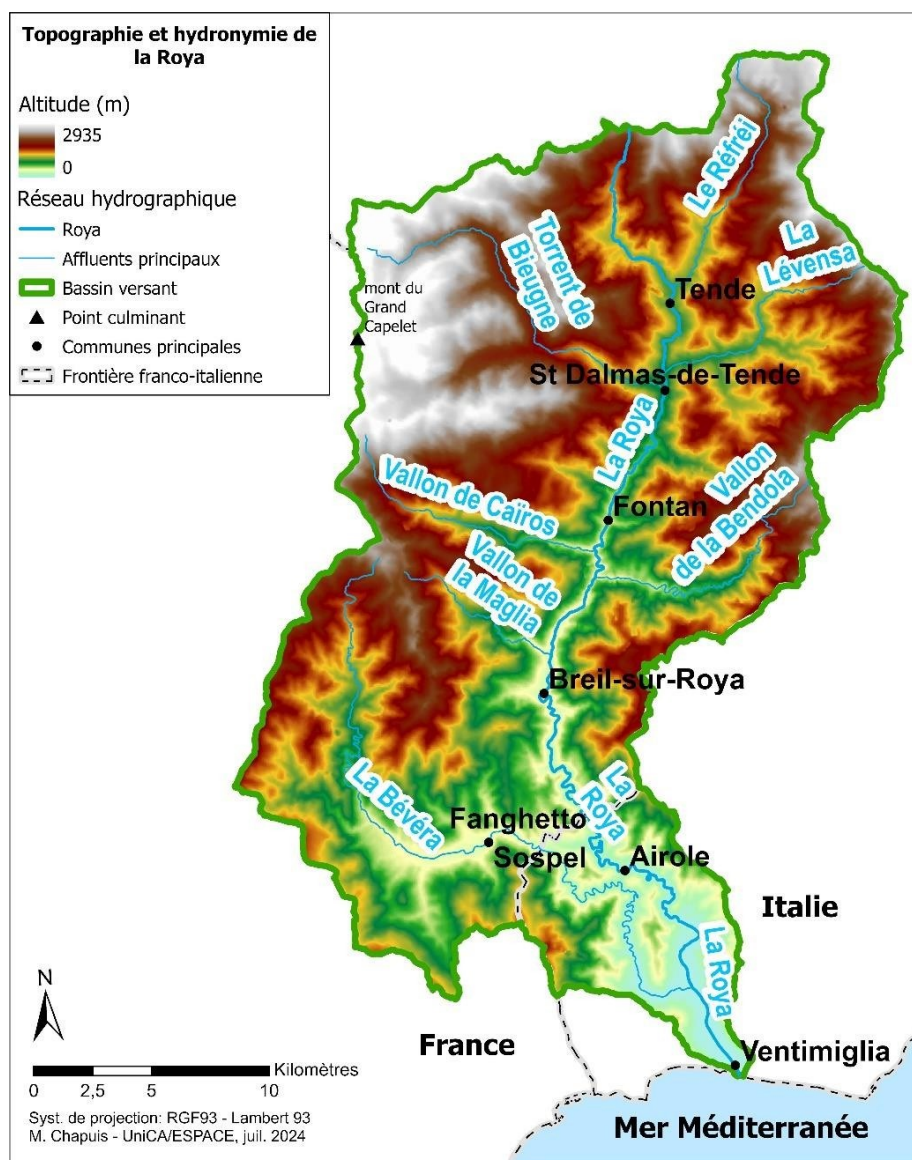


Figura 2. Topografia del bacino idrografico del Roia ed i principali affluenti.

Fonti: EGM (IGN ed Eurogeographics) e BD Topage 2024

### 1.2.3 Clima

Con un dislivello di circa 3.000 metri in meno di 50 km, il gradiente climatico associato è netto: più di 60 giorni di gelo a Tenda e quasi nessuno a Ventimiglia, estati calde e secche sulla costa, ma con accumuli di precipitazioni che aumentano con l'altitudine, fino a raggiungere poco più di 1.000 mm annui a Tenda (fonte: Météo-France). L'influenza mediterranea nella parte a valle del bacino si attenua progressivamente lasciando spazio a un clima montano man mano che si sale in altitudine (e in latitudine) (Vignal, 2020). La variabilità intra-annuale delle precipitazioni è elevata, così come quella interannuale (cfr. Figura 3).

È da notare che le precipitazioni nella parte alta del bacino sono spesso legate ai “ritorni da Est”, associati alla presenza di una saccatura fredda in quota nel Mediterraneo: “l'interazione tra l'aria fredda in quota e l'aria relativamente calda e umida in superficie nel Mediterraneo dà origine a perturbazioni attive”, in cui le masse d'aria calda e umida formatesi nel golfo di Genova risalgono la pianura del Pò e si scontrano con i primi rilievi alpini, qui situati a Nord e a Est del bacino. In inverno, questo fenomeno porta a forti nevicate, mentre in estate può dar luogo a piogge particolarmente intense.

Cumul des précipitations (Cumul Journalier) - Données les plus valides de l'entité - 06163007  
- TENDE\_SAPC - du 25/11/2015 00:00 au 30/06/2024 23:59 (TU)

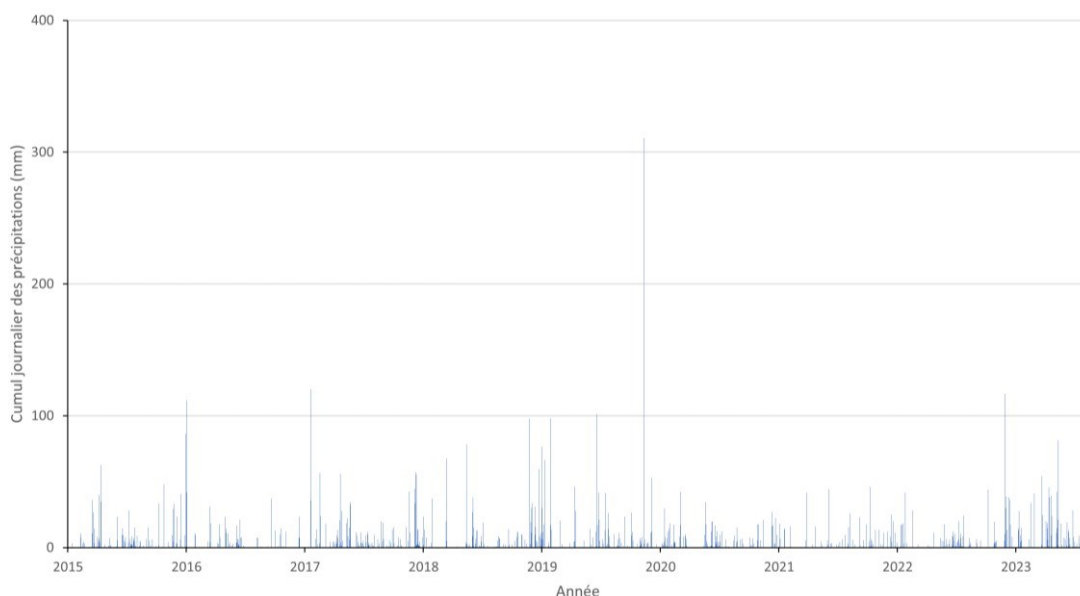


Figura 3. Cumulata giornaliera delle precipitazioni a Tenda tra il 25/11/2015 e il 30/06/2024 (in mm).

Si nota la forte variabilità infra- e interannuale delle precipitazioni. Il picco osservato corrisponde alle precipitazioni misurate durante la tempesta Alex del 02/10/2020.

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

Il bacino idrografico è storicamente poco dotato in termini di stazioni di misurazione pluviometrica (cfr. Tabella 1, Figura 4 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, e CEREMA, 2021). Nell'ambito dei progetti Concert-Eaux e Concert-Eaux OPERA, è stato fatto uno sforzo di strumentazione con l'obiettivo di colmare questo deficit di dati, indispensabili per qualsiasi studio idrologico o relativo al trasporto solido, con l'istituzione dell'Osservatorio del Roia e un monitoraggio in tempo reale realizzato dallo SMIAGE (non accessibile al grande pubblico).

Tabella 1. Data di messa in servizio di alcune stazioni pluviometriche nel bacino idrografico (non esaustivo).

Localizzazione	Produttore	Data di messa in servizio
Tenda	Météo-France	25/11/2013
Airole	ARPAL	11/03/2013
Monte Maure	ARPAL	28/02/2001
Vintimille	ARPAL	22/10/2003

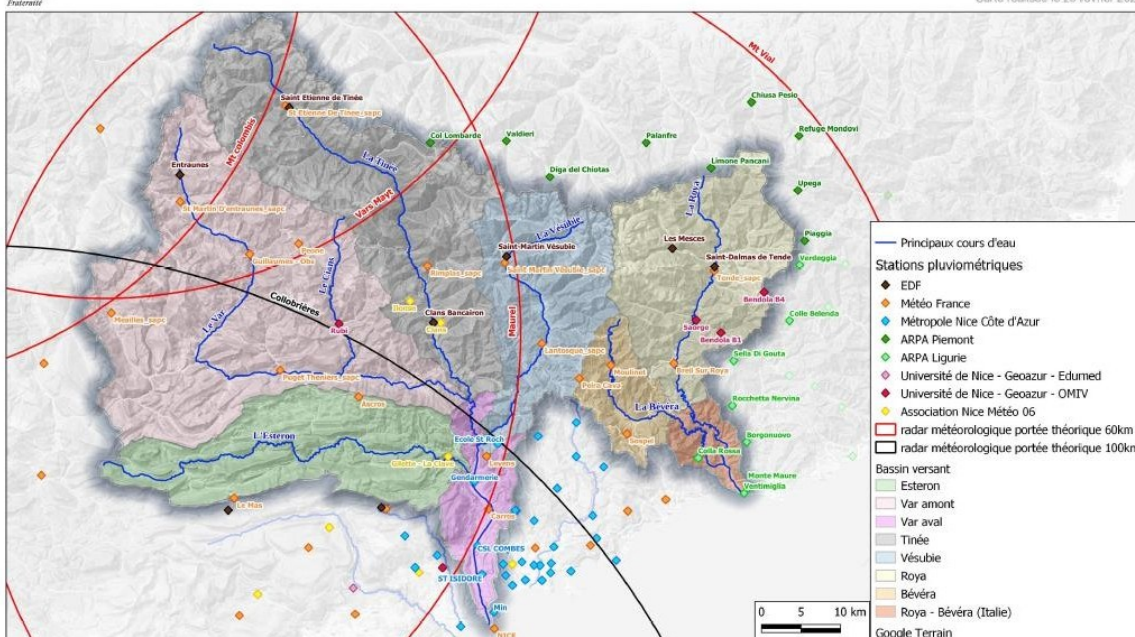


Figura 4. Strumentazione dei bacini idrografici maralpini in termini di misurazioni pluviometriche.

Fonti : CEREMA, 2021

## 1.2.4 Geologia, geomorfologia e sensibilità delle formazioni superficiali all'erosione

La geologia del bacino idrografico del Roia è particolarmente complessa (cfr. Figura 6) e merita di essere analizzata contemporaneamente alla geomorfologia (cfr. Figura 5).

Si noteranno in particolare:

- Le formazioni magmatiche e metamorfiche (principalmente migmatiti) del basamento cristallino dell'Argentera-Mercantour situate a Nord-Est del bacino, e le peliti permiane (colori arancione e rosso nella Figura 6). Queste formazioni sono più resistenti all'erosione rispetto alle altre (litofacies del basamento, in rosa nella Figura 5).
- Alla punta Nord, il massiccio del Marguaréis caratterizzato da formazioni carsiche (in rosso nella Figura 5) che svolgono un ruolo ancora poco documentato nell'idrologia del bacino.
- La sequenza di flysch (cretaceo ed eocenico) a Nord-Est del bacino (litofacies di copertura, onde color marrone nella Figura 5).
- Una larga parte del bacino costituita da rocce sedimentarie di copertura, con resistenza variabile (calcare, marne, carniole, dolomie...) di età triassica, giurassica, cretacea ed eocenica.
- All'estremità a valle, a Ventimiglia, ci sono conglomerati depositati nel pliocene, in seguito alla crisi messiniana (in arancione nella Figura 5).

Si noterà inoltre, nella parte Nord-Est del bacino, la sequenza cronologicamente strutturata delle formazioni triassiche, giurassiche, cretacee ed eoceniche.

Si può considerare che le rocce che costituiscono queste formazioni superficiali siano complessivamente poco resistenti all'erosione, eccezione fatta per le rocce del basamento

primario. Se si aggiunge il carattere aggressivo del clima montano in testa al bacino, il potenziale di fornitura sedimentaria del bacino idrografico è a priori particolarmente elevato, tanto più che la connettività sedimentaria è potenziata dal carattere scosceso dei versanti. Per combattere l'erosione dei suoli, originariamente poco spessi, i versanti sono per la grande maggioranza strutturati in terrazze (*planches*). A valle, la vegetazione di tipo mediterraneo, relativamente poco coprente, non attenua il carattere particolarmente erosivo degli episodi mediterranei.

Si prevede quindi che il bacino idrografico del Roia abbia un potenziale di fornitura sedimentaria importante e che i materiali provenienti dai versanti possano raggiungere il corso principale; per quanto riguarda la distribuzione granulometrica dei materiali disponibili per il trasporto, sembra essersi spostata verso la coda della distribuzione rispetto alla situazione "prima della tempesta Alex": un apporto e un transito significativi di sedimenti fini sembrano più frequenti rispetto a prima (problemi di colmataggio nella bassa valle), mentre è difficile stabilire la situazione sui blocchi plurimetrici in transito nell'alveo del fiume, in quanto gran parte di essi è stata utilizzata per la ricostruzione.

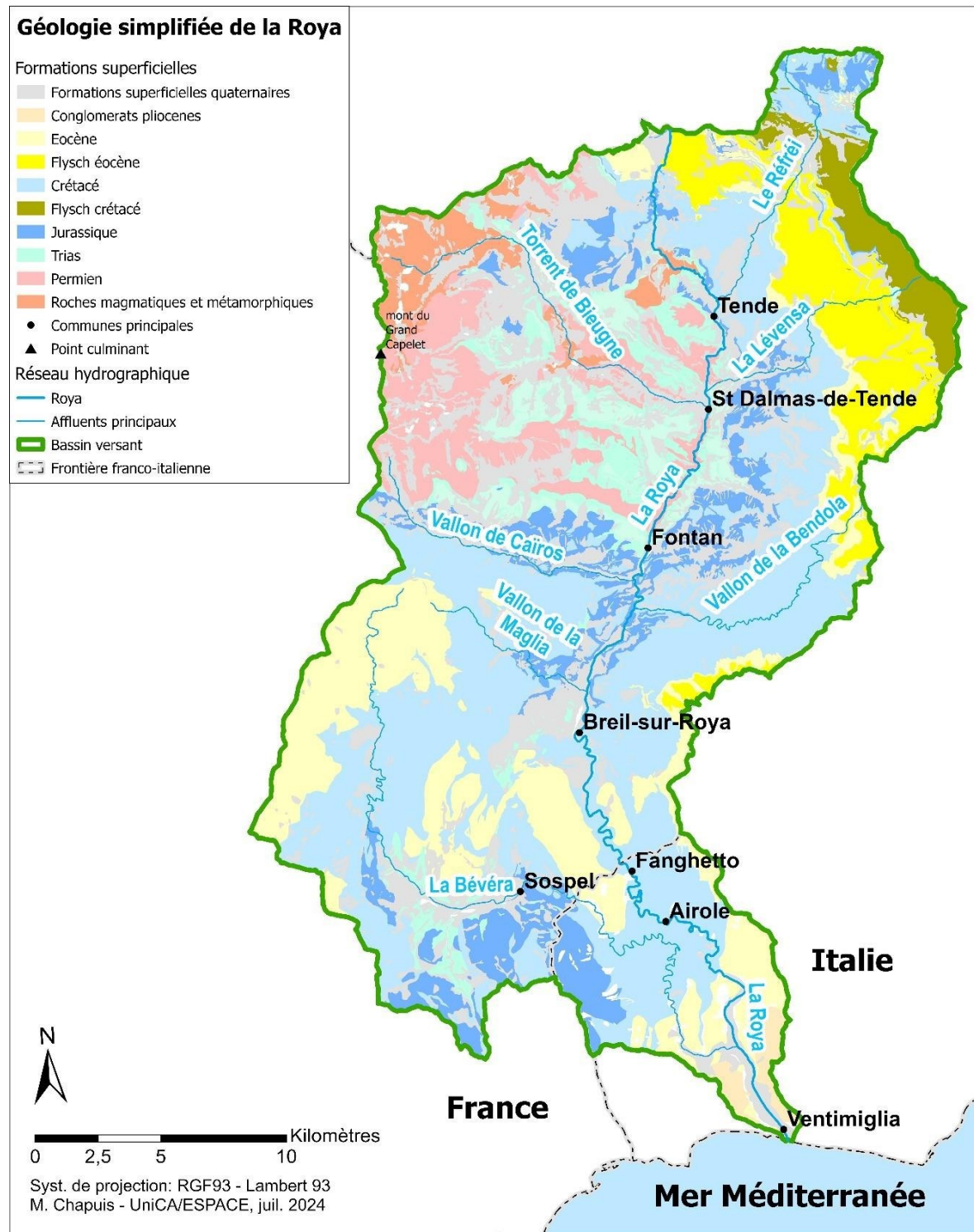
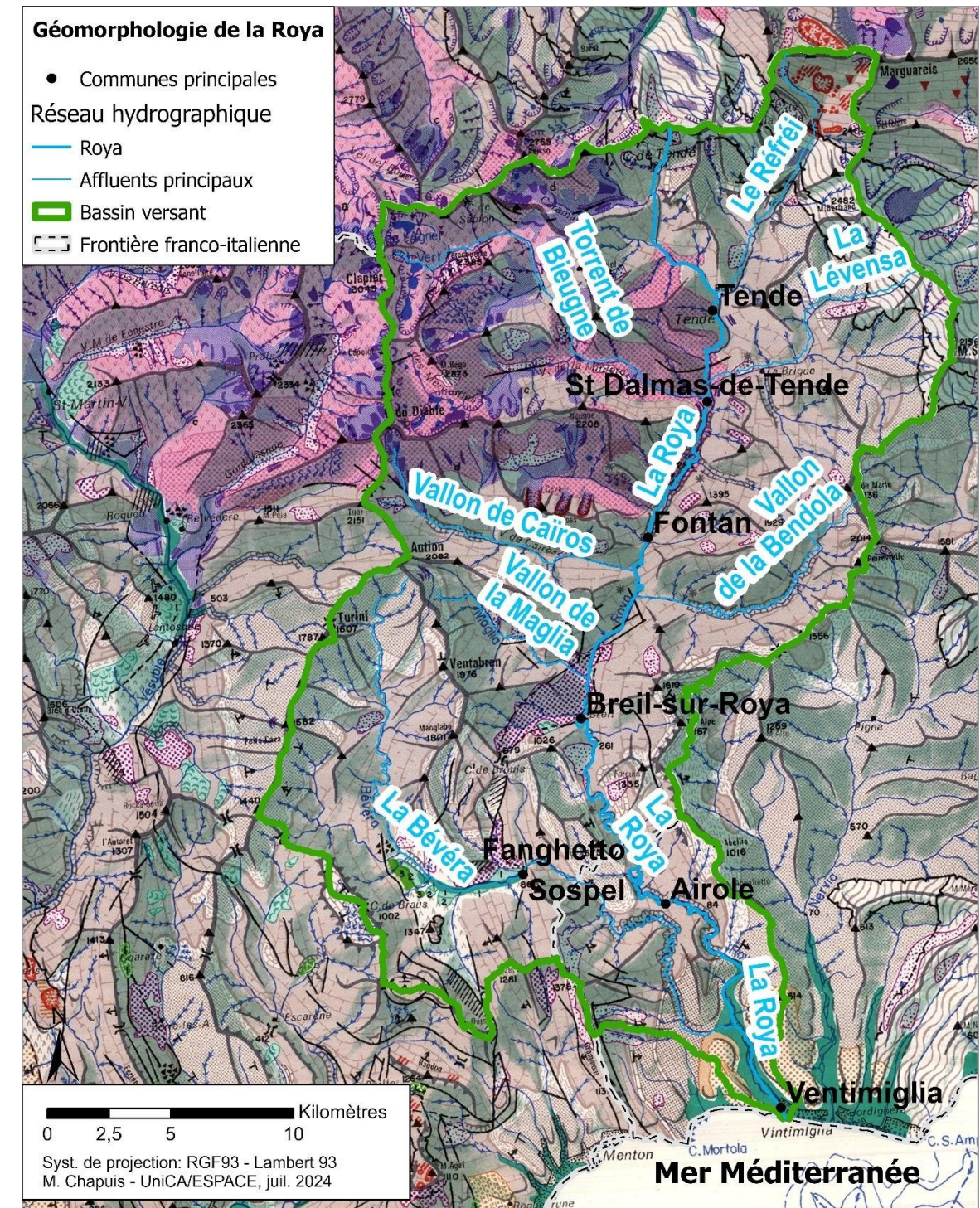


Figura 6. Geologia semplificata del bacino idrografico del Roia.

Fonti: interpretazione basata su BD CHARM-50 (BRGM) per la parte francese; per la parte italiana, digitalizzazione e interpretazione basata su Carte Geologiche Regionali (CGR) scala 1:25000 – Ventimiglia e Dolceacqua, dati provenienti dal geoportale della Regione Liguria: <https://svcarto.regione.liguria.it/geoviewer2/pages/apps/ambiente-tematiche/index.html?canale=5> [consultato il 30/07/2024]; EGM (IGN ed Eurogeographics) e BD Topage 2024.



Fonti: Julian, 1977; EGM (IGN e Eurogeographics) e BD Topage 2024

Figura 5. Estratto della mappa geomorfologica del bacino idrografico del Roia (Julian, 1977).

Per i dettagli dei simboli, si rimanda utilmente al documento online [https://www.persee.fr/doc/medit\\_0025-825c\\_1S77\\_num\\_28\\_1\\_170S](https://www.persee.fr/doc/medit_0025-825c_1S77_num_28_1_170S) [consultato il 05/08/2024]. A titolo informativo riguardo alla legenda, e da Nord a Sud, i litofacies del basamento sono di colore rosa, i litofacies di copertura e di nappe sono di colore marrone, e le formazioni del neogene sono di colore arancione. Da Nord a Sud di nuovo, le formazioni carsiche sono indicate in rosso, le formazioni di origine glaciale e ffuvio-glaciale in viola scuro, le formazioni criogeniche in fucsia, e le formazioni alluvionali o i depositi di versante sono indicate in verde.

## 1.2.5 Idrologia

A causa della doppia influenza alpina e mediterranea (regime mediterraneo-nivale), l'idrologia del Roia è tipica dei corsi d'acqua maralpini, con una forte variabilità intra-annuale (cfr. Figura 7), unita a una marcata variabilità inter-annuale (cfr. Tabella 2 e Figura 8).

Vedremo più avanti che una vasta parte del tracciato del Roia è influenzata dagli impianti idroelettrici. A valle di Breil-sur-Roya, ciò si traduce, ad esempio, in manovre che inducono variazioni di portata intra-giornaliere dell'ordine di 2 m<sup>3</sup>/s.

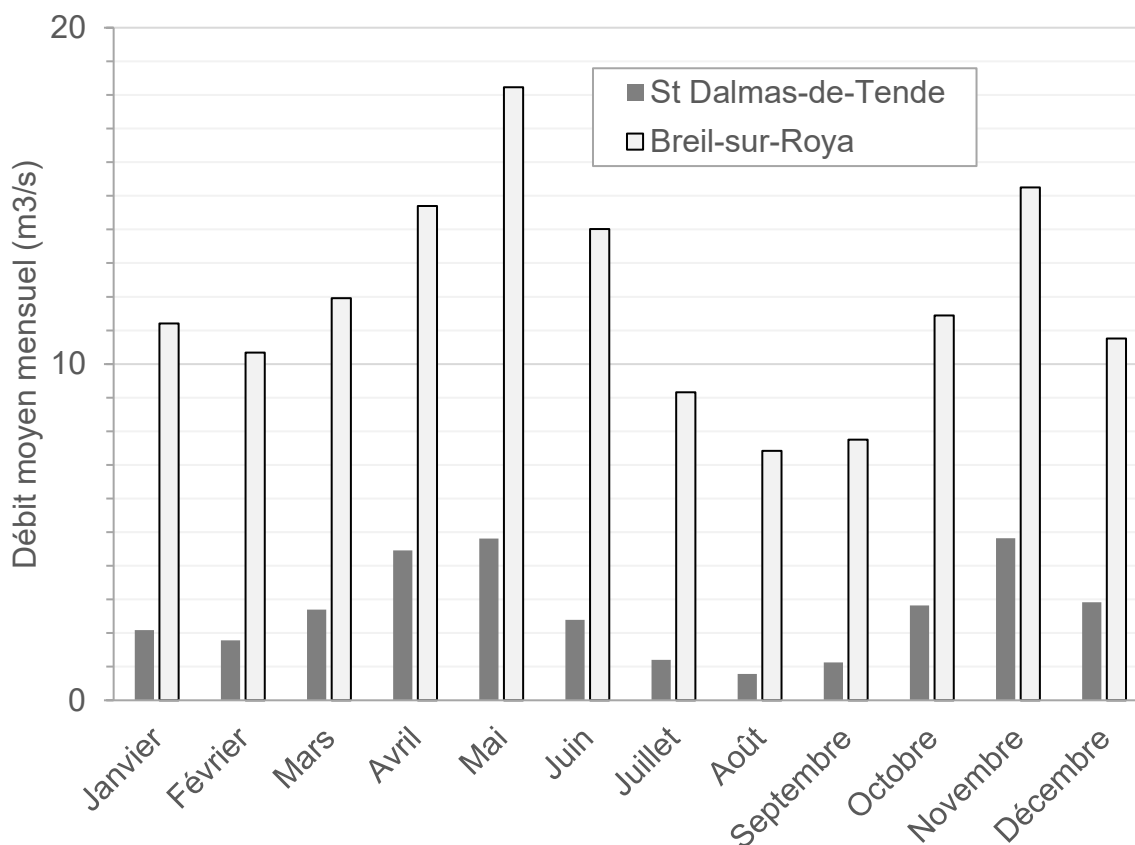


Figura 7. Portate medie mensili a S. Dalmazzo-di-Tenda (1985-2024, in grigio) e Breil (1969-2017, in bianco).

Si noterà il regime bimodale caratteristico dei bacini idrografici sotto influenza montuosa e mediterranea, sia a monte che a valle del bacino: alte acque in primavera (scioglimento) e in autunno (episodi temporaleschi), accompagnate da una siccità estiva particolarmente severa a S. Dalmazzo. La siccità invernale è dovuta allo stoccaggio delle precipitazioni sotto forma di neve.

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

Solo la stazione di S. Dalmazzo-di-Tenda consente il calcolo di portate di piena istantanee caratteristiche (QIXnJ, cfr. Tabella 2). Per completare la nostra comprensione delle differenze idrologiche tra S. Dalmazzo e Breil, si osserva che il modulo a Breil è 4 volte più elevato rispetto a S. Dalmazzo (cfr. Tabella 3).

Tabella 2. Portate (in  $m^3/s$ ) dei periodi di ritorno caratteristici a S. Dalmazzo-di-Tenda e Breil I valori tra parentesi quadre corrispondono all'intervallo di incertezza. Calcoli CRUCAL effettuati il 24/04/2024 alle 02:15 (TU) per la stazione di S. Dalmazzo e il 24/01/2024 alle 03:18 (TU) per la stazione di Breil.

Stazione Nome	Y661 4010 Il Roia a Tenda [S. Dalmazzo-di-Tenda]		Y662 0003 01 Il Roia a Breil-sur-Roya [EDF]	
Grandezza calcolata	QIXn J	QmnJ	QmnJ	
Periodo di calcolo	01/01/1985 - 23/07/2024	20/05/1960 - 23/07/2024	01/01/1969 - 31/12/2022	
Tipo di calcolo	Q-X	QJ-X	QJ-X	
Numero di punti considerati	27	46	48	
Periodo di ritorno	Portata ( $m^3/s$ )			
Biennale (mediana)	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]
Decennale	223 [172 ; 280]	90,7 [74,1 ; 111]	222	[181 ; 267]
Ventennale	266 [193 ; 349]	110 [86,1 ; 140]	267	[217 ; 322]
Cinquantennale	320 [215 ; 468]	134 [98,2 ; 185]	326	[262 ; 393]

Fonti : HydroPortail, <https://www.hydro.eaufrance.fr> [consultato il 30/07/2024]. Scheda di sintesi – Dati idrologici di sintesi – Alte acque.

Tabella 3. Valore del modulo per S. Dalmazzo-di-Tenda e Breil.

Stazione	Periodo di misura	Modulo ( $m^3/s$ )
S. Dalmazzo-di-Tenda (Y661 4010)	20/05/1960 - 23/07/2024	2,93
Breil-sur-Roya (Y662 0003 01)	01/01/1969 - 31/12/2022	11,7

Fonti : HydroPortail, <https://www.hydro.eaufrance.fr> [[consultato il 30/07/2024]. QJ-annuale, tutte le acque.

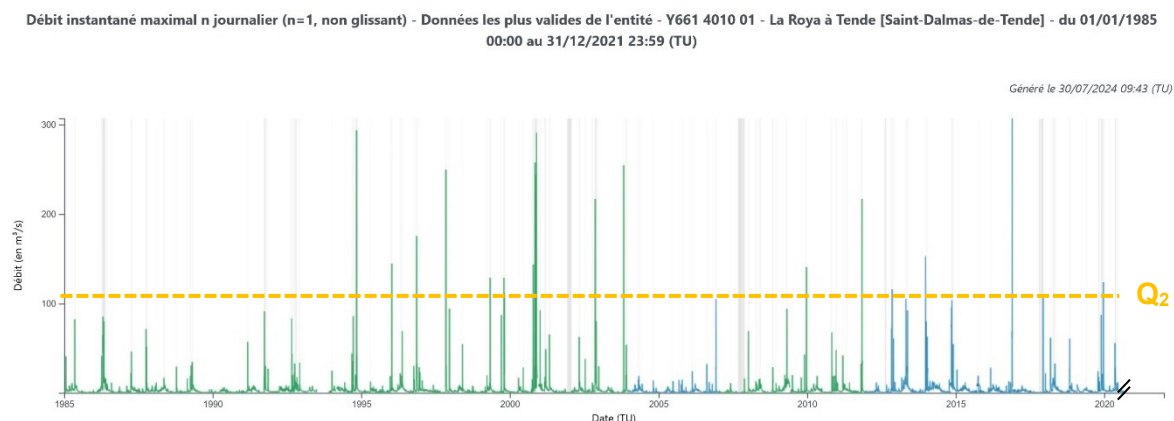


Figura 8. Portata istantanea massima a S. Dalmazzo-di-Tenda (1985-2021).

La cronaca si interrompe qui con l'inondazione del 02/10/2020, che costituisce il massimo conosciuto sul bacino:  $Q_{max} \sim [1000;1500] m^3/s$  a Breil (ONF-RTM et al., 2023a).

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

Abbiamo sottolineato che il Roia presenta piene a cinetica rapida (piene rapide). Un'analisi rapida dei tempi di propagazione nel bacino tra S. Dalmazzo-di-Tenda e Airole (circa 30 km di tracciato) o tra Tenda e Breil (circa 20 km), ha mostrato tempi di propagazione del picco di piena dell'ordine da 45 minuti a 2 ore e 30 min. Con tutte le riserve, in particolare riguardo alla struttura spaziale delle precipitazioni, questo ci fornisce velocità virtuali di propagazione del picco dell'ordine da 2 a 10 m/s. L'analisi idrologica, combinata con quella dei picchi di attività sismica (cfr. sezione 3.3), propone valori piuttosto bassi rispetto a questo intervallo.

## 1.2.6 Infrastrutture antropiche in relazione alla risorsa idrica

Le infrastrutture antropiche nel Roia sono essenzialmente legate alle opere di produzione idroelettrica (cfr. Figura 9): la principale diga di alta quota è la diga di Mesce, sul fiume Bieugne, alla confluenza dei valloni di Miniera e Casterino. Le altre opere sul ramo principale sono essenzialmente a regime fluviale. Quasi tutta la lunghezza del Roia, prima francese e poi italiana, è soggetta a un regime influenzato. La storia transfrontaliera del bacino idrografico spiega inoltre la gestione complessa delle opere idroelettriche (cfr. Tabella 4).

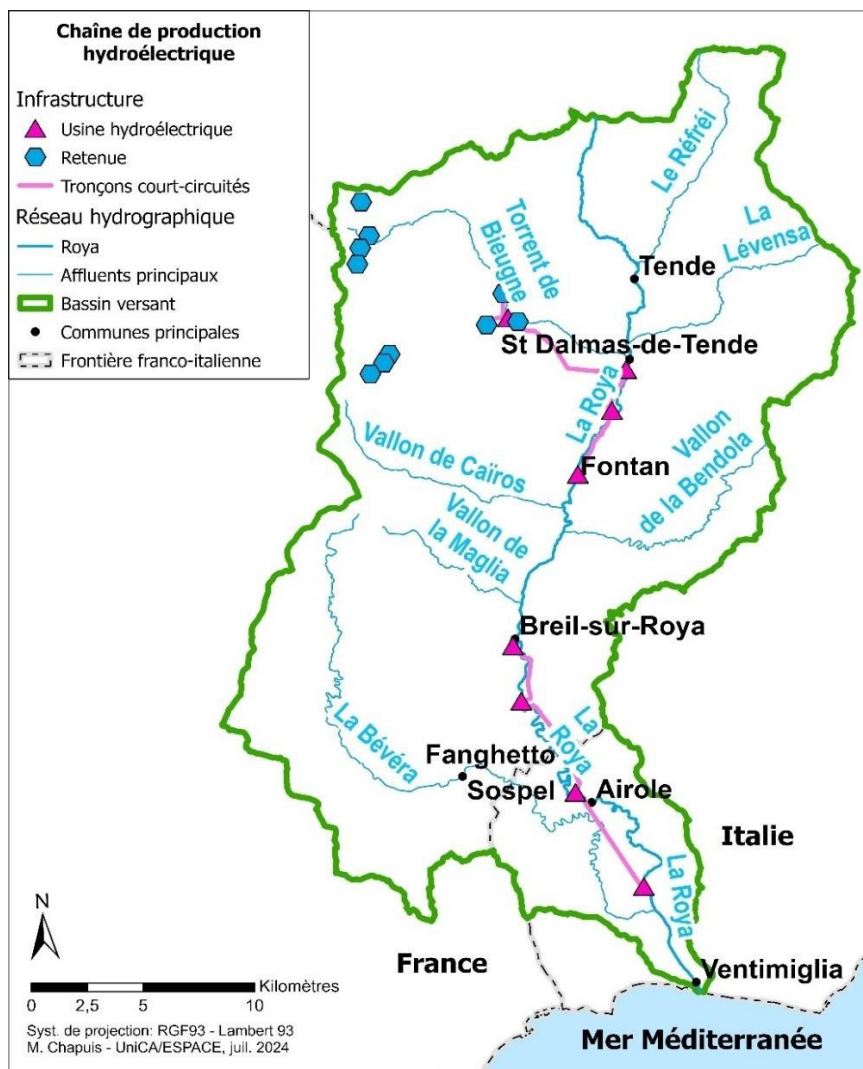


Figura 9. Catena di produzione idroelettrica nel Roia.

Fonti : IGN, OpenStreetMap

Tabella 4. Messa in servizio delle opere di produzione idroelettrica, dall'alto verso il basso (cf. Figura 9).

Opera	Data di messa in servizio	Paese
Diga delle Mesce	1917-1919	Italia
Impianto di S. Dalmazzo	1914	Francia*
Impianto di Paganin	1917	Francia*
Impianto di Fontan	1912	Francia
Impianto di Breil	1927	Francia
Impianto di Piene Bassa	1912	Francia
Impianto di Airole	1948	Italia
Impianto di Bevera	1948	Italia

\* Inizialmente Italia

\*\*Fonti [consultate il 30/07/2024]:

<https://www.calameo.com/books/004147876550f68dcb1e>

[7 https://www.tirrenopower.com/centrali-ad-acqua-fluente/](https://www.tirrenopower.com/centrali-ad-acqua-fluente/)

Oltre ai prelievi d'acqua per uso agricolo, essenzialmente per l'irrigazione, si segnala che nella bassa valle un campo di captazione è dedicato all'approvvigionamento idrico potabile dei comuni della CARF (Comunità di Agglomerazione della Riviera Francese), di Ventimiglia e di Monaco (cfr. Figura 10). Questa risorsa idrica rappresenta una questione cruciale per il territorio: è alla base della strutturazione della rete di attori attorno al Protocollo di Intesa franco-italiano per il bacino idrografico del Fiume Roia e dei suoi affluenti nel 2013, e più in generale dei progetti europei associati: EUROBASSIN (2000-2006), EUR-EAU-PA (o EUROBASSIN2: 2010-2013), RiskNat (2009-2012), RiskNET (2013-2015), Concert-Eaux (2017-2020) e Concert-Eaux OPERA (2023-2024).

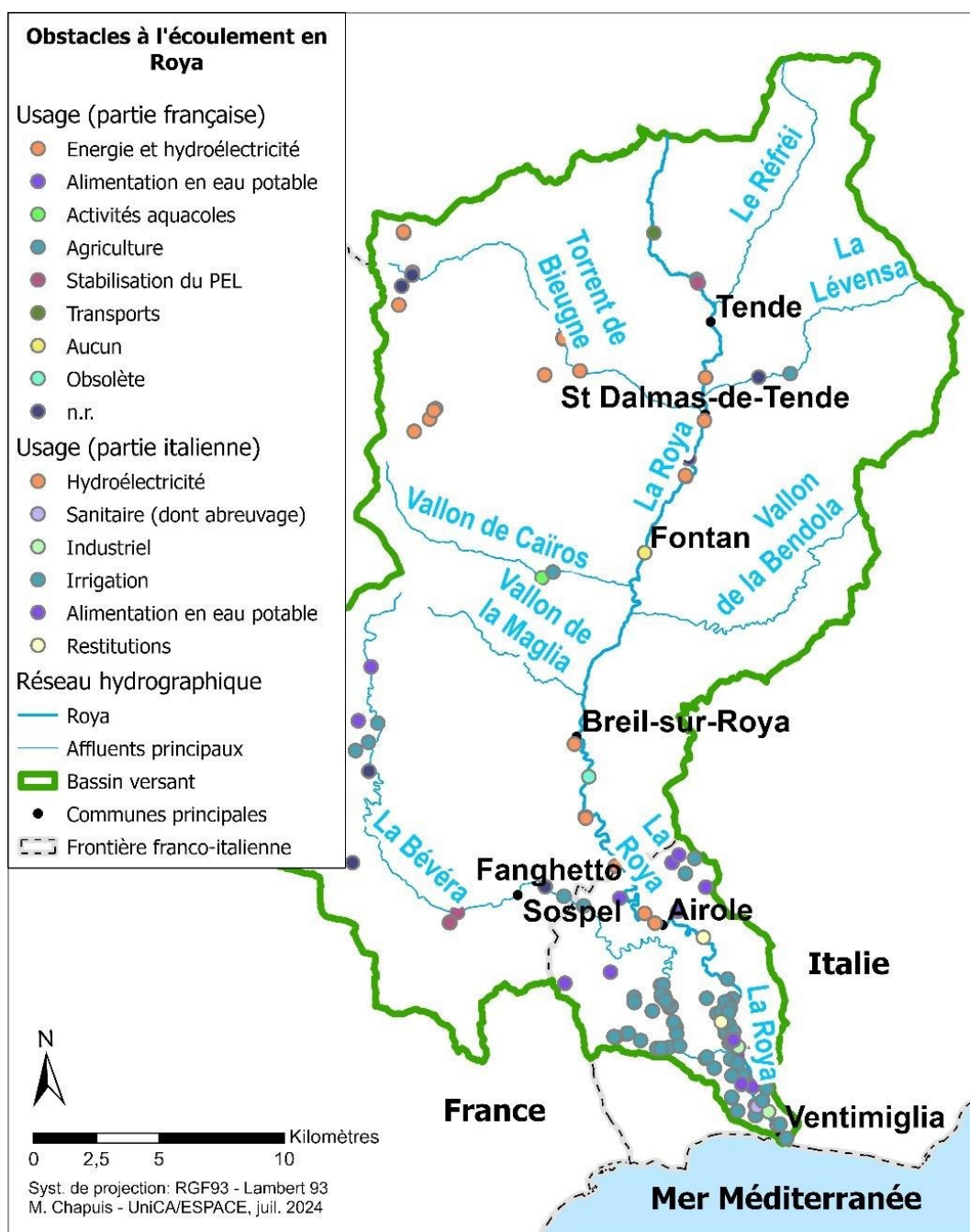


Figura 10. Ostacoli al deflusso e loro usi nel bacino idrografico del Roia. Nella parte italiana, le derivazioni sono principalmente destinate all'uso agricolo e all'approvvigionamento idrico (campo di captazione).

L'armonizzazione delle categorie di utilizzo tra le parti francese e italiana è proposta attraverso un codice colore comune.

Fonti : <https://www.sandre.eaufrance.fr> e <https://geoportal.regioneliguria.it>

## 1.2.7 Uso del suolo, vegetazione e biodiversità

### *Uso del suolo e pianificazione territoriale*

La valle delle Meraviglie, situata nella parte nord-occidentale del bacino idrografico, possiede un patrimonio eccezionale, con reperti risalenti al 5800 a.C. e le famose incisioni rupestri datate 3300 a.C., che testimoniano una presenza umana nella regione.

Attualmente, l'uso del suolo varia considerevolmente tra la parte italiana e quella francese. In Italia, l'agricoltura rimane predominante, con attività orticole e coltivazioni di ulivi, in relazione alla densità dei prelievi d'acqua per l'irrigazione nella bassa valle (cf. Figura 10).

Il mantenimento dell'attività agricola può avere due conseguenze sui flussi sedimentari:

- Una copertura vegetale meno densa (meno alberi o canopie distanziate) può teoricamente aumentare l'erosione in caso di forti precipitazioni. Tuttavia, le terrazze (*planches*) possono aiutare a rallentare il ruscellamento e a limitare l'erosione.
- I muri delle terrazze, ben mantenuti, aiutano a limitare la perdita di suolo per ruscellamento. Tuttavia, in caso di assenza di manutenzione, ad esempio con lo sviluppo di una copertura forestale, le radici possono indebolire le strutture di sostegno, portando al loro collasso.

È quindi essenziale studiare più a fondo l'influenza dell'uso del suolo sui flussi sedimentari, tenendo conto dell'impatto del regime di precipitazioni (intensità e frequenza).

Il contesto geopolitico e le condizioni climatiche hanno anche influenzato l'evoluzione dell'uso del suolo, a seconda che si sia a monte o a valle del bacino. La pianificazione territoriale è resa complessa dal rilievo scosceso.

L'utilizzo delle pendenze per la produzione di energia idroelettrica costituisce un altro aspetto importante, con il Roia che funge da esempio di ottimizzazione energetica. La storia della valle come via di comunicazione (via del sale) è stata determinante. La tracciatura di una strada in fondo alla valle è stata una questione importante fin dal XVI secolo e si è conclusa nel 1788. La costruzione della ferrovia, avviata nel 1826 e completata nel 1928, ha rappresentato una sfida tecnica e geopolitica, con la riapertura avvenuta solo nel 1979. Più recentemente, la tempesta Alex del 2020 ha isolato la parte a monte della valle a partire da Breil, e la strada Ventimiglia-Cuneo attraverso il tunnel di Tenda è interrotta per un periodo indefinito, sottolineando l'importanza delle vie di comunicazione per il turismo, in particolare nella valle delle Meraviglie.

### *Vegetazione e strumenti di protezione della biodiversità*

Le caratteristiche della vegetazione del bacino idrografico sono descritte nello studio di Vignal (2020). Questa ricerca è pertinente per due motivi: la sua portata regionale e la sua prospettiva futura. Il gradiente altitudinale e latitudinale marcato nel bacino idrografico del Roia crea una grande diversità di *habitat*, generando una biodiversità ricca (Médail e Diadema, 2006). Questa biodiversità deriva anche dalle caratteristiche geologiche, dalle variazioni climatiche e dalla posizione biogeografica unica di questa regione, situata tra le influenze mediterranea e alpina. La regione maralpina e ligure ospita numerose specie endemiche, rappresentando quasi il 50% delle 106 specie endemiche delle Alpi Marittime, facendo della valle Roia un *hotspot* locale di biodiversità (Médail e Quézel, 1999) all'interno del bacino mediterraneo, anch'esso *hotspot* di biodiversità (Myers et al., 2000).

In risposta a questa ricchezza biologica, sono stati messi in atto diversi strumenti di protezione della biodiversità:

- Un parco nazionale: il Parco Nazionale del Mercantour (Francia), con l'intera zona centrale classificata come Sito di Interesse Comunitario Natura 2000.
- Due parchi naturali regionali: Alpi Marittime e Alpi Liguri (Italia) situati a Nord e ad Est della valle del Roia.

- Una rete di aree Natura 2000.

Per quanto riguarda i boschi, il Roia ospita foreste di conifere montane, come il larice (*Larix decidua*), il pino silvestre (*Pinus sylvestris*), l'abete bianco (*Abies alba*) ed altri pini. Ad alta quota, si trovano specie di interesse come la saxifraga (*Saxifraga florulenta*) e il senecio (*Senecio personii*) (Médail e Diadema, 2006, in Vignal, 2020).

Riguardo alla vegetazione riparia ed alla vegetazione acquatica, si potrà fare riferimento alla scheda sintetica « Il Roia » della Maison Régionale de l'Eau (2018). Ne riprendiamo di seguito gli elementi essenziali.

A prossimità dell'alveo del Roia, la vegetazione riparia è essa stessa influenzata dal gradiente altitudinale e climatico, ma anche dalla morfologia del corso d'acqua. Nei settori pluricursali di transizione a valle, si ritroveranno specie pionieristiche di cui i salici costituiscono l'essenziale dello strato arbustivo (*Salix daphnoides*, *Salix fragilis*, *Salix triandra*, *Salix myrsinifolia*). Nella alta valle, il clima montano ha un'influenza preponderante, e si ritroveranno salici a "saule drapé" (*Salix eleagnos*) e salici rossi (*Salix purpurea*), popolamenti a miricaria (*Myricaria germanica*) in caso di apporti di limi, così come altre specie spesso presenti in bordura di corsi d'acqua: ontano bianco (*Alnus incana*), pioppi bianchi e neri (*Populus alba* e *nigra*), ciliegi (*Prunus padus*), sorbi (*Sorbus* sp.), robinia (*Robinia pseudoacacia*), acero nero (*Acer negundo*), nocciolo (*Corylus avellana*)...

In termini di vegetazione acquatica, alcune specie rare di diatomee si sviluppano in ambienti esenti da inquinamento, come per esempio in testa di bacino (*Achnantheidium pyrenaicum* e *Achnantheidium minutissimum*, due specie molto sensibili all'inquinamento e ossifile).

Le osservazioni di campo suggeriscono uno sviluppo algale debole in estate, da collegare con le temperature fresche dell'acqua e il carattere largamente corrente dei flussi, in relazione al regime torrentizio del Roia.

### *Fauna acquatica*

Gli elementi seguenti sono anch'essi tratti dalla sintesi della Maison Régionale de l'Eau (2018).

Dal punto di vista piscicolo, la ricchezza specifica è globalmente molto bassa. Il Roia costituisce un asse di migrazione per le specie provenienti dal Mediterraneo, ma numerosi manufatti infrangibili disturbano la risalita, in particolare dell'anguilla (*Anguilla anguilla*). I laghi d'altitudine, in particolare nella valle delle Meraviglie, sono disconnessi dalla rete idrografica e quindi non possiedono popolazioni piscicole diverse altre che quelle introdotte. Nella parte a monte del Roia e fino alla diga di Breil, può mantenersi una popolazione importante di gamberi a zampe bianche, mentre a valle, la predazione da parte delle anguille ha un effetto limitante.

Sull'asse del Roia, la specie piscicole dominante è la trota fario (*Salmo trutta*); il suo corteggio di accompagnamento è ridotto a una sola specie su una grande parte del bacino:

- Tra Tenda e Saorge, si trova lo scazzone (*Cottus gobio*), che è un piccolo pesce bentonico di alto valore patrimoniale e presenta una forte affinità per le temperature fresche
- Tra Saorge e il confine, si trova la sanguinerola (*Phoxinus phoxinus*), con ampia valenza ecologica
- Più a valle, tra il confine franco-italiano e la Bevera a valle della cascata di Pion, le condizioni idrologiche diventano meno vincolanti e la ricchezza specifica aumenta leggermente. Qui si trovano in particolare due specie di alto valore patrimoniale: il vairone (*Telestes souffia* nel Roia e *Telestes muticellus* nel Bevera) e il barbo meridionale (*Barbus meridionalis*).

Inoltre, operazioni di immissione di avannotti (trota arcobaleno: *Oncorhynchus mykiss*) vengono regolarmente effettuate in vari punti del Roia.

Infine, si noterà che sono state recentemente osservate lontre nel Roia e nel Bevera. La

popolazione di lontre era stata ritenuta scomparsa dagli anni '70, ma è possibile che gli individui osservati nel luglio 2019 costituiscano una popolazione relitta passata inosservata.

Questa breve presentazione del Roia aveva lo scopo di sintetizzare i diversi elementi geografici che intervengono negli assi di ricerca riguardanti il trasporto sedimentario all'interno di questo bacino.

## 2 Metodologia

### 2.1 Procedura metodologica generale

Il monitoraggio pluriennale iniziato nel 2016 sul Roia mirava fin dall'inizio a sviluppare una comprensione dei trasferimenti sedimentari alla scala del bacino idrografico. A questo proposito, sono stati esplorati diversi assi di ricerca: essi sono riassunti nella Tabella 5, che specifica anche il documento di riferimento attuale sull'argomento. Infatti, alcuni di questi assi di ricerca hanno ampiamente beneficiato del lavoro collettivo straordinario svolto nel contesto del resoconto dello scambio di esperienza post-Alex (ONF-RTM et al., 2023a), che riguarda tuttavia solo la parte francese del bacino idrografico.

*Tabella 5. Assi di studio esplorati nell'ambito dello studio dei trasferimenti sedimentari in Roia, protocollo succinto attuato e documento di riferimento attuale sull'argomento.*

Obiettivo	Protocollo	Lavori esplorativi	Documento di riferimento
Caratterizzare l'evoluzione storica del profilo longitudinale	Ricalibrazione del profilo delle Grandi Forze Idrauliche (1912) ed estrazione semi-automatica del profilo longitudinale attuale (2017) dal RGE ALTI® a 1 m	Lejeune, 2016 ; Breteau, 2018 ; Martins, 2019 ;	ONF-RTM et al., 2023a
Identificare le zone fonti di sedimenti nel bacino idrografico	Telerilevamento (fotografie aeree antiche e recenti) e osservazioni sul campo	Lejeune, 2016 ; Martins, 2021	ONF-RTM et al., 2023a
Valutare i flussi sedimentari grossolani nell'alveo	Tracciamento sedimentario tramite RFID passiva e attiva, sismica passiva	Tourade, 2018 ; Martins, 2019 ; Martins, 2021 ; Weiland, 2024	Chapuis e Adnès, 2024 ; questo documento
Connettività sedimentaria al livello del bacino idrografico	Modellazione concettuale	Martins, 2021 ; Chapuis e Adnès, 2024	Chapuis, <i>submit</i> .

I lavori esplorativi citati nella Tabella 5 hanno permesso di testare una pluralità di strumenti, provenienti da discipline diverse e in grado di catturare i fenomeni a diverse scale spaziali e temporali. Possiamo notare il ricorso a strumentazione di campo (tracciamento sedimentario tramite RFID passivo e poi attivo, sismica passiva, topografia, campionamenti granulometrici...), ma anche a strumenti di programmazione, modellazione e ovviamente di geomatica. Si rimanda a ciascun lavoro menzionato per maggiori dettagli sugli strumenti e sui protocolli associati.

Uno studio sul trasporto solido non può prescindere dai dati idrologici. In generale, abbiamo lavorato con i dati provenienti da HydroPortail (in precedenza Banque Hydro), ma anche a partire da dati forniti da EDF e più recentemente dal monitoraggio in tempo reale istituito dal SMIAGE, o ancora da modellazioni idrologiche (Brigode et al., 2021). Notiamo anche l'interesse della bancarizzazione dei dati idrologici riguardanti il Roia sul sito dell'Osservatorio del Roia (<https://observatoire-nappe-roya.com>).

## 2.2 Metodologia generale del tracciamento sedimentario tramite RFID

Nell'ottica di mettere in atto una quantificazione del trasporto sedimentario grossolano nel Roia, è stato realizzato uno studio preliminare, che consisteva in particolare nel condurre campionamenti granulometrici sui sedimenti costitutivi dell'alveo, per determinare la distribuzione granulometrica in loco e eventualmente mobile. Questo lavoro ha dato luogo a una tesi di livello master (Lejeune, 2016). Questo lavoro preliminare ha anche permesso di prendere conoscenza dei (rari) studi esistenti sul bacino idrografico riguardanti il trasporto sedimentario, l'idrologia, la mappatura delle zone-sorgenti e i profili in lunghezza esistenti.

Nel 2018, l'installazione dei primi traccianti RFID passivi (Tourade, 2018) si è quindi basata, da un lato, su questo studio preliminare e, dall'altro, su approfondimenti metodologici riguardanti la RFID passiva provenienti da studi precedenti (esempio: Chapuis et al., 2014).

Per caratterizzare e quantificare gli spostamenti delle particelle sedimentarie nel ramo principale, l'impianto di traccianti RFID è stato realizzato in 3 siti nel 2018. A seguito della tempesta Alex del 02/10/2020, è stato attrezzato un quarto sito a monte. Così, da monte a valle, i 4 siti di impianto di traccianti RFID sono localizzati (cfr. Figura 11):

- Vievola
- Fontan/Ambo
- Pertus
- Airole.

Questi siti sono stati scelti in base alla loro accessibilità, alla lunghezza accessibile per una prospezione a valle e alla loro distribuzione spaziale lungo il tratto di studio.

Ogni tracciante RFID è identificato da un numero unico, il che consente di costituire previamente all'installazione una database che raccoglie il numero di ciascun tracciante (stringa alfanumerica di 16 caratteri), il tipo di trasponder (passivo/attivo, dimensione), le dimensioni (assi  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ), il peso, il volume di ogni particella, le sue caratteristiche di forma (cfr. Tourade, 2018; Martins, 2018; Martins, 2021).

In ogni caso, la granulometria dei traccianti dispiegati imita nel miglior modo possibile la granulometria in loco. I traccianti sono stati dispiegati ad intervalli regolari su profili trasversali (transetti) al fine di realizzare una maglia regolare nel settore studiato, garantendo al contempo una distribuzione casuale della granulometria dei traccianti su questa griglia. Ciò si declina su scala fine (per lo studio delle zone di deposizione, cfr. sezione 2.3) o su scala del tratto di studio (per lo studio della mobilità dell'intera frazione granulometrica in loco, cfr. sezione 3.2).

La posizione iniziale di ciascun tracciante è registrata tramite un GPS differenziale (GPS Trimble® R10, precisione di questa posizione dopo post-trattamento: dell'ordine di una ventina di centimetri in  $x$ ;  $y$ ;  $z$ ; cfr. Martins, 2018). Si noti che il carattere incassato della valle del Roia impedisce l'uso "diretto/semplice" di questo tipo di GPS e richiede un post-trattamento dispendioso in termini di tempo in aggiunta ad altre tecniche di misura topografica adattate, più "rustiche" e quindi robuste (decametro, stazione totale...).

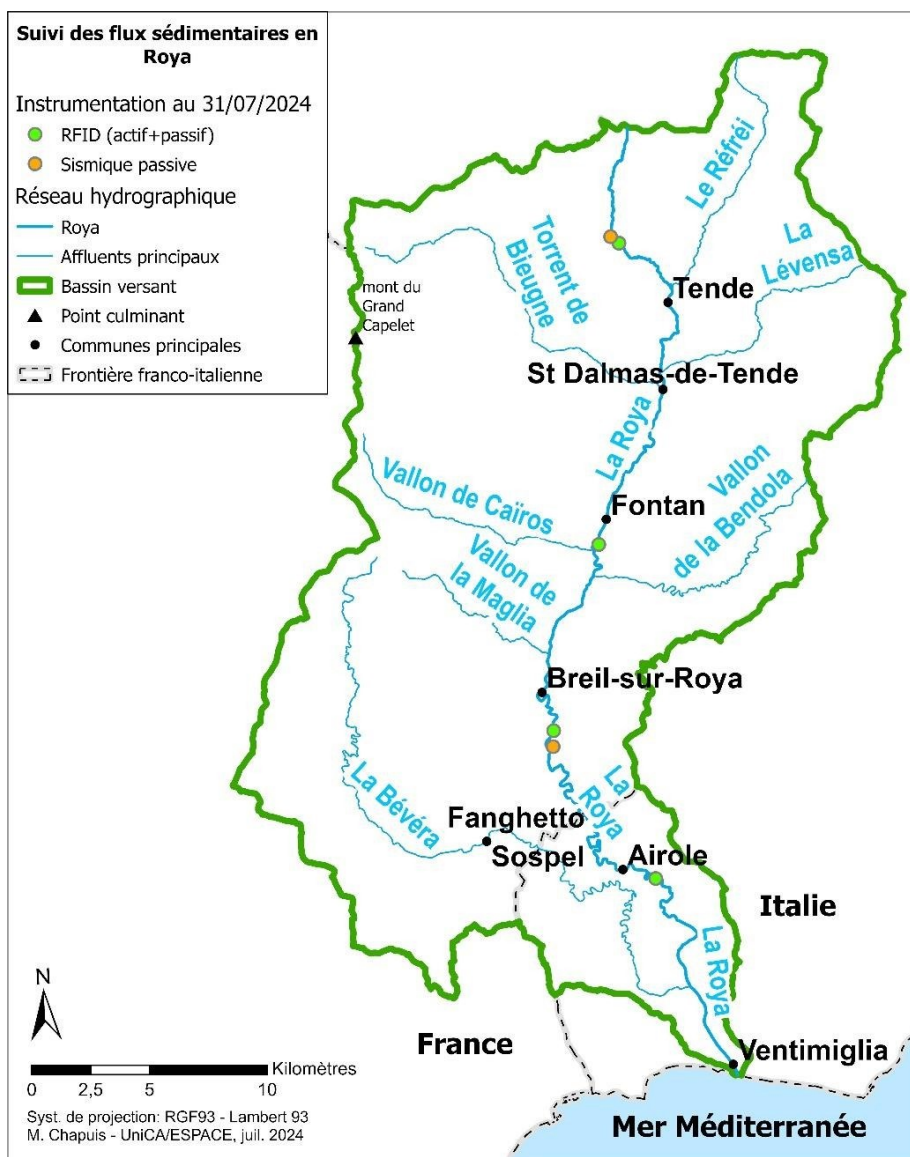


Figura 11. Siti strumentati nel Roia nell'ambito dei progetti Interreg Alcotra Concert-Eaux (2017-2020) e Concert-Eaux OPERA (2023-2024).

Sono indicati i settori di installazione dei traccianti RFID e la localizzazione dei 2 geofoni installati (monitoraggio continuo tramite sismica passiva, vedi sezione 2.3).

Il monitoraggio della mobilità dei traccianti avviene con una frequenza annuale. Infatti, inizialmente avevamo previsto di effettuare un monitoraggio evento per evento, ma le condizioni torrentizie non lo consentono (divieto di accesso all'alveo del corso d'acqua a causa della normativa riguardante la riproduzione delle trote; impossibilità di muoversi nell'alveo salvo per portate vicine al minimo) : solo un monitoraggio nel cuore dell'estate è possibile. Questo monitoraggio consiste nel setacciare l'intera fascia attiva utilizzando un'antenna RFID, registrare la posizione di ciascun tracciante ritrovato e digitalizzare l'area esplorata durante ogni campagna di prospezione. Si possono riassumere qui di seguito i risultati attesi nel caso in cui questa prospezione venga oggetto di subappalto:

- Una geodatabase dei traccianti ritrovati, formato .shp/punti intitolata ProspezioneRFID\_2024vf.shp che specifica la posizione di ciascun tracciante ritrovato, con una struttura della tabella attributi del tipo:
  - Tipo di prospezione: attivo/passivo
  - Codice di identificazione del tracciante (codice alfanumerico di 16 cifre per i

- o traccianti passivi, 3 cifre per gli attivi)
- o Data di prospezione
- o Coordinate (x; y; z) del tracciante ritrovato (sistema di coordinate RGF 93-Lambert 93)
- o Commento in formato testo (del tipo: stima della precisione della localizzazione o qualsiasi altra informazione utile)
- o Operatore/validatore del dato
- Un file .shp/poligoni intitolato Zone\_prospezione\_2024vf.shp che specifica per ogni giorno di prospezione l'impronta dell'area esplorata, la struttura della tabella attributi del tipo specificato di seguito. La digitalizzazione di quest'area esplorata è possibile a partire da un'ortofotografia; in questo caso sarà necessario specificare nel rapporto il set di dati utilizzato (produttore, data, impronta) e allegarlo all'invio in formato .ecw. La struttura della tabella attributi del layer Zone\_prospezione\_2024vf.shp è la seguente:
  - o Data di prospezione
  - o Tipo di prospezione (attivo/passivo)
  - o Superficie in m<sup>2</sup>
  - o Coordinate (x; y; z) del baricentro di ciascun poligono (sistema di coordinate RGF 93-Lambert 93)
  - o Commento in formato testo (del tipo: stima della precisione della georeferenziazione o qualsiasi altra informazione utile)
  - o Operatore/validatore del dato.

Questi GIS file sono prodotti nel sistema di coordinate RGF 93-Lambert 93 (EPSG 2154) e compatibili con una lettura sotto QGIS. Sono accompagnati da un rapporto che descrive sinteticamente la campagna, che menziona in particolare:

- Il numero di persone/giorni realizzati
- Le eventuali limitazioni all'interpretazione dei risultati in termini di distanze di trasporto negli ultimi anni (imprecisione della localizzazione, impossibilità di setacciare alcune forme fluviali identificate come zone di deposito probabili, che dovranno essere mappate nel .shp « zona di prospezione » se particolarmente estese, ecc.).

Per maggiori dettagli sulla metodologia adottata durante il monitoraggio tramite tracciamento RFID nel Roia, si rimanda utilmente ai lavori degli studenti seguenti: Tourade, 2018; Martins, 2018; Martins, 2019; Martins, 2021.

## 2.3 Monitoraggio dei flussi sedimentari tramite sismica passiva

Di fronte alle sfide tecniche e logistiche rappresentate da un tracciamento RFID in un contesto torrentizio, e con l'obiettivo di ottenere dati in continuo piuttosto che su una frequenza di eventi (o piuttosto annuale nel caso del Roia), abbiamo rapidamente deciso di completare il dispositivo esistente con l'installazione di un geofono (sismica passiva) dedicato al monitoraggio dei flussi sedimentari in continuo.

Nel giugno 2020 abbiamo quindi installato un geofono dotato di una centrale di acquisizione e abbiamo potuto avviare l'acquisizione di dati sismici in continuo a partire dal 23/06/2020 a valle di Breil (sito dell'Arbousset, cfr. Figura 11). Poiché si trattava di una prima installazione in un contesto così “chiuso” e “roccioso” (contesto di gole rispetto al contesto alluvionale privilegiato fino ad ora, cfr. Bakker et al., 2020; Misset et al., 2020, T. Geay, com. pers.), una rapida campagna di test delle vibrazioni dovute all'impatto delle particelle sul substrato sottostante il geofono ha dimostrato che il sistema di acquisizione funzionava e poteva registrare il trasporto sedimentario in piena. Dopo un primo rilievo dei dati acquisiti durante l'estate (rilievo del 18/09/2020), e senza che avessimo ancora avuto il tempo di analizzarli o, tanto meno, di calibrare lo strumento, è avvenuto l'episodio della tempesta Alex (piena del 02/10/2020), caratterizzato poi come avente un periodo di ritorno di 1000 anni (ONF-RTM et al., 2023a). Il geofono non è stato portato via e ha potuto registrare l'evento. Si tratta quindi dell'unico strumento di misura in fondo valle che consente di risalire alla cinetica della piena, poiché tutti gli strumenti di misura idrologica nel bacino idrografico sono stati travolti dalla piena. Si segnala che altri dispositivi sismici, non dedicati al monitoraggio del trasporto sedimentario nel Roia, hanno comunque rilevato l'evento (Chmiel et al., 2022). Questo monitoraggio sismico a livello dell'Arbousset è stato completato dal 28/05/2024 con un dispositivo simile localizzato presso la cappella di Vievola. Le specifiche tecniche degli strumenti installati sono dettagliate nella Tabella 6. La teletrasmissione dei dati sismici acquisiti è prevista a breve termine: i dispositivi necessitano attualmente un accesso manuale per scaricare i dati ogni 3 mesi. L'ambiente geografico dei due siti è molto diverso (cfr. Figura 12): il sito dell'Arbousset è essenzialmente roccioso, in un settore di gole con substrato affiorante, mentre il sito della Madonna di Vievola è alluvionale e strutturato dalla confluenza tra il Roia e il vallone della Morte.

Tabella 6. Specifiche tecniche dei geofoni installati in Roia.

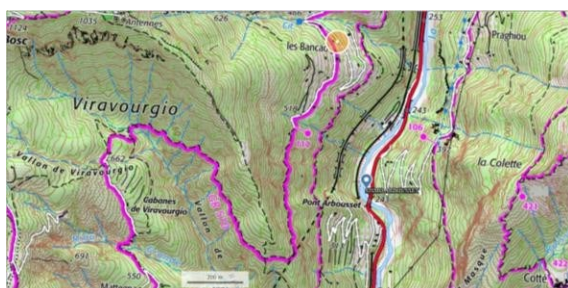
Sito di installazione	Arbousset	Vievola
Data di installazione	23/06/2024	28/05/2024
Coordinate del sito X; Y (RGF93-Lambert93)	1062559,52 ; 6323593,85	1065269,20 ; 6345210,49
Altitudine (s.l.m.)	247,2 m	966,7 m
Ambiente geografico	Substrato affiorante (gole); strada dipartimentale e ferrovia nelle immediate vicinanze	Alluvionale, confluenza con il vallone della Morte; strada dipartimentale nelle immediate vicinanze, ferrovia a 200 m.
Proprietario del lotto	Particolare	Comune di Tenda
Distanza dall'alveo orizzontale/verticale	7 m / 4 m	14 m / 1 m
Geofono	Modello PE-6/B di marca SENSOR Nederland, fornito da Digos. Geofono a 3 componenti con frequenza di 4,5 Hz e sensore di 3 m, cavo adatto a DATA- CUBE <sup>3</sup> . Registrazione su un'unica componente (z).	idem
Centralina di acquisizione	Registratore di dati sismici Digos DATA-CUBE <sup>3</sup> tipo 2 (3 canali, 32 GB, versione con alimentazione esterna, antenna GPS esterna inclusa). Frequenza di registrazione: 800 Hz (800 misurazioni al secondo).	idem
Centralina di teletrasmissione	Comunicazione CUBE (CCUBE) per streaming di dati in tempo reale in formato miniSEED tramite LTE/UMTS, WiFi ed Ethernet (non ancora operativa).	idem
Formato dei dati (proprietario)	.BMJ	.C8S
Profondità di installazione	0,70 m	idem
Modalità di alimentazione	Pannelli solari	Rete elettrica



(a) Arbusset, la vista è presa verso monte e il geofono è localizzato in riva sinistra (a destra della foto). Scatto nov. 2022.

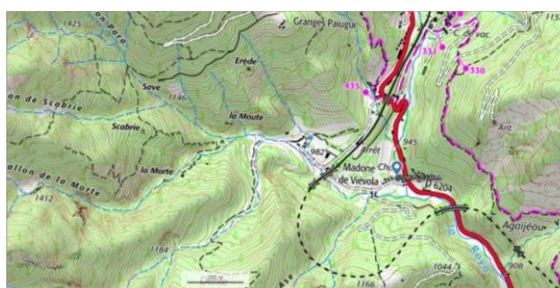


(b) Madonna di Vievola, la vista è presa verso monte e il geofono è localizzato in riva destra (a sinistra della foto). Scatto lug. 2024.



(c) Arbusset. La posizione del geofono è indicata da una goccia blu, coordinate in RGF 93-Lambert 93: 1062559,52 ; 6323593,85.

Fonte: [www.geoportail.gouv.fr](http://www.geoportail.gouv.fr), IGN 2023 [mappa prodotta il 26/07/2024].



(d) Madonna di Vievola. La posizione del geofono è indicata da una goccia blu, coordinate in RGF 93-Lambert 93: 1065269,20 ; 6345210,49.

Fonte: [www.geoportail.gouv.fr](http://www.geoportail.gouv.fr), IGN 2023 [mappa prodotta il 26/07/2024].

Figura 12. Situazione geografica dei geofoni installati nel Roia. (a) e (c) Sito dell'Arbusset. (b) e (d) Sito di Vievola.

I dati sono acquisiti in un formato proprietario (estensione .BMJ o .C8S). Vengono quindi trattati sotto R Studio secondo una routine inizialmente sviluppata da T. Geay (attualmente ONF-RTM) e ottimizzata da F. Lombard (ESPACE-AMU). Questo post-trattamento include un sottocampionamento dei dati registrati e presenta i dati sotto forma di grafico potenza =  $f(\text{tempo})$  o spettrogramma =  $f(\text{tempo})$ .

## 3 Risultati

### 3.1 Dinamica sedimentaria delle zone di frega nel Roia: contributi di un monitoraggio tramite RFID passivo

Nonostante la presenza di diverse dighe, in particolare lungo il ramo principale, e l'occorrenza di piene improvvise e intense tipiche del regime mediterraneo, il Roia è conosciuto per le sue popolazioni di trote di ceppo selvatico (mediterraneo) e l'attività di pesca è molto sviluppata. Questo studio (Chapuis et al., 2019a) mirava a esplorare il legame tra idrologia e evoluzioni morfo-sedimentari delle zone di frega (aree di riproduzione) delle trote, per fornire elementi di comprensione riguardo:

- Da un lato, il carattere stabile nel tempo e nello spazio delle zone di frega delle trote in questo corso d'acqua (Saint Pé et al., 2018)
- Dall'altro lato, la possibile influenza delle manovre delle dighe sulla dinamica di queste zone di frega.

A tal fine, abbiamo equipaggiato le particelle sedimentarie costituenti il materiale delle zone di frega con trasponderi RFID passivi. In parallelo, l'intera distribuzione granulometrica del materiale alluvionale presente nell'alveo è stato oggetto di un tracciamento sedimentario, al fine di valutare i flussi all'interno del ramo principale. Per ricordare (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 trasponder (trasmettitore) RFID consente di identificare il movimento di un ciottolo contrassegnato grazie ad un identificatore unico. La localizzazione dei traccianti e la topografia della zona di studio sono state inoltre seguite tramite GPS (GPS Trimble® R10) prima e dopo le piene primaverili, durante le estati del 2018 e del 2019. Per maggiori dettagli sui materiali e sui protocolli utilizzati, il lettore può fare riferimento ai lavori degli studenti: Tourade, 2018; Martins, 2018; Martins, 2019; Martins, 2021. Più in generale sul tracciamento RFID, il lettore può anche consultare i lavori di Chapuis et al., 2014 e Arnaud et al., 2015.

In totale, sono stati distribuiti oltre 800 traccianti tra marzo 2018 e aprile 2019, su 3 siti localizzati sul ramo principale (vedi Figura 11: siti di Fontan/Ambo, Pertus, Airole/Lamberta). Su ogni sito, oltre al rilievo topografico della zona, l'installazione è stata suddivisa in due sequenze:

- Una sequenza “zone di frega”: un centinaio di traccianti sono stati distribuiti sulla superficie di una zona di frega identificata, secondo un reticolo regolare che coprirebbe l'intera zona di frega e mimando la granulometria del materiale in loco; la granulometria dei traccianti di questo gruppo è quindi relativamente fine ( $D_{50} = 12$  mm, vedi Figura 13), il che ha comportato una sfida tecnica per equipaggiare particelle così piccole
- Una sequenza “intera distribuzione granulometrica” (GSD totale, per “distribuzione granulometrica”): un'altro centinaio di traccianti sono stati distribuiti, questa volta su scala dell'intero sito, sempre secondo un reticolo regolare, ma più distanziato per coprire l'intera sequenza *riffle-pool* (sequenza gradino-pozza). La granulometria dei traccianti di questo gruppo è quindi relativamente grossolana ( $D_{50}$  compreso tra 28 e 188 mm, vedi Figura 13).

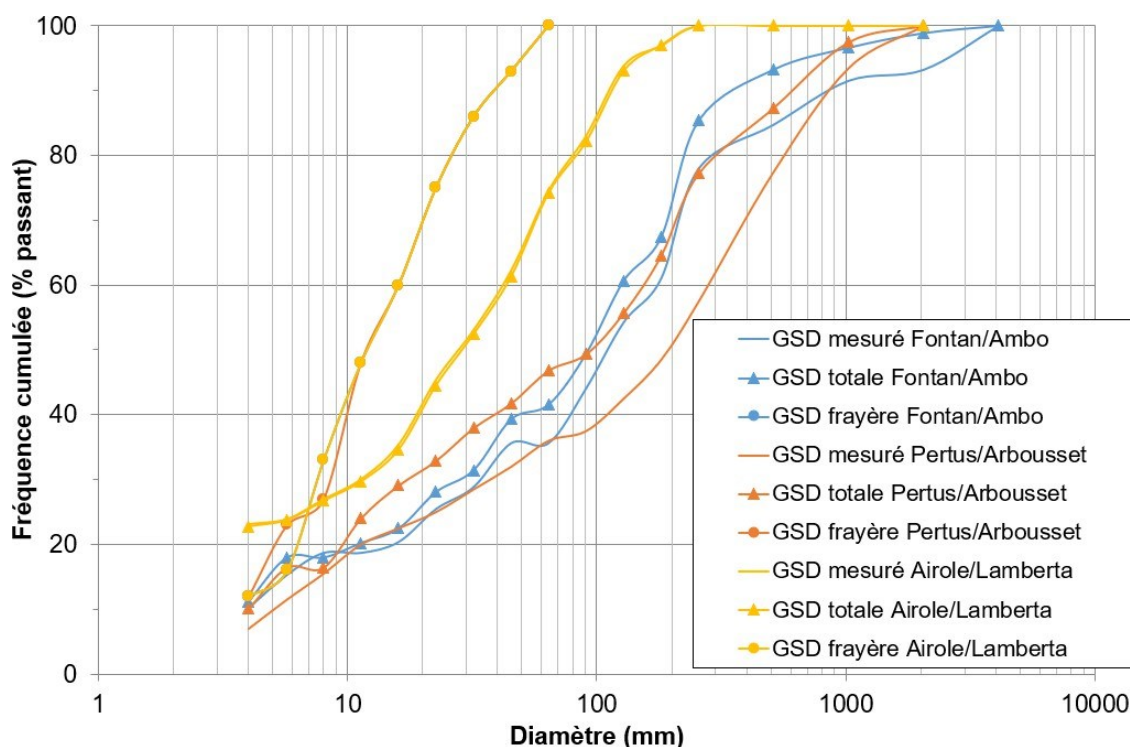
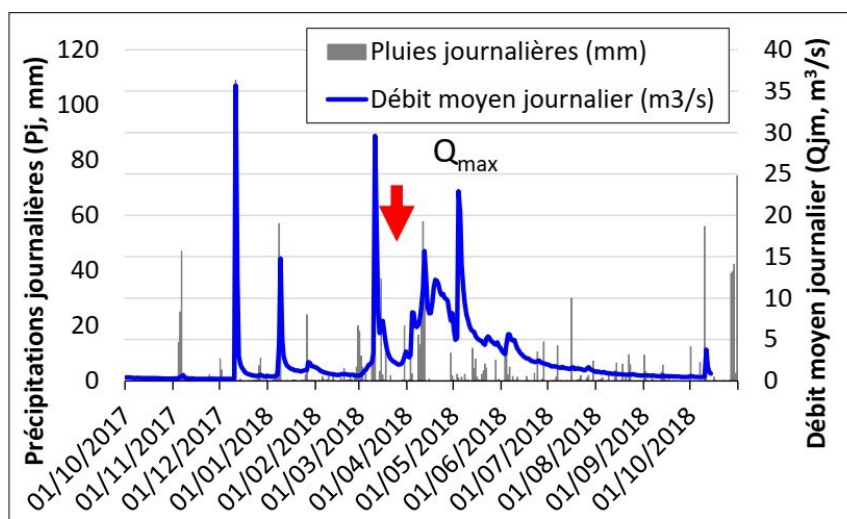


Figura 13. Distribuzioni granulometriche (GSD) sui 3 siti di studio Fontan/Ambo, Pertus/Arbousset e Airole/Lamberta.

Per ogni sito, è indicata la distribuzione granulometrica misurata in situ, la distribuzione granulometrica dei traccianti della sequenza "intera disitrbuzione granulometrica" ("GSD totale") e la distribuzione granulometrica dei traccianti della sequenza "zone di frega" ("GSD frayère").

Dopo l'installazione della prima serie di traccianti RFID, si è verificata una piena prolungata nella primavera del 2018 ( $Q_{\max}$  istantaneo =  $63 \text{ m}^3/\text{s}$  il 04/05/2018, vedi Figura 14) che ha rimobilizzato tutto il materiale dell'alveo di diametro  $< 512 \text{ mm}$  e tutti i traccianti RFID delle zone di frega. I traccianti installati sono stati quindi reinseriti nella massa del materiale dell'alveo e il loro spostamento è rappresentativo delle dinamiche sedimentarie nel corso d'acqua fin dalla prima campagna di monitoraggio. I risultati presentati di seguito si concentrano sul sito di Pertus (vedi Figura 15) e sul sito di Airole/Lamberta (vedi Figura 16). Si noti che le zone di frega mostrano un'evoluzione topografica verticale dell'ordine di un metro durante questo evento idrologico di intensità moderata.



### Précipitations journalières (Pj) et débit moyen journalier (Qjm)

St Dalmas-de-Tende, 01/10/2017 – 30/04/2018

(données Banque Hydro et Météo France)

Figura 14. Precipitazioni giornaliere e portata media giornaliera a S. Dalmazzo-di-Tenda, 01/10/2017 – 30/04/2018. Dati Banque Hydro e Météo France, in Chapuis et al., 2019a. La freccia rossa indica il periodo di distribuzione dei traccianti.

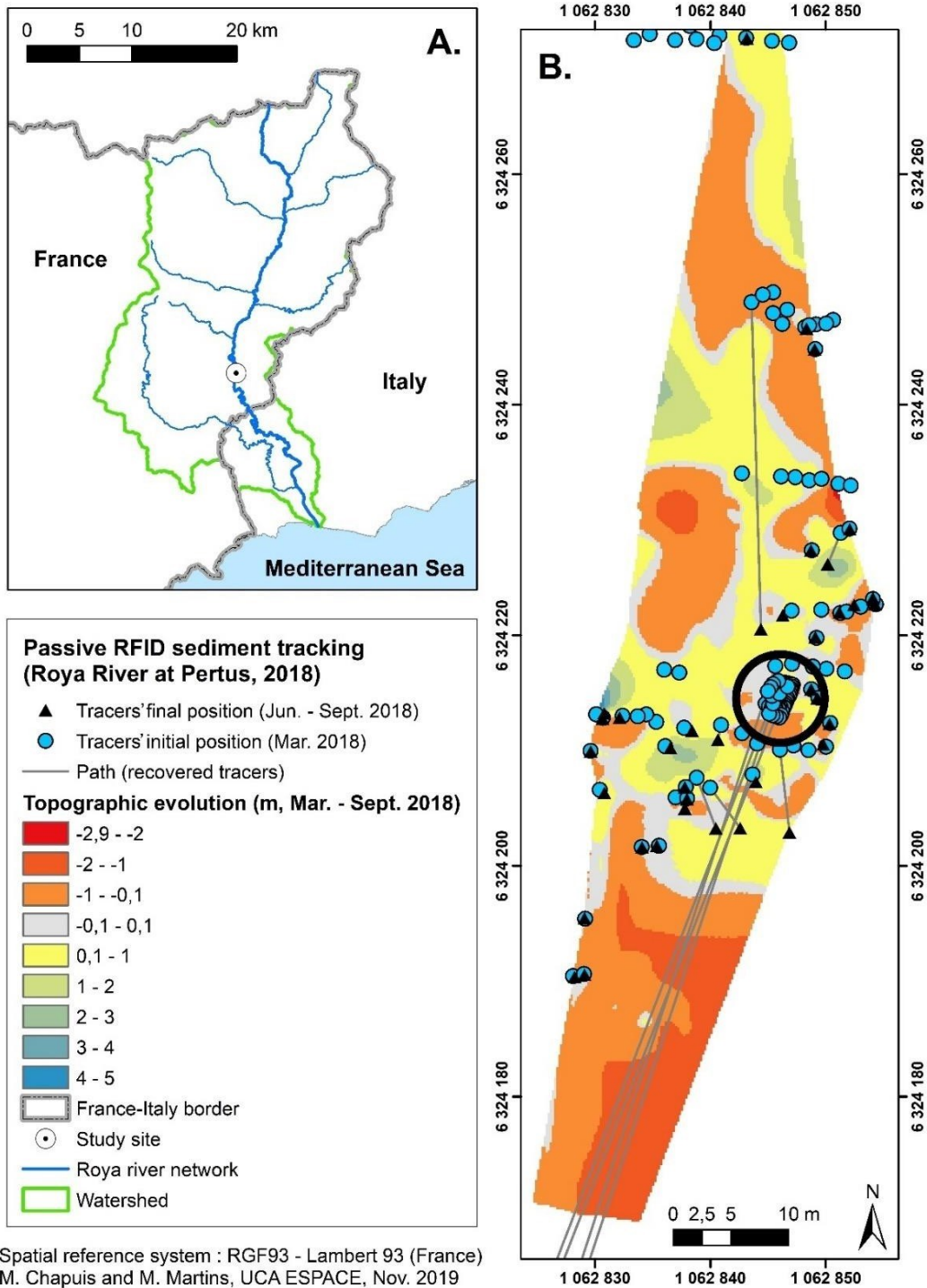


Figura 15. Risultati 2018 del tracciamento sedimentario a Pertus. (a) Sito di studio: il Roia a Pertus. (b) Posizione iniziale, posizione finale, spostamento dei traccianti ritrovati ed evoluzione topografica dell'area tra marzo e settembre 2018.

Il flusso è orientato da nord a sud. L'ubicazione della zona di frega è indicata da un cerchio nero e presenta un'elevata densità di traccianti per seguire in dettaglio l'evoluzione morfo-sedimentaria della zona di frega.

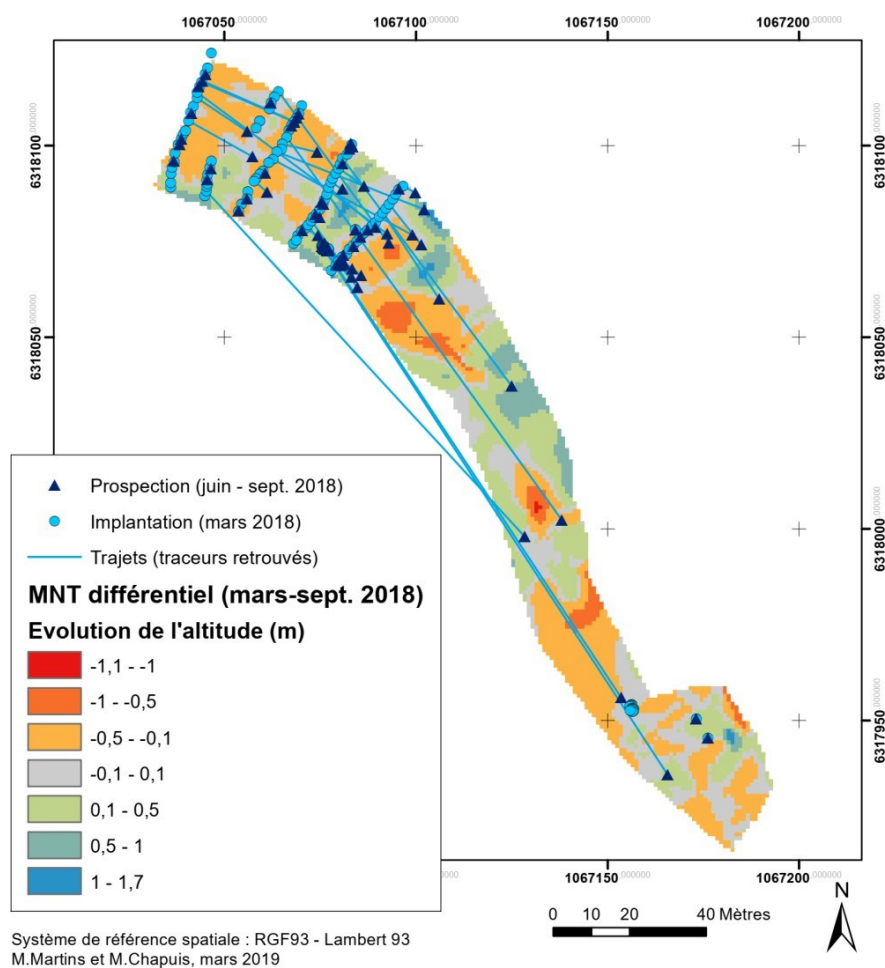


Figura 16. Risultati 2018 del tracciamento sedimentario sul sito di Aireole/Lamberta.

Sono indicate la posizione iniziale, la posizione finale, lo spostamento dei traccianti ritrovati e l'evoluzione topografica dell'area tra marzo e settembre 2018. Il flusso è orientato da nord a sud.

A seguito di questo primo anno di monitoraggio, l'evento idrologico principale è stata una piena rapida nella primavera del 2019 ( $Q_{\max}$  istantaneo = 133 m<sup>3</sup>/s il 24/04/2019), che ha anch'essa rimobilizzato tutto il materiale dell'alveo di diametro < 512 mm.

Tabella 7. Bilancio delle campagne di monitoraggio RFID passiva 2018 e 2019.

Campagna	Sito	Sequenza di distribuzione	Nr. di traccianti distribuiti	Nr. di traccianti ritrovati al 06/06/2019	Tasso di ritorno al 06/06/2019 (%)	Distanza massima (m)
2018	Fontan/Ambo	GSD totale	81	-	-	-
		Frega	53	-	-	-
	Pertus	GSD totale	78	38	49	89
		Frega	100	3	3	118
	Airole/Lamberta	GSD totale	102	56	55	171
		Frega	99	48	48	14
2019	Fontan/Ambo	GSD totale	27	-	-	-
		Frega	-	-	-	-
	Pertus	GSD totale	27	17	63	166
		Frega	101	1	1	8
	Airole/Lamberta	GSD totale	25	-	-	-
		Frega	100	-	-	-

GSD: Distribuzione granulometrica

Nonostante tassi di recupero bassi, se non molto bassi (cfr. Tabella 7), abbiamo evidenziato condizioni di trasporto totale per il materiale delle zone di frega durante i due anni di monitoraggio, su distanze superiori ad un centinaio di metri (massimo rilevato: 118 m per un trasmettore di 6 mm di diametro nel 2018).

Le due campagne di monitoraggio del 2018 e 2019 suggeriscono un controllo idraulico della posizione delle zone di frega, dovuto al controllo strutturale esercitato dai blocchi plurimetrici sul deposito delle particelle costitutivi della zona di frega. Il monitoraggio ha anche mostrato un completo rinnovamento del materiale della zona di frega durante gli episodi di piena, assicurando così la qualità degli habitat. È importante notare che le osservazioni supplementari hanno mostrato che le regolazioni del flusso corrispondevano a una mobilità parziale del materiale delle zone di frega, impedendo così sia il *clogging* (l'intasamento) da sedimenti fini che lo sviluppo di biofilm.

Per completare il dispositivo esistente, era stata installata un'antenna RFID passiva fissa al ponte dell'Arbousset (cfr. Figura 11). Non ha resistito alla prima piena: l'alta potenza specifica (> 2000 W/m<sup>2</sup> in piena) impedisce di mantenere un'antenna fissa funzionale, ma resta una pista privilegiata per completare questo monitoraggio (cfr. sezione 4). Infine, una nuova campagna d'installazione di trasmettitori RFID passivi era stata effettuata nel 2021 (776 trasmettitori dispiegati su 4 siti: Vievola, Fontan/Ambo, Pertus/Arbousset, Airole/Lamberta, cfr. Tabella 8 e Martins, 2021), per implementare un monitoraggio post-Alex. A causa del carattere sempre così dispendioso in termini di tempo della prospezione, anche in un alveo meno accidentato a seguito della metamorfosi fluviale post-Alex, abbiamo potuto realizzare un monitoraggio nel 2024 solo sul sito di Vievola, il che ha permesso di ritrovare 4 trasmettitori, di cui la massima distanza di trasporto misurata è stata di 4260 m in 3 anni (cfr. Weiland, 2024).

Tabella 8. Sintesi dell'installazione di traccianti RFID passivi post-Alex nell'estate 2021.

Sito	GSD totale	Frega	Totale
Vievola	118	70	188
Fontan/Ambo	116	80	196
Pertus/Arbousset	116	80	196
Airole/Lamberta	116	80	196
Totale	466	310	776

Dal punto di vista tecnico, i risultati di questa operazione di tracciamento sedimentario mostrano l'inadeguatezza della RFID passiva in un contesto di granulometria molto estesa: i blocchi plurimetrici, anche dopo Alex, rendono la prospezione difficile. Le campagne sul campo hanno evidenziato 1/ l'estensione della distribuzione granulometrica regolarmente mobile (5 mm <  $\varnothing$  < 512 mm prima dell'evento Alex del 02/10/2020) e 2/ un controllo strutturale esercitato dai blocchi plurimetrici e dal substrato sulla mobilità delle particelle, particolarmente prima di Alex. La RFID attiva conferma il suo potenziale in questo tipo di terreno accidentato (cfr. sezione 3.2), in particolare per lo studio delle distanze di trasporto annuali e nei settori transizionali nella bassa valle, ma rimane comunque dispendiosa in termini di tempo e necessita un personale qualificato. A monte, le numerose porzioni sommerse spiegano anche i bassi tassi di recupero in questi settori, sia per il monitoraggio tramite RFID passiva che attiva.

Tuttavia, ci sono prospettive per l'interpretazione dei risultati anche con bassi tassi di recupero: MacVicar e Papangelakis (2022) sottolineano quanto “si possa dire molto” a partire dai traccianti mancanti. In particolare, le interpretazioni incrociate con le evoluzioni morfologiche dell'alveo (monitoraggio topografico) arricchiscono notevolmente l'analisi grezza degli spostamenti dei traccianti (Liébault et al., 2023).

### 3.2 Trasporto solido dell'intera distribuzione granulometrica: elementi di conoscenza derivanti da un'operazione pluriennale di tracciamento sedimentario, discussioni e prospettive di ricerca

Nella primavera del 2019, 79 traccianti RFID attivi sono stati distribuiti in Roia, nei siti di Fontan/Ambo, Pertus e Airole/Lamberta (rispettivamente 27, 25 e 27 traccianti distribuiti, strategia di distribuzione: cfr. sezione 2.2 e Martins, 2019). I siti di Fontan/Ambo e Pertus hanno subito immediatamente dopo l'installazione una piena primaverile di 133 m<sup>3</sup>/s: si può quindi considerare che i traccianti di questi due siti siano stati reintegrati nella massa e abbiano quindi un comportamento simile a quello delle particelle che costituiscono il carico alluvionale fin dalla campagna di prospezione dell'estate 2019. Per quanto riguarda il sito di Airole/Lamberta, si considererà che la prima campagna di risultati affidabili sia quella dell'estate 2020. I risultati delle campagne annuali di monitoraggio sono presentati nella Tabella 9. Le distanze di trasporto osservate in questo contesto torrentizio sono coerenti con i risultati di altri studi disponibili (si veda Liébault et al., 2023 per un elenco completo degli studi di tracciamento, inclusi RFID passivo e attivo, e ad esempio Arnaud et al., 2023 per un monitoraggio pluriennale in contesto alluvionale con una pendenza media dell'ordine di 1‰, quindi un ordine di grandezza inferiore rispetto alla pendenza del Roia).

Tabella 9. Risultati annuali delle campagne di tracciamento sedimentario tramite RFID attiva a partire dal 2019.

Le portate menzionate sono superiori alla  $Q_2$  e sono quindi formative. I numeri in corsivo sono valori riesaminati. Precisione della localizzazione: circa 150-200 m. Per memoria, i dati derivanti dal monitoraggio tramite RFID passiva a Pertus nel 2024 hanno riguardato 2 traccianti, la cui distanza di trasporto è stata rispettivamente di 771 m tra il 2018 e il 2024, e 947 m tra il 2021 e il 2024.

<b>Anno di monitoraggio</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	
Q <sub>max</sub> a Breil (m <sup>3</sup> /s)	133	140	[1000 ;1500]	9*	11* <sub>μ</sub>	23 <sub>£</sub>	
Numero di traccianti ritrovati	17	16	4	22	29	3	
Dist. di trasporto max. (m)							
Sito	Vievola	/	/	/	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 specificato/non pertinente

\* : portata media giornaliera

μ : in attesa di dati per convalida

£ : a S. Dalmazzo

Tabella 10. Velocità annuale virtuale media nel periodo considerato (m/anno). Sono indicati il numero di traccianti da cui è stato calcolato il valore. I risultati che si collocano nell'intervallo di incertezza delle misurazioni sul campo sono indicati tra parentesi.

Periodo	2021-2023		2019-2023	
	Dimensione del campione	Velocità virtuale (m/an)	Dimensione del campione	Velocità virtuale (m/an)
Vievola	n=8	323	n=0	/
Ambo	n=2	(106)	n=0	/
Pertus	n=3	(179)	n=0	/
Lamberta	n=4	(30)	n=5	383

Si noti che la campagna del 2021 corrisponde al monitoraggio post-Alex: il movimento dei traccianti ritrovati dopo la piena è presentato nella Figura 17 e mostra una distanza di trasporto massima osservata che, pur rimanendo dello stesso ordine di grandezza di prima di Alex, è più elevata e presenta una maggiore incertezza. Il (molto) basso tasso di recupero rende difficile qualsiasi interpretazione sulle distanze di trasporto osservate. Il fatto stesso che pochi traccianti siano stati ritrovati solleva interrogativi riguardo alle ragioni di questo basso tasso di recupero: infatti, le cause di non recupero dei traccianti sono già state identificate (Lamarre et al., 2005; Liébault et al., 2012). Qui, le ipotesi di spiegazione più probabili sono:

- La rottura dei trasponder
- L'export al di fuori della zona di prospezione, ossia in Mediterraneo, poiché l'intera banda attiva rimobilizzata durante la tempesta Alex è stata monitorata.

Infatti, con i traccianti RFID attivi, si evita il problema della collisione del segnale dovuto al raggruppamento, che era stato identificato per i traccianti passivi. D'altra parte, il substrato è ampiamente affiorante su gran parte del tratto e gli spessori alluvionali sono generalmente inferiori a un metro (Chapuis et al., 2019a), in particolare nella parte a valle, dove l'onda sedimentaria causata dall'episodio Alex sembra essersi attenuata (Liébault et al., 2024), ossia nei siti di Pertus e Airole. Questo rende poco probabile un interrimento dei traccianti che impedirebbe una rilevazione, anche nonostante la metamorfosi fluviale osservata post-Alex (Liébault et al., 2024).

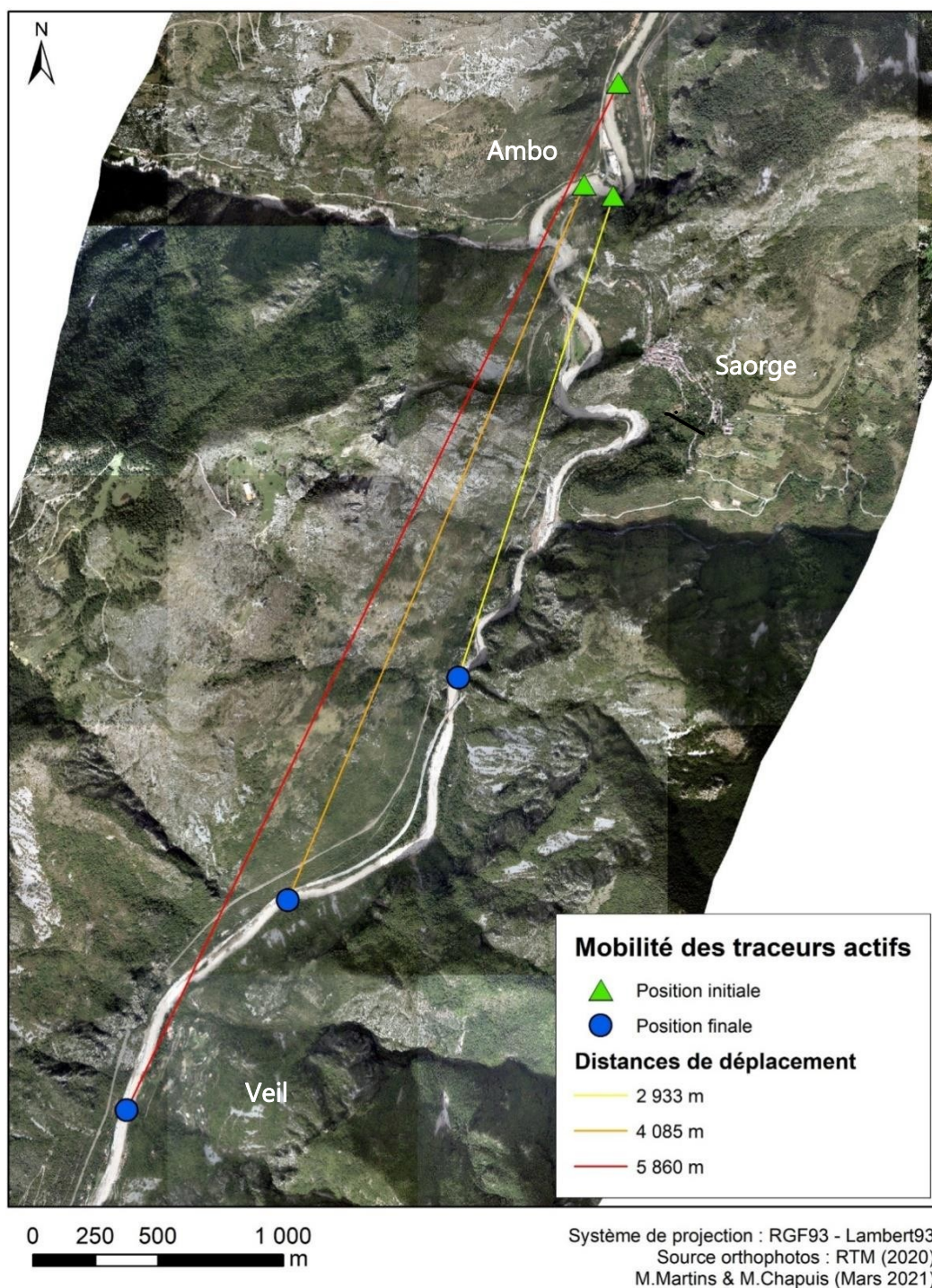


Figura 17. Cartografia dei risultati della tracciatura sedimentaria tramite RFID attiva post-Alex (campagna 2021) per i traccianti inizialmente situati sul sito Fontan/Ambo.

Il flusso è orientato da nord a sud. Le distanze in linea d'aria sono rappresentate sulla mappa, mentre i valori menzionati nella legenda corrispondono alle distanze reali percorse dai traccianti ritrovati dopo l'alluvione. Modificato da Martins e Chapuis, 2021.

### 3.3 Studio dei flussi sedimentari nel Roia: elementi di conoscenza derivanti dal monitoraggio tramite sismica passiva, discussioni e prospettive di ricerca

Per completare il monitoraggio annuale dei trasferimenti sedimentari tramite tracciamento RFID, che si è rivelato ancora più complicato e dispendioso in termini di tempo del previsto in questo contesto torrentizio complesso, abbiamo deciso nel 2019 di implementare un monitoraggio tramite sismica passiva nel Roia. La tecnologia utilizzata era allora ancora in fase di sviluppo e non era stata testata in un contesto così roccioso (gole con affioramenti di substrato, invece dei tratti a carico alluvionale testati fino a quel momento; T. Geay, com. pers.).

Abbiamo quindi installato un geofono (sismometro) il 23/06/2020 (cfr. sezione 2.3) nel settore dell'Arbousset. Come accennato in precedenza, questo strumento di misura ha resistito alla piena del 02/10/2020 e consente di risalire alla cinetica della piena. Un secondo geofono è stato recentemente installato a monte (Vievola il 28/05/2024, cfr. Figura 11 e Tabella 6).

Più in generale, questa strumentazione consente un monitoraggio continuo dei flussi sedimentari nel corso d'acqua. Non calibrata, non può pretendere una quantificazione assoluta dei flussi come è stato possibile realizzare nello studio di Misset et al. (2020). Tuttavia, consente un apprezzamento (cfr. Figura 18):

- Dell'intensità relativa degli eventi di trasporto solido su tutta la cronologia
- Della cinetica di questi eventi.

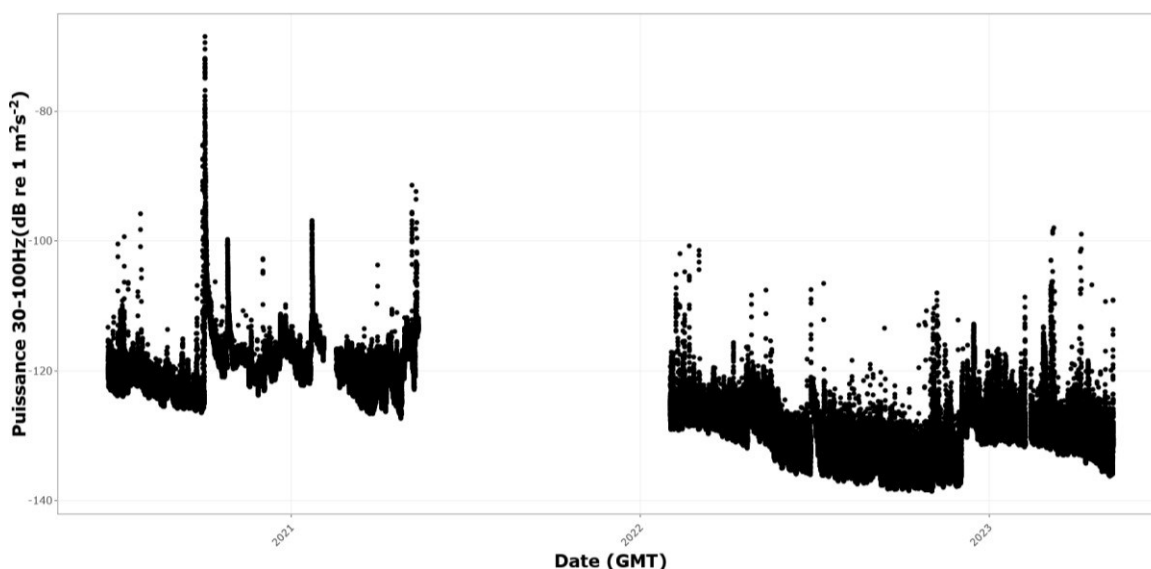


Figura 18. Risultati del monitoraggio tramite sismica passiva nel settore dell'Arbousset tra il 24/06/2020 e l'11/05/2023. Si segnala in particolare l'episodio di trasporto solido associato alla tempesta Alex del 02/10/2020.

Sull'asse delle ordinate sono presentate le variazioni di ampiezza della banda spettrale 30-100 Hz sulla componente z, che corrisponde a una variazione dell'intensità (cioè della potenza) delle vibrazioni sul terreno su questa componente associata al trasporto sedimentario nel corso d'acqua. Il periodo bianco che va dalla metà del 2021 all'inizio del 2022 corrisponde a un guasto della strumentazione (alimentazione elettrica difettosa).

Come abbiamo specificato nella sezione 2.3, il geofono installato a valle di Breil è l'unico strumento di misura nel Roia dedicato al monitoraggio del corso d'acqua che non è stato portato via: consente quindi di seguire la cinetica della piena da un punto di vista sedimentario e ha in particolare permesso di fornire rapidamente alcuni elementi riguardo alla calibrazione delle modellizzazioni idrologiche, prima che il resoconto dell'esperienza idrologica fosse reso disponibile (CEREMA, 2021; Brigode et al., 2021; Chapuis et al., 2022b).

È interessante confrontare la dinamica della piena come riportato dai testimoni nel resoconto post-Alex (ONF-RTM et al., 2023a) e la cinetica del segnale sismico. Infatti, il resoconto menziona che « [a] monte di Breil-sur-Roya, i primi straripamenti sono documentati a partire dalle ore 18:20. Il picco di piena è descritto come avvenuto tra le 00:45 (livello di +2 m rispetto al piano del ponte Charabot) e le 02:00 del mattino. » (p. 39). Secondo la successione della registrazione oraria ricostruita, alle 20 viene menzionato che il « Ponte Viel [è] già stato portato via », accompagnato da una « interruzione dell'elettricità ». Va notato infine che il resoconto post-Alex ha messo in evidenza l'esistenza di un picco di piena intorno all'1-2 del 03/10/2020 a Breil (ONF-RTM et al., 2023a, p. 50).

Le misure sismiche all'Arbousset indicano un unico picco di intensità intorno alle 19:50 (cfr. Figura 19). Proponiamo di interpretare questi diversi elementi come il fatto che la rottura del ponte di Veil sia coincisa con un'ondata sedimentaria che si è propagata almeno fino al ponte dell'Arbousset situato a 6 km a valle, e che questa ondata sedimentaria abbia costituito l'essenziale degli apporti solidi durante la piena in questo settore. Questa interpretazione è coerente con l'attenuazione, a livello di Breil, dell'onda sedimentaria proveniente da monte del bacino idrografico suggerita dallo studio delle evoluzioni morfologiche dell'aveo (Liébault et al., 2024) e le evoluzioni morfologiche di intensità moderata osservate nel settore italiano all'uscita delle gole a Trucco (IM, Italia).

Inoltre, si può ipotizzare che la distruzione del ponte di Veil a monte di Breil intorno alle 20 sia la conseguenza a valle dei disordini legati a un forte trasporto sedimentario (ondate sedimentarie e distruzione del ponte delle 14 arcate) menzionati nel settore di Tenda tra le 18 e le 19 (ONF-RTM et al., 2023a, p. 40): il tempo di propagazione dei disordini tra Tenda e Breil sarebbe coerente.

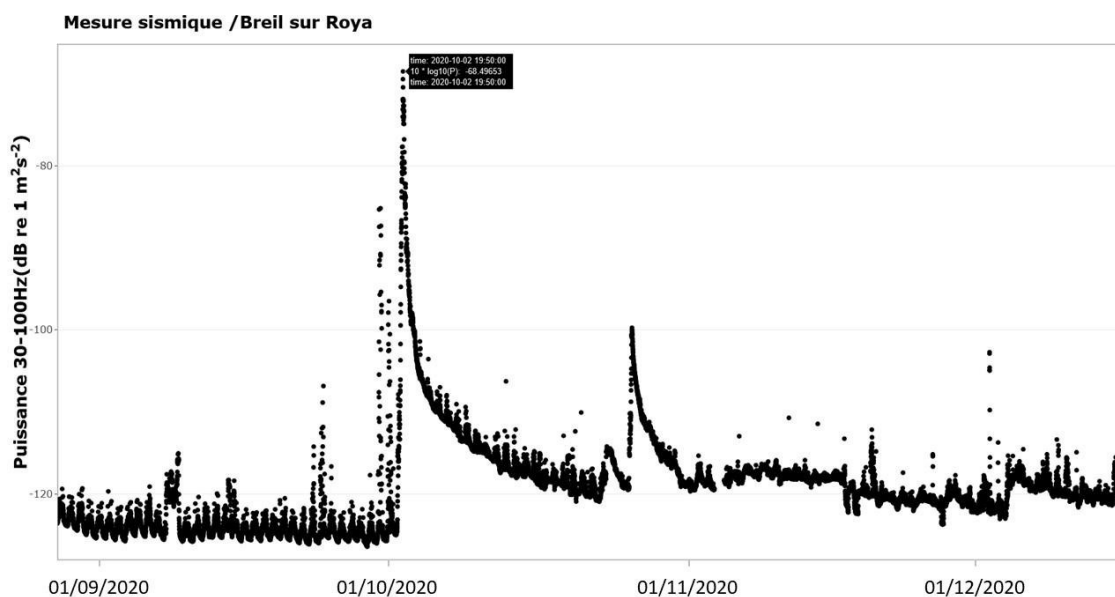


Figura 19. Risultati del monitoraggio tramite sismica passiva nel settore dell'Arbousset tra il 28/08/2020 e il 16/12/2020. Si segnala in particolare l'episodio di trasporto solido associato alla tempesta Alex del 02/10/2020, il cui unico picco misurato si trova intorno alle 19:50 a valle di Breil.

Sull'asse delle ordinate sono presentate le variazioni di ampiezza della banda spettrale 30-100 Hz sulla componente z, che corrisponde a una variazione dell'intensità (cioè della potenza) delle vibrazioni sul terreno su questa componente associata al trasporto sedimentario nel corso d'acqua.

Per andare oltre l'analisi dell'evento del 02/10/2020, possiamo notare due punti di interesse riguardanti il segnale sismico. Un primo punto d'interesse è il carattere ciclico molto regolare del segnale osservato sul livello di base, prima e dopo Alex (cfr. Figura 19 e Figura 20). Proponiamo come prima interpretazione che questo corrisponda alle manovre di scarico delle opere idrauliche nel settore, in quanto il tracciamento sedimentario tramite RFID passiva aveva dimostrato una mobilità del carico grossolano anche durante le manovre di scarico (cfr. sezione 3). Tuttavia, questa ipotesi dovrebbe essere approfondita grazie allo studio dei deflussi a Breil; in particolare, il fatto che una tale ciclicità sia osservata anche durante la fase di deflusso è intrigante (cfr. Figura 19).

Un secondo punto d'interesse riguarda le variazioni brusche del livello di base osservate dopo Alex, che tendono poi ad attenuarsi in poche settimane/mese (cfr. Figura 18, Figura 19, Figura 20 e Figura 21a). Proponiamo di interpretare questo fenomeno tenendo conto del fatto che, dopo l'episodio del 02/10/2020, i materiali costituenti l'alveo del Roia sono stati completamente rimobilizzati: la struttura dell'alveo pre-esistente è stata distrutta (rottura del corazzamento o *armouring*). I sedimenti presentano quindi una mobilità aumentata post-Alex, in quanto non sono più incastrati l'uno nell'altro: questo è confermato dai risultati del tracciamento sedimentario (cfr. sezione 3.2 e in particolare Tabella 9). Così, attraverso un fenomeno di dilatazione/compattazione verticale e riordino delle particelle lungo l'asse longitudinale, già documentato nei corsi d'acqua (Marquis e Roy, 2012), possiamo supporre che a seguito di ogni episodio di piena, un certo spessore del materasso alluvionale venga rimobilizzato, e ci vorranno diverse settimane/mesi per stabilizzarlo. Al momento attuale, questa pista esplicativa ci sembra l'unica in grado di spiegare la durata e la frequenza di questi "shifts" del livello di base. Questo fenomeno è particolarmente visibile a seguito della tempesta Aline di ottobre 2023 (cfr. Figura 20 e Figura 21a).

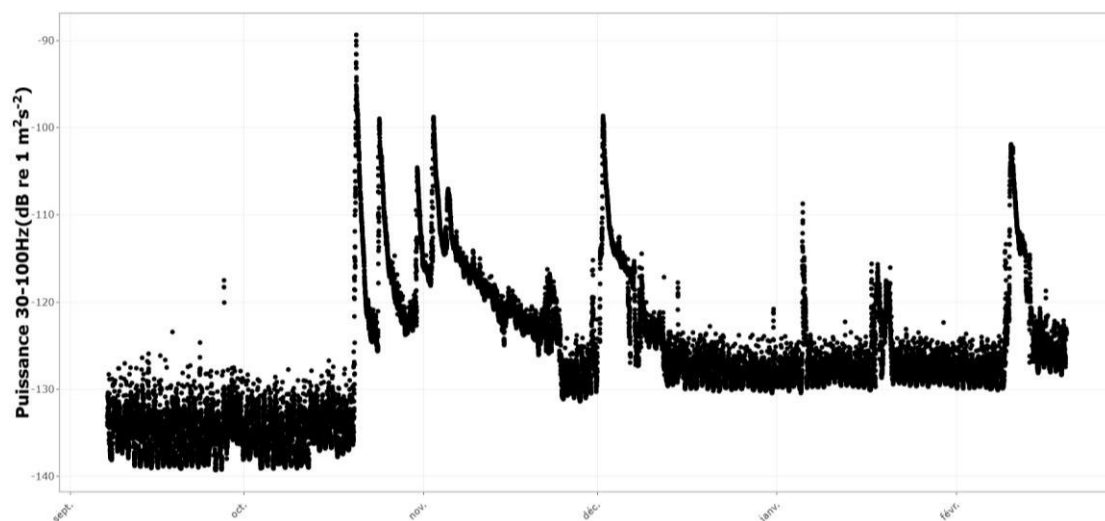
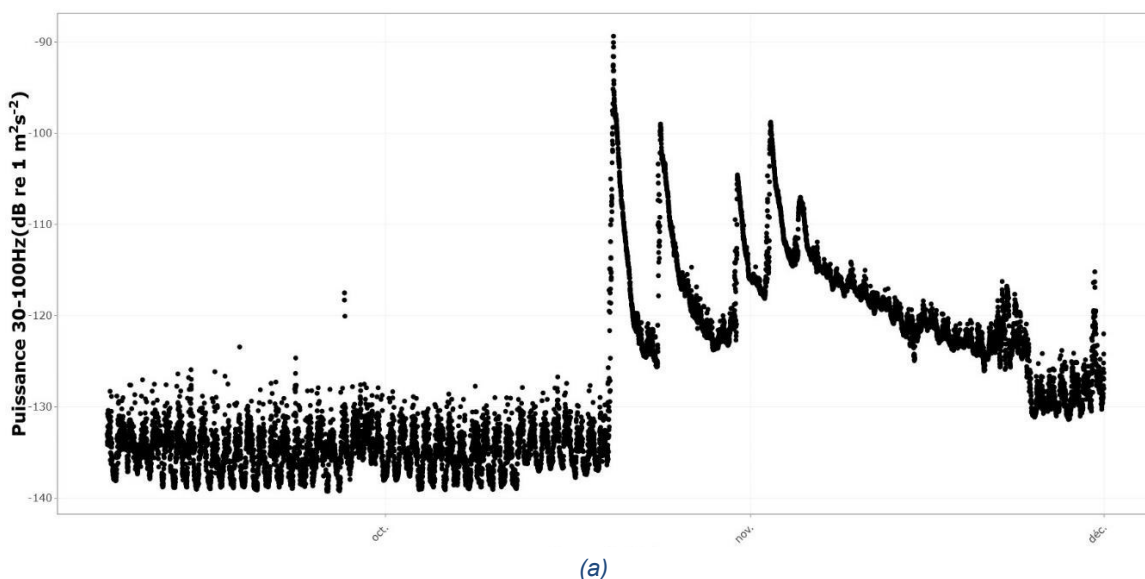


Figura 20. Risultati del monitoraggio tramite sismica passiva nel settore dell'Arbousset tra il 07/09/2023 e il 20/02/2024. Si segnala in particolare l'episodio di trasporto solido associato alla "tempesta Aline" alla fine di ottobre 2023.

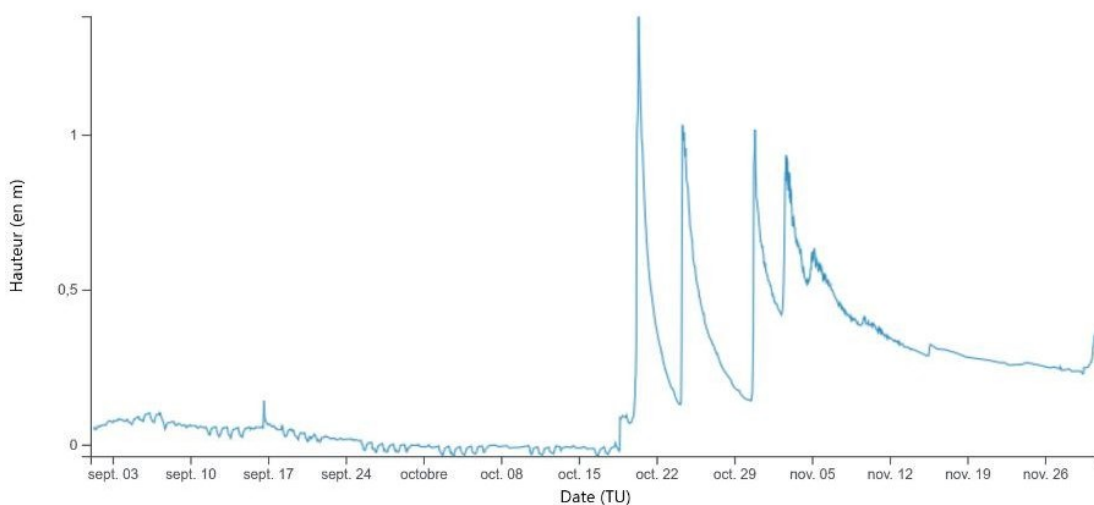
Sull'asse delle ordinate sono presentate le variazioni di ampiezza della banda spettrale 30-100 Hz sulla componente z, che corrisponde a una variazione dell'intensità (cioè della potenza) delle vibrazioni sul terreno su questa componente associata al trasporto sedimentario nel corso d'acqua.



(a)

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)



(b)

Source : HydroPortail

Figura 21. (a) Risultati del monitoraggio tramite sismica passiva nel settore dell'Arbousset tra il 07/09/2023 e il 01/12/2023. (b) Altezza dell'acqua istantanea alla stazione di S. Dalmazzo-di-Tenda tra il 01/09/2023 e il 30/11/2023. Si segnala in particolare l'episodio associato alla "tempesta Aline" alla fine di ottobre 2023 e la similarità dei picchi tra il segnale sismico (cfr. Figura 20) e il segnale idrologico, sia in termini di frequenza che di intensità relativa, nonostante la distanza che separa i due siti di misura (cfr. Figura 11).

Per il proseguimento, la principale pista esplorata per sfruttare queste cronache sismiche è l'accoppiamento con dati idrologici, misurati o modellati, al fine di investigare il legame tra la cinetica dei flussi liquidi e dei flussi solidi. Nella continuità del lavoro preliminare realizzato a partire da stazioni sismiche maralpine per interpretare i segnali legati all'episodio Alex (Chmiel et al., 2022) o a partire dalle modellazioni idrologiche in relazione al segnale sismico del geofono localizzato all'Arbousset (Chapuis et al., 2022b), stiamo attualmente incrociando gli approcci in geologia, idrologia e geomorfologia fluviale per interpretare i segnali delle stazioni sismiche "classiche", delle stazioni idrologiche e dei due geofoni "dedicati al trasporto solido" sui bacini imbriferi maralpini (collaborazione F. Lombard, ESPACE-AMU; M. Chmiel, Géoazur e P. Brigode, Géosciences Rennes).

I primi risultati suggeriscono una correlazione molto forte tra il segnale sismico all'Arbousset e l'idrogramma (F. Lombard, com. pers., secondo i lavori di E. Berger, 2024 – UniCA/ESPACE), eccetto per l'episodio di ottobre 2023 (tempesta Aline). Questi elementi sarebbero confermati dalle misure alle stazioni sismiche "classiche" circostanti (M. Chmiel, com. pers., secondo i lavori di M.-O. Dib, 2024 – UniCA/Géoazur).

## 4 Discussione e prospettive

### 4.1 Sul monitoraggio dei flussi sedimentari nel Roia tramite tracciamento RFID

#### 4.1.1 Distanze di trasporto nel Roia: messa in prospettiva dei risultati

Alla luce dei tassi di ritorno di cui disponiamo, anche aggregando i risultati ottenuti con RFID passivo e attivo, non è ragionevole condurre uno studio statistico come sperato inizialmente e realizzato, ad esempio, da Arnaud et al. (2023) sull'Ain, nonostante uno sforzo di strumentazione (numero di traccianti distribuiti) che si colloca piuttosto nella fascia alta degli studi RFID realizzati fino ad ora (cfr. Liébault et al., 2023: Data S1 supplementary material). È anche difficile lavorare su distanze di trasporto medie come, ad esempio, in Liébault et al., 2012 o Vázquez-Tarrio et al., 2018).

Tuttavia, possiamo trarre insegnamenti dal tracciamento attivo, in particolare delineando ordini di grandezza delle distanze annuali percorse dopo questi 5 anni di monitoraggio. Da un lato, siamo abbastanza regolarmente al di là di distanze massime annuali ampiamente superiori al chilometro, il che ci colloca nella fascia alta della meta-analisi proposta da Liébault et al., 2023 (cfr. Figura 22), e ciò anche senza includere i risultati legati all'episodio di periodo di ritorno di 1000 anni del 02/10/2020.

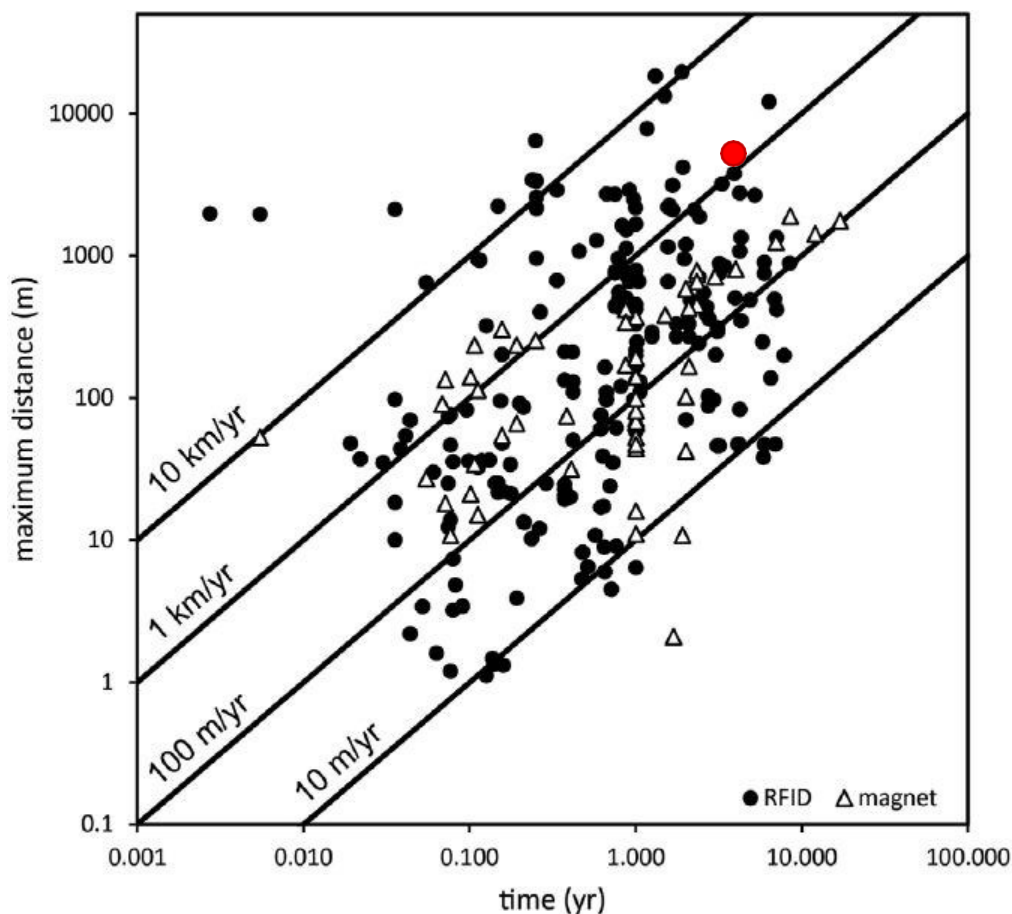


Figura 22. Relazione tra distanza massima di trasporto e durata del monitoraggio per studi di tracciamento sedimentario tramite RFID (cerchi,  $n=207$ ) o traccianti magnetici (triangoli,  $n=55$ ). Il nostro monitoraggio si colloca nella gamma indicata dal cerchio rosso, il che conferma che il Roia è un sistema molto attivo, anche senza includere l'evento estremo del 02/10/2020.

Modificato da: Liébault et al., 2023

Allo stesso modo, l'analisi condotta sulle distanze medie di trasporto (valori da prendere con cautela vista la bassa popolazione di traccianti utilizzata) e sulla potenza specifica colloca decisamente il Roia nella gamma dei corsi d'acqua a trasporto solido intenso (cfr. Figura 23).

La parte del nostro monitoraggio (rettangolo rosso) situata a sinistra della curva di Hassan et al. (1992) corrisponde al monitoraggio post-Alex (potenze specifiche moderate date le portate riscontrate da allora). Al contrario, la parte del nostro rettangolo situata a destra della curva corrisponde al monitoraggio che integra l'evento estremo del 02/10/2020. Ciò spiega perché ci troviamo in una gamma alta di potenza specifica, che non presenta ancora un punto di misura nella meta-analisi realizzata a livello internazionale da Liébault et al. (2023): l'esempio del Roia testimonia le difficoltà tecniche legate al monitoraggio di sistemi così energetici. L'incertezza riguardante la misurazione delle portate durante questo evento di periodo di ritorno di 1000 anni spiega perché non posizioniamo un punto, ma piuttosto una gamma di valori sul grafico.

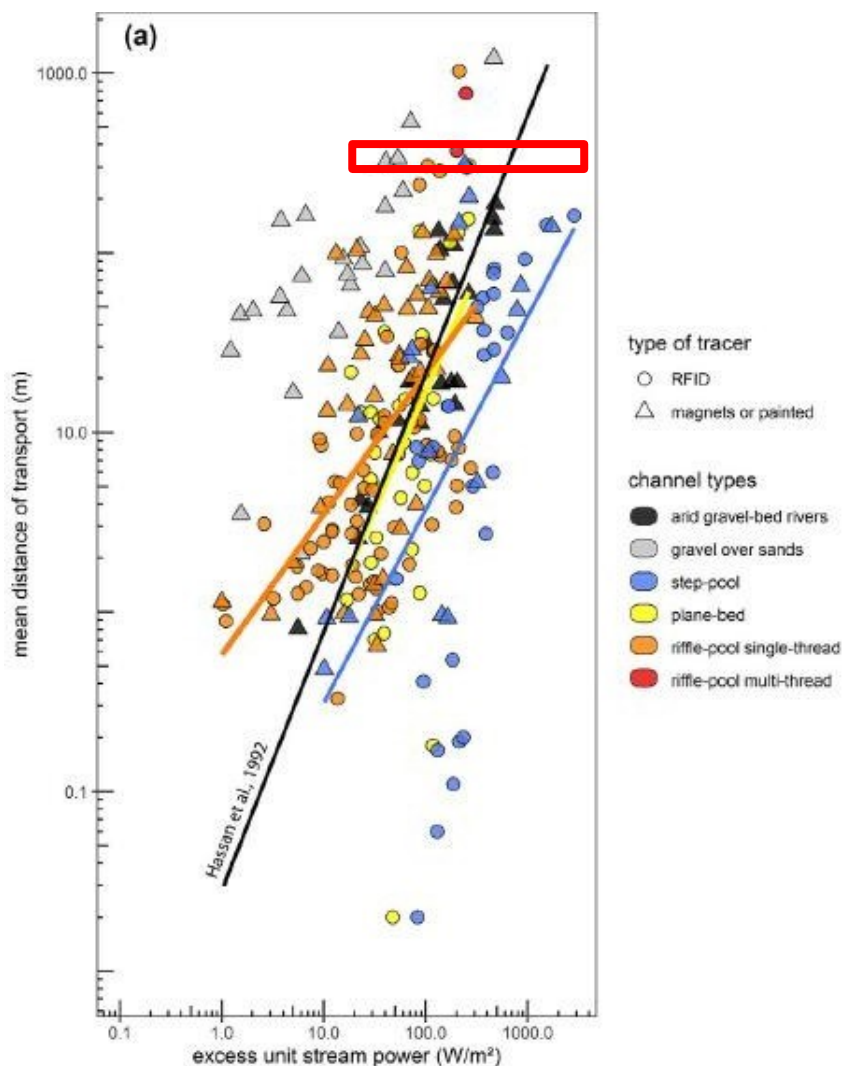


Figura 23. Relazione tra distanza media di trasporto e potenza specifica per studi di tracciamento sedimentario.

I risultati della Tabella 9 e Tabella 10 indicano distanze di trasporto medie dell'ordine da 300 a 400 m/anno su 4 anni sia nel settore a monte che in quello a valle (morfologia riffle-pool single-thread a step-pool, cf. Rinaldi et al., 2010), corrispondenti al rettangolo rosso nel grafico. Il Roia si colloca quindi nettamente nella gamma dei corsi d'acqua a trasporto solido intenso, e l'evento estremo seguito spiega il motivo per cui ci troviamo in una gamma di potenza specifica alta, che non era ancora stata monitorata tramite tracciamento.

Modificato da: Liébault et al., 2023

#### 4.1.2 Basso tasso di recupero del tracciamento RFID: ipotesi e prospettive di ricerca

Il basso tasso di recupero dei traccianti RFID (attivi o passivi) ci spinge a lavorare per ipotesi per il proseguimento dello studio (cfr. sezione 3.2). L'ipotesi privilegiata di esportazione della maggior parte dei traccianti in Mediterraneo potrà essere confermata o smentita grazie alle due seguenti piste:

- Durante i monitoraggi successivi, il fatto di ritrovare nell'alveo altri traccianti installati prima dell'episodio Alex potrebbe eventualmente portarci a rivedere la nostra interpretazione. Al momento della redazione di questo manoscritto, ciò non è ancora avvenuto.
- Il progetto SEALEX-CSR (finanziato dall'Università Côte d'Azur nel 2025) in

collaborazione con S. Migeon (Géoazur) mira proprio ad esplorare la piattaforma continentale all'uscita del Roia. Speriamo che ciò apporterà elementi complementari significativi per l'interpretazione di questi risultati, sia in termini di granulometria dei materiali esportati in Mediterraneo che per quanto riguarda le forme di deposito associate o ancora una conferma netta con la localizzazione di un tracciante in mare. I risultati di questa campagna saranno analizzati nell'ambito del progetto StS-SEALEX (2024-2027).

Nonostante queste riserve riguardanti l'interpretazione dei risultati, va comunque notato che questo monitoraggio costituisce un insieme di dati unico al mondo (a nostra conoscenza, cfr. Liébault et al., 2023) poiché consente di avere osservazioni sulla mobilità delle particelle sedimentarie prima/dopo un'alluvione di periodo di ritorno di 1000 anni. Questi risultati sono inoltre complementari all'analisi delle modifiche morfologiche osservate al termine dell'episodio, in particolare l'esplosione dell'alveo attivo che ha visto la sua larghezza raddoppiata: il dettaglio delle evoluzioni morfologiche osservate e la loro interpretazione in termini di processi sono presentati in Liébault et al. (2024): sia MacVicar e Papangelakis (2022), sia Liébault et al. (2023), evidenziano l'importanza di incrociare il monitoraggio delle evoluzioni morfologiche e l'analisi degli spostamenti dei traccianti RFID.

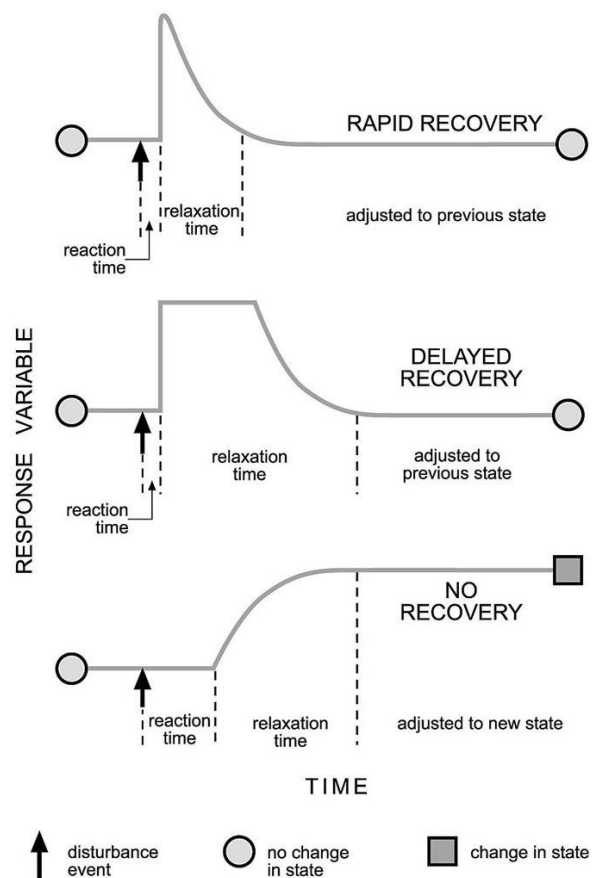
Un'altra ipotesi di lavoro da approfondire durante i prossimi monitoraggi consiste nel valutare in che misura i traccianti “non ritrovati” abbiano una forte probabilità di essere sepolti troppo in profondità per essere rilevati. Infatti, prima della tempesta Alex, l'ipotesi di lavoro era che il substrato fosse affiorante in molti settori, quindi la probabilità di sepoltura a profondità tali da impedire il rilevamento (> 2 m) fosse molto bassa; questa ipotesi era sostenuta da evoluzioni morfologiche la cui ampiezza verticale era compatibile (dell'ordine del metro). Pertanto, per la tempesta Alex, l'ipotesi più probabile per spiegare i traccianti non ritrovati era un'esportazione in mare Mediterraneo (anziché un fenomeno di rottura o di sepoltura): è infatti un'ipotesi di lavoro forte nel progetto StS-SEALEX menzionato sopra.

A nostra conoscenza, non ci sono elementi di conoscenza riguardanti la profondità del riempimento alluvionale nel talweg del Roia nella parte francese. L'obiettivo di questo approfondimento sarebbe di valutare la proporzione di substrato affiorante a valle dei settori in cui i traccianti RFID sono stati distribuiti, e successivamente qualificare la probabilità che questi traccianti siano stati incorporati nel materiale alluvionale a una profondità che ne impedisce il rilevamento.

Lo studio geologico dettagliato di questo tratto potrebbe forse rispondere a questa domanda e dovrà essere condotto su tutto il tratto (Francia e Italia) per fornire una risposta spazialmente localizzata. A questo scopo, le conoscenze acquisite nella bassa valle nel contesto del progetto Concert-Eaux saranno interessanti da sfruttare (in particolare: Lanini, 2020).

A questa analisi geologica, sarà necessario accoppiare un'analisi geomorfologica. Infatti, l'alveo del Roia ha subito una metamorfosi fluviale (Chapuis et al., 2022a; Liébault et al., 2024), con la conseguenza della rottura della struttura dell'alveo e della scomparsa della morfologia in *step-pool*. Questo è stato accompagnato da una forte produzione sedimentaria derivante dal rimodellamento degli stock di fondo valle e quindi dalla ricostruzione di un materasso alluvionale in numerosi settori precedentemente corazzati (cfr. osservazioni sul campo). Gli strati di trasporto (nel senso della geomorfologia fluviale: *bedload sheet*) probabilmente sono state più presenti (e attive) dopo l'episodio del 02/10/2020, il che è confermato dalle osservazioni visive e dalle misurazioni sismiche (cfr. sezione 3.3): questo fenomeno di destabilizzazione della morfologia in *step-pool*, accompagnato da una forte produzione sedimentaria a seguito di un'alluvione estrema, è inoltre ben spiegato in Recking et al. (2013). Gli autori suggeriscono poi la possibilità che questa forte produzione sedimentaria si mantenga per un lungo periodo, prima che l'alveo si stabilizzi nuovamente, ma senza specificare la dimensione temporale associata a questa resilienza del sistema (durata del tempo di rilassamento: cfr. Figura 24). In un contesto di controllo parziale da parte del substrato, Fryirs e Brierley (2013, fig. 11.11) suggeriscono ad esempio aggiustamenti su

temporalità dell'ordine di  $10^3$ - $10^4$  anni, ma più generalmente la nozione di rilassamento del sistema fluviale/torrentizio, che qui è chiave, è difficilmente collocabile nel tempo.



**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.

*Figura 24. Le diverse risposte possibili di un sistema fluviale a seguito di una perturbazione, in funzione della sua capacità di adattamento.*

Fonti : Fryirs e Brierley, 2013

Nell'alveo del Roia, le osservazioni recenti indicano una riorganizzazione dei materiali dell'alveo e la riformazione di un canale unico, più fisso in pianta, in numerosi settori, il che potrebbe suggerire un ritorno ad una stabilità dell'alveo più rapida. Questi aggiustamenti morfologici sono forse un effetto delle azioni antropiche realizzate nel contesto dei lavori post-alluvione: è difficile comprendere se questo processo – se si verifica effettivamente – sia spontaneo o di origine antropica. Questo possibile aggiustamento del tracciato in pianta, da un alveo transizionale post-Alex verso un alveo a canale unico a *step-pool* molto più "stabile" dal punto di vista morfodinamico e simile alla morfologia osservata prima di Alex, dovrà essere investigato: ciò sottolinea l'importanza di continuare il monitoraggio di questo idrosistema dopo un'alluvione di periodo di ritorno di 1000 anni, poiché il Roia costituisce un "laboratorio a grandezza naturale" per studiare la resilienza morfologica di un corso d'acqua dopo un evento estremo (cfr. sezione 4.3). Da notare che questa eventuale stabilizzazione dell'alveo non sembra per il momento confermata dai risultati della sismica (cfr. sezione 3.3).

### 4.1.3 Prospettive per la continuazione del monitoraggio RFID

Prevediamo di proseguire il monitoraggio attivo RFID fino a quando i trasponder non emetteranno più segnali: il costruttore annuncia una durata di vita di circa 5 anni in base alla frequenza di emissione. Tuttavia, secondo questa durata di vita annunciata, i traccianti inseriti nel 2019 dovrebbero essere vicini alla fine della loro vita, cosa che non è ancora avvenuta poiché ne troviamo ancora durante la campagna del 2024. Ciò potrebbe rivelarsi limitante per una prospezione in Mediterraneo durante la campagna SEALEX-CSR (2025). Tuttavia, i traccianti dispiegati nel 2021 dovrebbero ancora funzionare nel 2026 o addirittura nel 2027, il che coinciderà pressappoco con la fine del progetto StS-SEALEX (2024-2027).

Alla luce dello sforzo di prospezione richiesto e delle poche risorse umane di cui disponiamo attualmente all'interno di UniCA/ESPACE, il proseguimento di questa operazione di tracciamento sedimentario, anche tramite RFID attiva, potrebbe non essere rinnovata/continuata oltre questa data, a meno che nuove e significative esigenze di gestione rendano particolarmente pertinente questo nuovo monitoraggio.

Il tracciamento sedimentario tramite RFID passiva presenta importanti limitazioni tecniche nel contesto torrentizio, roccioso e lateralmente vincolato (gole) del Roia. Questi elementi impediscono decisamente la continuazione di un monitoraggio annuale come era stato previsto/realizzato fino ad ora. Tuttavia, lo sforzo iniziale di investimento potrebbe continuare a dare frutti, poiché la durata di vita annunciata dei trasponder passivi è di 50 anni: nonostante il primo tentativo nel settembre 2019 si sia rivelato rapidamente infruttuoso, l'installazione di un'antenna fissa potrebbe ancora essere attuale per contribuire a "chiudere il sistema" e quindi contribuire alla valutazione dei flussi sedimentari a lungo termine, su scala di bacino. Ricordiamo che l'antenna fissa installata il 05/09/2019 è stata operativa (inclusa la teletrasmissione dei dati) tra il 29/09/2019 e il 20/10/2019, ma è stata strappata durante la prima "piccola alluvione" dell'autunno ( $Q_{max}$  a Breil = 140 m<sup>3</sup>/s il 15/10/2019) (Chapuis et al., 2019a). Questa esperienza sfortunata non è l'unica in contesto torrentizio; nonostante ciò, sarebbe interessante riuscire a realizzare un'installazione del genere, ad esempio inserendo l'antenna nell'infrastruttura di una soglia esistente, come era stato accennato durante discussioni informali con la cellula R&D (Ricerca e Sviluppo) di EDF.

## 4.2 Modello concettuale dei flussi idro-sedimentari a livello di bacino

A livello del bacino del Roia, possiamo illustrare come l'elaborazione di un modello concettuale dei flussi idro-sedimentari possa essere un processo continuo, che si nutre delle nuove conoscenze acquisite sul perimetro di studio (Crozat et al., s.d.; Calvet, 2006).

Un primo modello dei flussi idro-sedimentari è stato inizialmente elaborato in regime ordinario (Chapuis et al., 2022a) (cf. Figura 25). Questo modello ha in particolare servito da supporto per elaborare una riflessione sulle priorità di gestione dei flussi sedimentari nel Roia italiano (Regione Liguria, 2021).

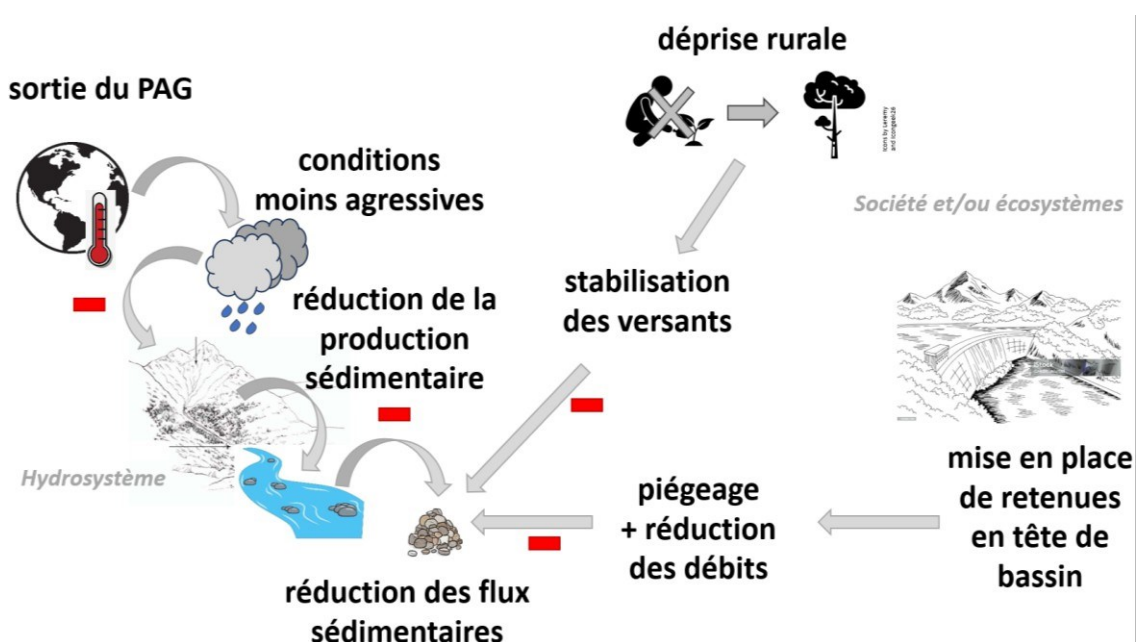


Figura 25. Modellazione concettuale dell'influenza del cambiamento climatico sui flussi idro-sedimentari nel Roia a seguito della fine del Piccolo Periodo Glaciale (PPG).

Effetto di accentuazione (+) vs. effetto di attenuazione (-).

Questa modellazione si riassume così: la fine del PPG provoca una riduzione della produzione sedimentaria (-), così come l'abbandono rurale induce una ricolonizzazione dei versanti e quindi la loro stabilizzazione, portando a una diminuzione della produzione sedimentaria dai versanti (-). L'installazione di dighe di alta quota a monte del bacino corrisponde a una cattura dei sedimenti e a una riduzione delle portate nell'alveo, quindi anche questo corrisponde a una diminuzione del trasporto solido (-). Tutti questi effetti registrati tendono nella stessa direzione: la riduzione del trasporto solido, da cui un sistema deficitario, in de-stockaggio, e l'osservazione di un'incisione su ampie porzioni del lineare e di un armoring dell'aveo.

A seguito di un evento di piena pluricentenaria nel Roia (tempesta Alex del 02 ottobre 2020: Carrega e Michelot, 2021; CEREMA, 2021, Payrastre et al., 2022), questo modello è stato oggetto di un adeguamento per integrare gli insegnamenti forniti dall'insorgere di un episodio così eccezionale (Chapuis et al., 2022b; Chapuis e Adnès, 2023; Liébault et al., 2024; Piton et al., 2024). A livello internazionale, nessun evento di occorrenza pluricentenaria era stato fino ad ora seguito nel contesto di un tracciamento sedimentario. Pertanto, la nuova versione del modello concettuale dei flussi idro-sedimentari nel Roia si inserisce in un quadro temporale più ampio, completando piuttosto che mettere in discussione la prima versione (cf. Figura 26).

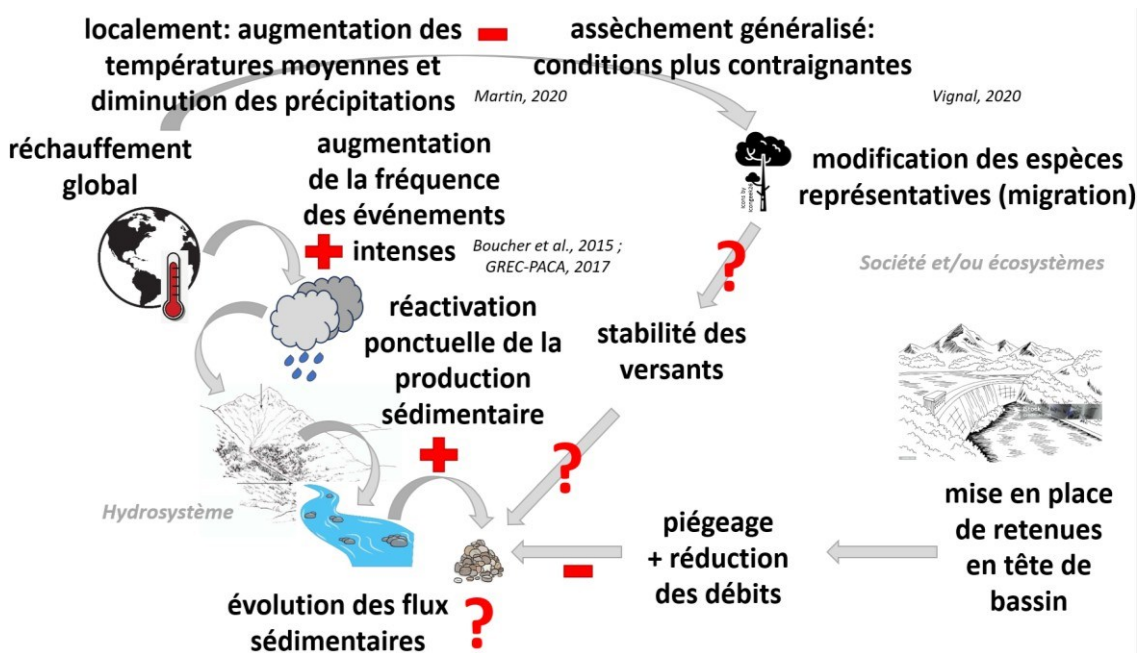


Figura 26. Riaggiustamento del modello concettuale dei flussi idro-sedimentari in Roia a seguito delle precipitazioni di periodo di ritorno di 1000 anni verificatesi il 02/10/2020. Effetto di accentuazione (+) vs. effetto di attenuazione (-) vs. effetto indefinito (?).

## 4.3 Riguardo alla gestione dei flussi sedimentari nel Roia

### 4.3.1 Tempo di rilassamento, resilienza e tendenza del sistema

Come accennato alla fine della sezione 3.2, la questione della resilienza del sistema post-piena costituisce una questione di ricerca a sé stante: la comunità ha pochi esempi su cui basarsi per valutare se un sistema in transizione si stabilirà o se la metamorfosi fluviale osservata rappresenta un nuovo stato di equilibrio del sistema (Surian et al., 2016; Scorpio e Comiti, 2024; Liébault et al., 2024). A questa nozione di resilienza post-perturbazione (Fryirs e Brierley, 2013: cf. Figura 24) si aggiunge quindi la questione, già sottesa all'inizio dello studio del trasporto sedimentario nel Roia, della tendenza del sistema (cf. Dufour e Piégay, 2009: cf. Figura 27) e del "calibro temporale" di questa resilienza (se ha luogo). Ragioniamo qui in modo simile a seconda che la perturbazione sia di origine "naturale" (ad esempio un evento estremo nel caso del Roia) o di origine umana (una restaurazione).

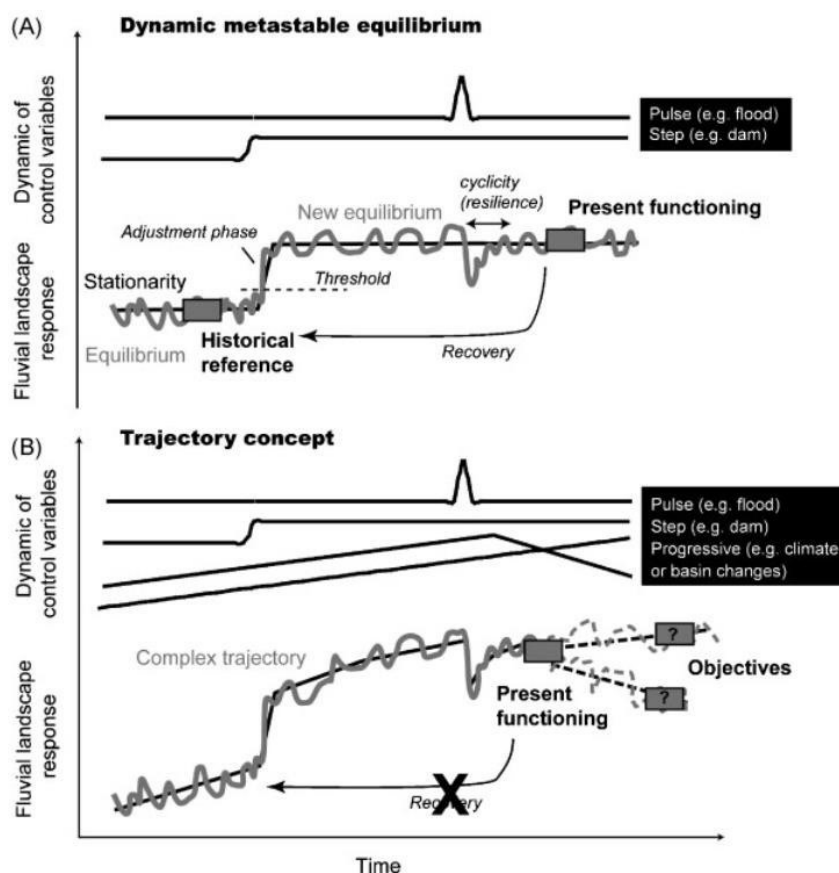


Figura 27. Tendenze di un idrosistema nel caso di un intervento di ripristino e nozione di stato di riferimento che deve essere definito a partire da obiettivi piuttosto che da un riferimento storico.

I risultati dell'evoluzione del paesaggio fluviale derivano dalla combinazione di numerose variabili di controllo; pertanto, segue una traiettoria complessa che giustifica il passaggio da una strategia basata su riferimenti a una strategia basata su obiettivi nei piani di ripristino.

Fonti : Dufour et Piégay, 2009

Lo studio delle fotografie storiche del Roia a seguito delle piene storiche registrate nei bacini idrografici del Roia e della Vésubie (ONF-RTM et al., 2023a, ONF-RTM et al., 2023b) suggerisce che questi sistemi possiedono una forte capacità di adattamento (di resilienza). Ci si può quindi aspettare che il sistema ritorni a uno stato vicino a quello iniziale (recupero rapido o ritardato), il che va nella direzione delle osservazioni sul campo che suggeriscono una stabilizzazione dell'alveo in pianta (cfr. sezione 3.2). Tuttavia, i dati sismici (cfr. sezione 3.3) evidenziano una forte mobilità sedimentaria dopo ogni piena, anche se non intensa: il mantenimento di una mobilità sedimentaria è un prerequisito indispensabile per il mantenimento della mobilità delle forme fluviali, il che potrebbe anche suggerire che siamo lontani da un ritorno ad uno stato ante-piena.

Solo il proseguimento del monitoraggio delle evoluzioni morfologiche del Roia potrà quindi fornirci elementi riguardo alla sua resilienza post-piena (e in particolare se esista un rilassamento, e se sì, per quanto tempo dura) e alla sua tendenza dopo un evento di tale intensità, in una prospettiva "a lungo termine". A medio termine, un secondo asse di studio della resilienza del sistema riguarda la capacità del corso d'acqua di riprendere un funzionamento post-lavori.

Infatti, dal 02/10/2020, l'alveo ha subito pesanti interventi che continuano ancora oggi, sebbene su tratti molto meno importanti: il sistema potrebbe presto/infine poter essere

considerato libero di adattarsi dal punto di vista morfologico. È importante notare, tuttavia, che a parte l'episodio della “tempesta Aline” di ottobre 2023, le forzature idrologiche sono state molto ridotte dal 02/10/2020: questo sottolinea quanto sia indispensabile integrare l'idrologia per analizzare la resilienza degli idrosistemi sotto influenza alpina o mediterranea (esempio: il Mareta, cfr. Devreux et al., 2022b e Devreux, 2003).

#### 4.3.2 Tematiche della ricostruzione

Dal punto di vista ecologico (poiché sembra essenziale non dissociare gli approcci geomorfologici ed ecologici), i lavori in corso d'acqua effettuati dopo l'episodio Alex hanno portato ad un'alta torbidità nell'alveo, mentre prima di Alex il Roia era caratterizzato da deflussi molto chiari, tranne in caso di piena. Questa torbidità “cronica” per oltre 2 anni ha necessariamente avuto un impatto sulla fauna (Kemp et al., 2011). L'impatto della piena sulle popolazioni ittiche nel Roia è già stato oggetto di un primo studio (Blanchet, 2022) e indica che la dinamica di ripopolamento osservata ha origine nella capacità delle trote di rifugiarsi nelle zone di rifugio costituite dai tributari (e in particolare dai tributari della riva sinistra, poco/meno impattati durante l'episodio Alex). Questo suppone una mobilità “inter-habitat” su scala più ampia rispetto a quanto osservato per i macroinvertebrati (Devreux, 2003).

La torbidità menzionata è legata ai sedimenti fini rimobilizzati dalle macchine da cantiere. Ma più in generale, le osservazioni sul campo suggeriscono che l'episodio Alex ha ricaricato il sistema con sedimenti fini e sabbie, come è stato osservato in altri sistemi post-piena (esempi: Turowski et al., 2009; Yager et al., 2012; Masteller et al., 2019, in Brenna e Surian, 2023). La parte di questi sedimenti fini rispetto al carico grossolano nel flusso sedimentario totale potrebbe non essere più trascurabile, contrariamente all'ipotesi di lavoro che ha guidato il nostro studio all'inizio. Tuttavia, la valutazione dei flussi di materiali in sospensione, e ancor di più dei flussi di sabbie, rappresenta una sfida tecnica a sé stante (Deng et al., 2024). Tuttavia, date le problematiche di gestione a valle riguardanti l'approvvigionamento di acqua potabile dalla falda del Roia (cfr. Genevier e Ibba, 2020: intasamento dei pozzi di pompaggio dalla piena del 2020), un tale sforzo di strumentazione potrebbe diventare necessario.

Dal punto di vista della gestione del rischio di inondazione, senza proporre qui un'analisi esaustiva della situazione nel Roia, riassumiamo di seguito i punti essenziali al momento della redazione di questo rapporto. In linea con l'approccio della GEMAPI (Gestione degli Ambienti Acquatici e Prevenzione delle Inondazioni: quadro di gestione francese dei corsi d'acqua) che prevede di conciliare uno spazio di buon funzionamento e uno spazio di libertà del corso d'acqua, le raccomandazioni dello Stato in materia di ricostruzione (ONF-RTM et al., 2023a: cfr. parte 7.2 “Principi di pianificazione adattati al contesto torrentizio”) prevedevano, “soprattutto”, di garantire sezioni di piena sufficienti su tutto il tratto francese del Roia: da un lato per garantire i deflussi liquidi in piena, ma anche per accomodare le evoluzioni morfologiche future. Accettare di mantenere uno spazio di divagazione per il corso d'acqua, in queste valli dove la pressione fondiaria è forte, richiede necessariamente una fase di concertazione con il territorio, particolarmente critica nelle traversate urbane. Dopo 3 anni di ricostruzione in Vésubie e Roia, un bilancio intermedio potrebbe evidenziare che il rispetto delle raccomandazioni tecniche per la ricostruzione in contesto torrentizio non è affatto scontato per molti attori del territorio.

La riflessione già avviata prima di Alex riguardante un piano di gestione dei sedimenti a livello di bacino (cfr. progetti europei Concert-Eaux e Concert-Eaux OPERA) assume ancora più rilevanza post-Alex. Se le problematiche sulla parte italiana hanno spinto i gestori a proporre rapidamente un quadro per questo piano di gestione dei sedimenti (Regione Liguria, 2021), un approccio sistemico a livello di bacino richiede un po' più di tempo per essere costruito e, soprattutto, per sperare in un'armonizzazione transfrontaliera. Fin da dicembre 2020 (Chapuis, 2020), abbiamo sottolineato l'importanza di sviluppare un tale piano di gestione dei sedimenti a livello di bacino; tuttavia, un tale progetto deve essere portato avanti dalle autorità “GEMAPIane” o equivalenti: i ricercatori possono solo sostenere un tale approccio, per fornire elementi di conoscenza utili al territorio.

Questo è uno dei principali obiettivi della nostra ricerca nel Roia, che era già stata avviata nel 2016 con l'idea di caratterizzare e quantificare i flussi sedimentari nel Roia. Lo sviluppo di un modello concettuale del funzionamento idrosedimentario a livello di bacino, abbozzato già nel 2020 (Chapuis et al., 2022a), ha poi potuto beneficiare di una maggiore profondità temporale grazie all'integrazione di un evento di tale intensità (cfr. sezione 4.2). Uno spurgo sedimentario del sistema rimane molto probabilmente lo schema da considerare per il Roia, senza che l'occorrenza di una piena di periodo di ritorno di 1000 anni consenta una ricarica del sistema sufficiente per pensare ad una valorizzazione della frazione grossolana dei sedimenti provenienti da monte.

### 4.3.3 Evoluzione dei flussi sedimentari nel Roia in un contesto di cambiamento climatico

L'episodio Alex del 02/10/2020 aggiunge una complessità ulteriore per valutare il destino dei flussi sedimentari nel Roia in un contesto di cambiamento climatico, poiché il ritmo di resilienza del sistema e la sua traiettoria sono messi in discussione. Non tratteremo qui in quale misura un evento di tale intensità possa rientrare nel cambiamento climatico (cfr. scienza dell'attribuzione); limitiamoci a considerare che eventi estremi di questo tipo diventeranno più intensi e frequenti (cfr. Boucher et al., 2015; GREC-PACA, 2017; Jia et al., 2019).

Proponiamo qui di integrare i risultati delle modellazioni climatiche realizzate specificamente sul bacino del Roia (Martin, 2020) per valutare alcuni aspetti dell'evoluzione dei flussi sedimentari nel Roia.

Qualunque sia il modello climatico utilizzato, si prevede che le temperature su tutto il bacino aumenteranno. Per quanto riguarda le precipitazioni, tuttavia, il segnale è più complesso da interpretare, con evoluzioni delle precipitazioni mensili variabili a seconda del modello. Tuttavia, l'evoluzione delle precipitazioni mensili nel bacino non dice nulla riguardo all'occorrenza di eventi estremi. Pertanto, consideriamo le seguenti due ipotesi di lavoro per l'orizzonte 2100:

- Un aumento delle temperature indipendentemente dal mese considerato.
- Eventi di precipitazioni estreme più frequenti e intensi, cioè precipitazioni meno ben distribuite nel tempo e nello spazio a livello di bacino.

In prima approssimazione, l'aumento delle temperature durante tutto l'anno ha due conseguenze principali:

- Sulla vegetazione, a causa di un'evapotraspirazione più intensa, le condizioni di stress idrico saranno più frequenti, con conseguenze su condizioni di sviluppo della vegetazione più vincolanti. Potrebbe derivarne una copertura vegetale dei suoli meno protettiva e quindi, potenzialmente, una fornitura sedimentaria proveniente dai versanti più significativa; tuttavia, è necessario affinare questo punto con la nozione di migrazione delle specie rappresentative (cfr. Figura 26).
- Il deposito di neve in inverno rischia di essere fortemente influenzato, modificando di conseguenza una larga parte del ciclo dell'acqua nel bacino:
  - Durata ridotta del ricarica degli stock sotterranei, con probabili conseguenze sulle condizioni di approvvigionamento di acqua potabile dalla falda situata nella bassa valle.
  - Rischio di eventi di "pioggia su neve" che provocano piene legate allo scioglimento delle nevi per tutto il periodo invernale, e non solo in primavera. Queste piene "di disgelo" sarebbero quindi più frequenti e più intense, portando a una sollecitazione delle sponde ogni volta e quindi ad un aumento della fornitura sedimentaria proveniente dai terrazzi alluvionali.

Inoltre, in prima approssimazione, precipitazioni meno ben distribuite nel tempo e nello spazio a livello di bacino potrebbero avere due conseguenze:

- Sulla stabilità dei suoli: in caso di precipitazioni intense sotto forma di pioggia, l'erosione potrebbe essere esacerbata. Ciò potrebbe comportare un aumento dei flussi sedimentari (in particolare fini) nella rete idrografica.
- Precipitazioni più intense porterebbero ad un aumento del numero di piene a causa del superamento della capacità di infiltrazione; come nei punti precedenti, questo potrebbe portare a una maggiore erosione e ad una maggiore fornitura sedimentaria dai terrazzi alluvionali.

Tuttavia, queste riattivazioni puntuali della produzione sedimentaria potrebbero essere localizzate nel tempo e nello spazio: è quindi necessaria una spazializzazione di questi elementi, il che è previsto per i prossimi anni.

Più in generale, le conseguenze del cambiamento climatico sul ciclo idrologico nel Roia devono essere approfondite per trarre elementi prospettici riguardanti i flussi sedimentari a livello di bacino.

## 4.4 Prospettive di monitoraggio dei flussi sedimentari nel Roia

In termini di prospettive di monitoraggio, e per sintetizzare gli elementi menzionati nelle sezioni 2.3 e 3, riportiamo di seguito gli elementi chiave che delineano il nostro investimento in termini di strumentazione e monitoraggio sul campo nel Roia oltre l'orizzonte 2027.

Per quanto riguarda il monitoraggio tramite RFID passivo, la durata di vita dei traccianti (50 anni) consente di considerare adattamenti al monitoraggio attuale (cfr. sezione 4.1). In particolare, l'installazione di un'antenna fissa potrebbe evitare l'aspetto dispendioso in termini di tempo delle prospezioni nell'alveo del fiume.

Come menzionato, non è certo che rinnoveremo l'operazione di tracciamento sedimentario tramite RFID attivo oltre il progetto StS-SEALEX (2024-2027). Infatti, nonostante le limitazioni tecniche siano molto inferiori rispetto a quelle per l'RFID passivo, la prospezione nel Roia richiede di muoversi in un terreno difficile e implica operatori qualificati e in ottima forma fisica. In assenza di un nuovo problema di gestione o di una questione di ricerca fondamentale che richieda di basarsi sulla campagna di monitoraggio avviata nel 2019, l'impegno che ha comportato il monitoraggio 2019-2027 ci sembrerà sufficiente per contribuire, a nostro modo, a una migliore comprensione della dinamica del trasporto grossolano in un contesto torrentizio.

Per quanto riguarda la sismica passiva, e come menzionato nella sezione 2.3, abbiamo appena installato un secondo geofono nel bacino del Roia e contiamo di installare rapidamente la teletrasmissione dei dati per i due strumenti (materiale acquisito, in fase di installazione). Pensiamo quindi di concentrare i nostri sforzi di strumentazione a lungo termine nel Roia attorno a questa tematica, soprattutto perché l'acquisizione continua consente di completare il monitoraggio annuale/eventuale derivante dalle operazioni di tracciamento sedimentario tramite RFID attivo e passivo, fornendo una profondità di analisi interessante riguardo alla variabilità interannuale dei flussi idrosedimentari. Infatti, con la recente installazione da parte dello SMIAGE e dell'ARPAL di nuove stazioni di misura idrologica su tutto il bacino, l'analisi incrociata dei dati idrologici e sismici promette molto. Possiamo elencare le seguenti piste, che daranno luogo al rafforzamento delle collaborazioni avviate:

- Cinematica dei trasferimenti idrosedimentari a livello intra-evento nel bacino tramite l'analisi incrociata dei segnali dei due geofoni.
- Cinematica dei flussi idrosedimentari a scala maralpina (confronti inter-bacini tramite l'analisi incrociata delle stazioni sismiche "classiche" di Géoazur, collaborazione Géoazur/Géosciences Rennes).
- Contributo allo sviluppo metrologico tramite la calibrazione di una strumentazione a basso costo (collaborazione OMEAA/EVS).

## Riferimenti bibliografici

- 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>
- 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.
- Bernard, 1925. *Cours de restauration des montagnes*. Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Nancy. In Meunier M., 2023. *Eléments d'hydraulique torrentielle*. Editions Quae (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>
- 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 (0c)*. Rapport technique, EDF C CNRS, 22 p.
- Boucher O., Dufresne J.-L., Vial J., Brun E., Cattiaux J., Chauvin F., Salas y Méliá D., Voldoire 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](https://lameteorologie.fr/issues/2015/88/meteo_2015_88_56)
- 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.
- Brigode P., Vigoureux S., Delestre O., Nicolle P., Payrastre 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>
- Calvet M., 2006. Accidents aléatoires ou crises morphogéniques : l'interprétation risquée des dynamiques fluvio-torrentielles holocènes et historiques en Méditerranée. In P. Allée C 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.
- 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., 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](https://youtu.be/jTr-2_LamPI)
- 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<sup>e</sup> 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., 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. 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>
- Chapuis M., Adnès C., 2023. Pluri-annual bedload monitoring in a Mediterranean mountain stream prior and after a ~200-year flood. *Gravel-Bed Rivers S conference (GBRS)*, janv. 2023, Villarrica, Chile. <https://hal.science/hal-03975995>
- 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<sup>e</sup> 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., Courboulex 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>
- Crozat D., Dresch J., George P., Pinchemel P., Rozenblat C., Volle J.-P., s.d. GÉOGRAPHIE [en ligne]. In *EncyclopFdia Universalis [s.d., en ligne]*. <https://www.universalis-edu.com/encyclopedie/geographie/6-geographie-systemique> [consulté le 15/10/2023].
- 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., 2022b. Hydromorphological analysis on restored Alpine braided rivers. *Geomorphology*, 415, pp. 108404. <https://hal.science/hal-03794714>
- 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>
- 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.
- 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.
- 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>
- 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>
- 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 000e en couleurs. Présentation succincte. *Méditerranée*, deuxième série, tome 28, 1-1977. pp. 45–53. <https://doi.org/10.3406/medit.1977.1709>
- 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>
- 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]
- 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., 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., 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 Vésubie and Roya valleys. *Geomorphology*, 446, pp. 109008. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109008>
- 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>
- Maison Régionale de l'Eau, 2018. La Roya. <https://aquatheque.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.
- 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-xqCO3TE>

- 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>
- Meunier M., 1989. Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle. *La Houille Blanche*, Taylor C Francis, 75, 361-376. <https://doi.org/10.1051/lhb/1989040>
- Meunier M., 2023. *Éléments d'hydraulique torrentielle*. Editions Quae (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>
- 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>
- 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
- Payrastre 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., Sevrez 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>
- 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 C 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>
- 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>
- l'estimation du transport sédimentaire : premiers retours d'expérience. *La Houille Blanche*, 4, 110–116. <https://doi.org/10.1051/lhb:2008047>
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M., 2010. Sistema di Valutazione Morfologica dei corsi d'acqua – Manuale tecnico-operativo per la valutazione ed il monitoraggio dello stato morfologico dei corsi d'acqua – versione 0. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 198 p., ISBN: 978-88-448-0438-1. <https://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00004100/4118-manuale-morfologia.pdf> [online il 09/01/2025]
- Saint-Pé K., Blanchet S., Tissot L., Poulet N., Plasserau, O., Loot G., Veysière 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- Vázquez-Tarrió 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>
- Weiland M., 2024. *Étude 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>

## Elenco delle figure

Figura 1. Il bacino idrografico del Roia nel contesto della Riviera mediterranea .....	6
Figura 2. Topografia del bacino idrografico del Roia ed i principali affluenti.....	8
Figura 3. Cumulata giornaliera delle precipitazioni a Tenda tra il 25/11/2015 e il 30/06/2024 (in mm).....	9
Figura 4. Strumentazione dei bacini idrografici maralpini in termini di misurazioni pluviometriche.....	10
Figura 6. Estratto della mappa geomorfologica del bacino idrografico del Roia (Julian, 1977)....	12
Figura 5. Geologia semplificata del bacino idrografico del Roia.....	12
Figura 7. Portate medie mensili a S. Dalmazzo-di-Tenda (1985-2024, in grigio) e Breil (1969-2017, in bianco).....	13
Figura 8. Portata istantanea massima a S. Dalmazzo-di-Tenda (1985-2021).....	14
Figura 9. Catena di produzione idroelettrica nel Roia.....	15
Figura 10. Ostacoli al deflusso e loro utilizzi nel bacino idrografico del Roia. Nella parte italiana, le derivazioni sono principalmente destinate all'uso agricolo e all'approvvigionamento idrico (campo di captazione).....	17
Figura 11. Siti strumentati nel Roia nell'ambito dei progetti Interreg Alcotra Concert-Eaux (2017-2020) e Concert-Eaux OPERA (2023-2024).....	23
Figura 12. Situazione geografica dei geofoni installati nel Roia. (a) e (c) Sito dell'Arbousset. (b) e (d) Sito di Vievola.....	27
Figura 13. Distribuzioni granulometriche (GSD) sui 3 siti di studio Fontan/Ambo, Pertus/Arbousset e Airole/Lamberta.....	29
Figura 14. Precipitazioni giornaliere e portata media giornaliera a S. Dalmazzo-di-Tenda, 01/10/2017 – 30/04/2018. Dati Banque Hydro e Météo France, in Chapuis et al., 2019a. La freccia rossa indica il periodo di distribuzione dei traccianti.....	30
Figura 15. Risultati 2018 del tracciamento sedimentario a Pertus. (a) Sito di studio: il Roia a Pertus. (b) Posizione iniziale, posizione finale, spostamento dei traccianti ritrovati ed evoluzione topografica dell'area tra marzo e settembre 2018. ....	31
Figura 16. Risultati 2018 del tracciamento sedimentario sul sito di Airole/Lamberta.....	32
Figura 17. Cartografia dei risultati della tracciatura sedimentaria tramite RFID attiva post-Alex (campagna 2021) per i traccianti inizialmente situati sul sito Fontan/Ambo. ....	37
Figura 18. Risultati del monitoraggio tramite sismica passiva nel settore dell'Arbousset tra il 24/06/2020 e l'11/05/2023. Si segnala in particolare l'episodio di trasporto solido associato alla tempesta Alex del 02/10/2020. ....	38
Figura 19. Risultati del monitoraggio tramite sismica passiva nel settore dell'Arbousset tra il 28/08/2020 e il 16/12/2020. Si segnala in particolare l'episodio di trasporto solido associato alla tempesta Alex del 02/10/2020, il cui unico picco misurato si trova intorno alle 19:50 a valle di Breil.....	40
Figura 20. Risultati del monitoraggio tramite sismica passiva nel settore dell'Arbousset tra il 07/09/2023 e il 20/02/2024. Si segnala in particolare l'episodio di trasporto solido associato alla "tempesta Aline" alla fine di ottobre 2023.....	41
Figura 21. (a) Risultati del monitoraggio tramite sismica passiva nel settore dell'Arbousset tra il 07/09/2023 e il 01/12/2023. (b) Altezza dell'acqua istantanea alla stazione di S. Dalmazzo-di-Tenda tra il 01/09/2023 e il 30/11/2023. Si segnala in particolare l'episodio associato alla "tempesta Aline" alla fine di ottobre 2023 e la similarità dei picchi tra il segnale sismico	

(cfr. Figura 20) e il segnale idrologico, sia in termini di frequenza che di intensità relativa, nonostante la distanza che separa i due siti di misura (cfr. Figura 11). ..... 42

Figura 22. Relazione tra distanza massima di trasporto e durata del monitoraggio per studi di tracciamento sedimentario tramite RFID (cerchi, n=207) o traccianti magnetici (triangoli, n=55). Il nostro monitoraggio si colloca nella gamma indicata dal cerchio rosso, il che conferma che il Roia è un sistema molto attivo, anche senza includere l'evento estremo del 02/10/2020..... 44

Figura 23. Relazione tra distanza media di trasporto e potenza specifica per studi di tracciamento sedimentario. .... 45

Figura 24. Le diverse risposte possibili di un sistema fluviale a seguito di una perturbazione, in funzione della sua capacità di adattamento. .... 47

Figura 25. Modellazione concettuale dell'influenza del cambiamento climatico sui flussi idro-sedimentari nel Roia a seguito della fine del Piccolo Periodo Glaciale (PPG). .... 49

Figura 26. Riaggiustamento del modello concettuale dei flussi idro-sedimentari in Roia a seguito delle precipitazioni di periodo di ritorno di 1000 anni verificatesi il 02/10/2020. Effetto di accentuazione (+) vs. effetto di attenuazione (-) vs. effetto indefinito (?). .... 50

Figura 27. Tendenze di un idrosistema nel caso di un intervento di ripristino e nozione di stato di riferimento che deve essere definito a partire da obiettivi piuttosto che da un riferimento storico. .... 51

## Elenco delle tabelle

Tabella 1. Data di messa in servizio di alcune stazioni pluviometriche nel bacino idrografico (non esaustivo).....	9
Tabella 2. Portate (in m <sup>3</sup> /s) dei periodi di ritorno caratteristici a S. Dalmazzo-di-Tenda e Breil I valori tra parentesi quadre corrispondono all'intervallo di incertezza. Calcoli CRUCAL effettuati il 24/04/2024 alle 02:15 (TU) per la stazione di S. Dalmazzo e il 24/01/2024 alle 03:18 (TU) per la stazione di Breil.....	14
Tabella 3. Valore del modulo per S. Dalmazzo-di-Tenda e Breil.....	14
Tabella 4. Messa in servizio delle opere di produzione idroelettrica, dall'alto verso il basso (cf. Figura 9). .....	16
Tabella 5. Assi di studio esplorati nell'ambito dello studio dei trasferimenti sedimentari in Roia, protocollo succinto attuato e documento di riferimento attuale sull'argomento.....	21
Tabella 6. Specifiche tecniche dei geofoni installati in Roia.....	26
Tabella 7. Bilancio delle campagne di monitoraggio RFID passiva 2018 e 2019.....	33
Tabella 8. Sintesi dell'installazione di traccianti RFID passivi post-Alex nell'estate 2021. ....	34
Tabella 9. Risultati annuali delle campagne di tracciamento sedimentario tramite RFID attiva a partire dal 2019. ....	35
Tabella 10. Velocità annuale virtuale media nel periodo considerato (m/anno). Sono indicati il numero di traccianti da cui è stato calcolato il valore. I risultati che si collocano nell'intervallo di incertezza delle misurazioni sul campo sono indicati tra parentesi.....	36

*Activité 3.1 : Poursuite des études liées à la tempête Alex*  
*Attività 3.1 : Continuazione degli studi relativi alla tempesta Alex*

**Livrable 3.1.3 Modélisations hydrologiques des débits de la Roya en France-Italie**

# **Modélisation des Débits dans la Vallée de la Roya**

## **D.M. Fox, M. Atiq**

**UMR ESPACE CNRS, Université Côte d'Azur**

### **Résumé**

Dans les bassins fluviaux du monde entier, les modèles hydrologiques sont largement utilisés pour améliorer la compréhension des processus hydrologiques et la disponibilité des ressources en eau. Les modèles hydrologiques sont un outil crucial pour développer des stratégies d'adaptation afin d'évaluer et de prévoir la quantité d'eau dont disposeront les bassins fluviaux en raison du changement climatique. Pour que les projections de débit puissent être fiables, ces modèles doivent être correctement calibrés et validés. Dans le bassin versant de la Roya, près de la frontière franco-italienne, la modélisation événementielle a été calibrée (2014) et validée à l'aide du modèle hydrologique HEC-HMS pour deux périodes de temps (2016 et 2024). Tout au long des étapes de calibration et de validation, les simulations de débit de ruissellement ont été utilisées pour évaluer les performances du modèle pour chaque bassin versant. L'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) ont été utilisés pour évaluer les performances du modèle. Les paramètres utilisés pour simuler les pertes d'infiltration, la transformation du ruissellement direct sont le SCS Curve Number pour les pertes, la méthode SCS Unit Hydrograph pour la transformation et la méthode Muskingum pour le routage. Cette étude montre que le bassin versant de la Roya est efficacement modélisé à l'aide du modèle hydrologique HEC-HMS, ce qui permet d'améliorer l'évaluation et la prédiction de la réponse hydrologique.

### **1. Introduction**

Les bassins versants du bassin méditerranéen sont sujets à de nombreux événements graves qui peuvent entraîner des pertes de vie et des conséquences économiques et sociales importantes. La tempête Alex du 2-3 octobre 2020 en est l'exemple parfait. La géographie de la région, caractérisée par de nombreuses montagnes environnantes, la rend particulièrement vulnérable aux événements extrêmes. De plus, le développement le long de la côte méditerranéenne a augmenté en raison de l'attractivité et de la croissance économique de la région,

Les fortes pluies et la fonte des neiges en amont provoquent des inondations dans la vallée de la Roya. Pour gérer ces inondations, les populations ont mis en place des mesures telles que des systèmes de prévision des inondations et le zonage des plaines inondables au cours des dernières décennies. Ces stratégies, ainsi que les progrès de la modélisation informatique qui permettent aux chercheurs de mieux comprendre l'impact de la pluie sur le paysage, ont contribué à réduire les dommages causés par les inondations Hipolito et Vaz (2013). Les chercheurs utilisent des modèles depuis de nombreuses années pour prédire l'impact de la pluie sur une zone donnée. Ces modèles ont récemment été adaptés pour prendre en compte les effets du changement climatique sur les ressources en eau. Les activités humaines telles que l'agriculture, les barrages, les usines et les villes modifient également considérablement le paysage, ce qui a un impact sur le flux de l'eau. Grâce à la modélisation informatique, nous pouvons désormais non seulement comprendre ces changements, mais aussi prédire leurs effets futurs et développer des moyens de les atténuer. En

bref, la modélisation informatique est un outil puissant et abordable pour simuler les inondations futures K, (2019).

De nombreux modèles hydrologiques basés sur les processus physiques ont été développés, tels que le modèle distribué de l'Institut d'hydrologie (IHDM), le modèle de gestion des eaux pluviales (SWMM), le système de modélisation des précipitations-ruissellement (PRMS), le système de prévision des cours d'eau du National Weather Service (NWS), Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation (SSARR), Système Hydrologique Européen (SHE), TOPMODEL, et autres Frevert et Singh, (2006) et Džubáková (2010). Notre étude vise à utiliser le modèle hydrologique HEC-HMS pour effectuer des simulations de modélisation pluie-ruissellement basées sur des événements importants dans les bassins versants de la vallée de la Roya et à déterminer le débit aux points de Breil-sur-Roya, France, et Airole, Italie.

Le modèle HEC-HMS a été créé par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine (USACE). Dans ce travail, nous avons utilisé cette approche car elle a été utilisée avec succès ces dernières années pour prédire le ruissellement des pluies dans de nombreuses régions du monde. Ainsi, la validation de modèles pour deux bassins versants chinois a été effectuée par Oleyiblo et Li (2009). Chu et Steinman (2009) ont utilisé une analyse combinée continue et événementielle pour un bassin versant du Michigan, aux États-Unis. Un modèle pluie-ruissellement pour un bassin Sri-lankais a été validé par Halwatura et Najim (2013), et Unduche et al. (2018) ont constaté que le modèle pouvait être utilisé pour prévoir les inondations au Canada.

L'objectif de cette étude est de modéliser des événements importants dans la Vallée de la Roya afin d'évaluer le potentiel du modèle HEC-HMS pour simuler les débits de pointe.

## **2. Méthodologie**

La modélisation hydrologique vise à estimer les hydrogrammes de débit à partir des bassins versants, les résultats pouvant ensuite être utilisés comme entrées pour une éventuelle modélisation hydraulique. La figure 1 montre les méthodes utilisées pour cette étude de modélisation hydrologique.

HEC-HMS fournit des approches pour estimer le débit de base, convertir les précipitations excédentaires et calculer les pertes hydrologiques. La partie suivante détaille la configuration du modèle HEC-HMS. Le modèle hydrologique a été vérifié et calibré dans une deuxième étape. L'efficacité du modèle de Nash-Sutcliffe (NSE) et le coefficient  $R^2$  ont été utilisés pour évaluer l'efficacité de l'étalonnage.

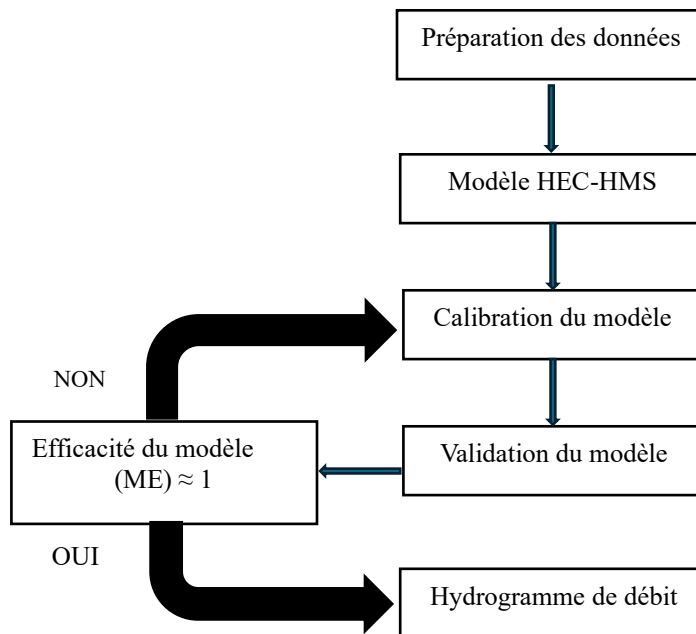


Figure 1 : Organigramme montrant la méthodologie de travail de cette étude

## 2.1 Zone d'étude

La vallée de la Roya est située à la frontière franco-italienne. La Roya prend sa source en France au col de Tende et se jette dans la mer Méditerranée à Vintimille, en Italie. La superficie du bassin versant est de 670 km<sup>2</sup> avec une longueur de rivière de 60 km selon Piton et al. (2024). La superficie du bassin versant en France est de 394 km<sup>2</sup>, avec une longueur de rivière de 44 km. La plaine alluviale connaît un climat méditerranéen avec une température annuelle moyenne de 14,5 °C et des précipitations de 791 mm selon Vidal et al. (2010). Le bassin versant compte deux stations de jaugeage du débit, à Breil-sur-Roya en France (en amont) et à Airole en Italie (en aval), ainsi que huit pluviomètres répartis sur l'ensemble du bassin.

La Roya et ses affluents traversent des pentes abruptes et des vallées étroites. Les vallées de certains bassins glaciaires sont légèrement plus larges que les gorges profondes qui les séparent. Le chenal principal présente des pentes fortes : entre 1,3% et 5,1% sur 20 km, entre 1% et 2% sur les 20 km en aval avant la frontière, et plus de 5% dans la partie la plus haute du cours de la Roya, en amont de Vievola selon l'ONF-RTM et al. (2022). Les crues se propagent rapidement en raison des pentes raides, en particulier dans la haute vallée selon BRGM-SCP (2006). Le Shapefile de la France provient du site web (<https://www.istockphoto.com/fr/illustrations/france>) comme le montre la Figure 2.

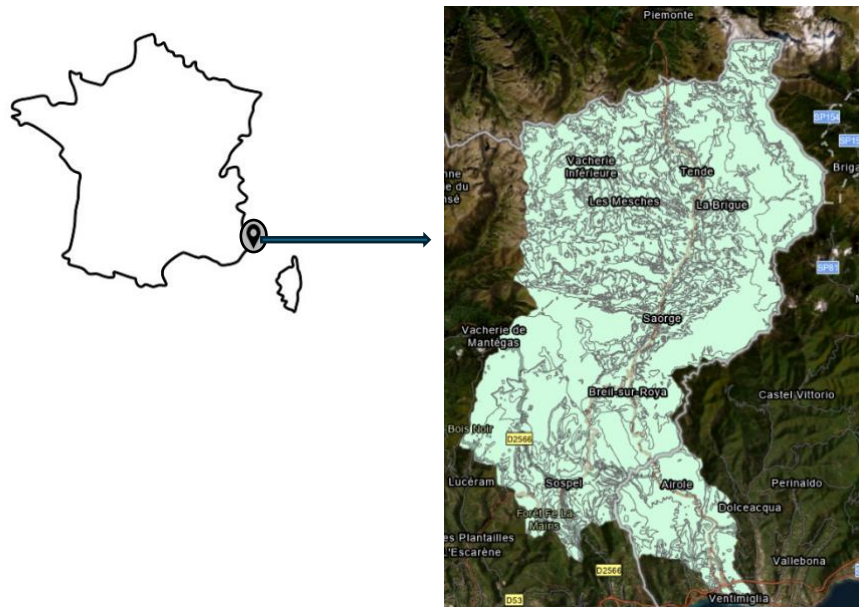


Figure 2 : La zone d'étude de la vallée de la Roya

## 2.2 Données

Pour estimer la modélisation pluie-ruisellement de différents paramètres hydrologiques, plusieurs entrées ont été utilisées, telles que des études sur les modèles numériques de terrain (MNT), des données de pluie, des mesures hydro-morphologiques et des données de télédétection (Scipal et al. 2005, Milzow et al. 2009). Pour créer un modèle hydrologique pour l'analyse du bassin versant, les données disponibles pour la modélisation pluie-ruisellement telles que les précipitations, les évaluations topographiques, l'occupation du sol et les caractéristiques de rugosité hypergéométrique ont été collectées, traitées et intégrées dans un SIG. Les caractéristiques topographiques du bassin versant ont été extraites d'un modèle numérique de terrain à résolution 30 m obtenu à partir du site Web ASTER DEM. Des données sur l'occupation du sol à une résolution de 100 m ont été acquises sur le site Web de Corine Land Cover de Copernicus. En raison de la pente de la zone, la majorité de la zone d'étude tombe dans les catégories de sol C et D, par conséquent, les données sur le sol provenant du Global Hydrological Soil Group ont été mises à jour pour s'adapter aux caractéristiques du bassin versant.

Le modèle a été calibré à l'aide de données de pluies événementielles du 1er novembre au 15 décembre 2014 et validé à l'aide de données du 1er novembre au 31 décembre 2016 et du 15 février au 30 avril 2024. Les données de pluie quotidiennes ont été récupérées sur le site Web SAFRAN. Étant donné que la fonte des neiges et les précipitations sont les principales sources d'eau de la région, le montant total des précipitations qui contribuent au débit du bassin versant a été modélisé en utilisant la somme de ces deux paramètres. Il existe deux points de mesures de débits : Breil-sur-Roya (43°54'42"N, 7°31'E), près de la frontière française, où les données sont extraites du site Web Hydroportail, et Airole, du côté italien, où les données sont extraites de la station pluviométrique d'Airole (43°52'23"N, 7°32'41"E).

## 2.3 Préparation des données de modélisation hydrologique

### 2.3.1 Occupation du sol, LULC

Les cartes d'occupation du sol de la Roya pour l'année la plus récente, 2018, ont été téléchargées à une résolution de 100 m sur le site Web Copernicus. Une nouvelle série de classes a été établie en fusionnant les 25 classes CLC initialement incluses dans les cartes. Six nouvelles catégories ont été créées : terres urbaines, forêts, terres agricoles, sols nus, masses d'eau et prairies et arbustes, comme le montre la figure 3. Ensuite, une valeur de CN a été attribuée à chaque catégorie d'occupation du sol.



Carte de couverture du sol

Catégories d'occupation du sol	CN
Forêt	74
Terres agricoles	79
Prairies et landes	80
Zone urbaine	88
Terres incultes	94
Masses d'eau	100

Nombre de courbes attribué

Figure 3 : Carte d'utilisation des terres et de couverture du sol et nombre de courbes attribué, CN

### 2.3.2 Groupe hydrologique de sols

Le site Web du Global Hydrological Soil Group fournit des données sur les sols et, sur la base de ces données, notre bassin versant est classé en cinq catégories : B, C, D, B/D et C/D. Cependant, en raison de la pente raide et de la carte d'occupation du sol de notre bassin versant, nous avons estimé que nos catégories de sols ne tombent que dans C et D, comme le montre la figure 4, et ont des valeurs de nombre de CN élevées.

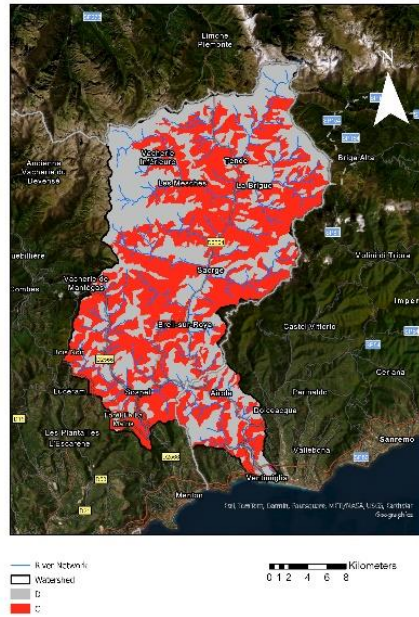
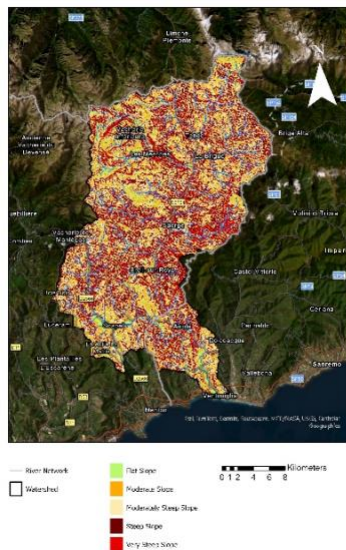


Figure 4 : Carte des sols de la zone d'étude

### 2.3.3 Pente

La pente est calculée à l'aide d'un modèle numérique de terrain, allant de  $0^\circ$  à  $73^\circ$ . Les pentes sont divisées en cinq groupes : pente plate, pente moyenne, pente moyennement raide, pente raide et pente très raide, comme le montre la figure 5. Le coefficient de pente est ensuite appliqué aux valeurs de CN initialement attribué en fonction de l'occupation du sol et des caractéristiques pédologiques.



Carte de pente

Catégorie de pente	Plage de pente (Degrés)	Coefficient de pente
Pente faible	$0 \geq 10$	0.9
Pente moyenne	$10 \geq 20$	0.95
Pente moyenne forte	$20 \geq 30$	1
Pente forte	$30 \geq 40$	1.05
Pente très forte	$40 \geq 73$	1.10

Coefficient de pente attribué

Figure 5 : Carte de pente avec coefficient de pente associé

### 2.3.4 Les valeurs de CN finales

Dans notre bassin versant, les calculs décrits ci-dessus donnent des valeurs de CN comprises entre 66.6 et 100, comme le montre la figure 6.

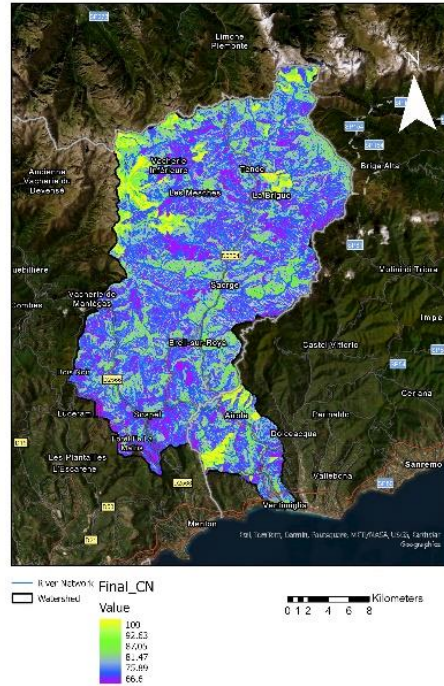


Figure 6 : Le nombre de courbes final de notre bassin versant

## 2.4 Configuration du modèle HEC-HMS

### 2.4.1 Fonction de perte - Méthode SCS

Il est important de distinguer le débit de base du ruissellement direct pour estimer les précipitations efficaces. La première étape consiste à choisir une technique de séparation du débit de base. Ici, la technique de base fixe est appliquée par Chow et al. (1988). Cette méthode permet de relier le débit de base au début de l'événement au temps de pic de crue, puis de l'étendre jusqu'au moment où la récession commence. En traçant les données de débit logarithmique, qui présentent une tendance linéaire pendant la période de récession, il est possible de déterminer ce point d'inflexion Shaw, (1994). Le volume de pluie efficace est obtenu en intégrant l'hydrogramme de ruissellement et est ensuite distribué à chaque pas de temps en sélectionnant une fonction de perte. Cette méthode permet d'estimer un hydrogramme qui correspond au ruissellement direct observé et de déterminer le paramètre de la méthode de perte de manière initiale.

La formule suivante est utilisée pour calculer les précipitations efficaces.

$$Pe=(P-Ia)^2/(P-Ia+S)$$

Où Pe est l'excès de précipitations au temps t, P est la profondeur cumulée des précipitations au temps t et Ia est l'abstraction initiale, également connue sous le nom de perte initiale ;  $Ia = 0.2S$  où

$S = (25400 - 254 * CN) / CN$  qui est généralement défini comme la rétention maximale possible du bassin versant. Pour les sols à taux d'infiltration élevé, la valeur du CN est faible et tend vers 0, pour les surfaces imperméables, il est de 100. Comme mentionné par Subramanya (2008), qui recommande  $I_a \approx 0,3S$  dans les contextes indiens, ce paramètre peut être ajusté en fonction des faits locaux. Les valeurs de CN sont calculées à l'échelle du sous bassin versant.

#### **2.4.2 Transformation – Temps de réponse**

Après une courte période de pluie intense sur un bassin versant, il y a un retard avant que le ruissellement n'atteigne son pic. Le décalage est une propriété du bassin versant qui décrit ce temps de réponse (Kent, 1972). Le temps de concentration du bassin doit être déterminé avant que le temps de réponse puisse être déterminé (Nasri et al., 2011). La formule Kirpich-Ramser (Mckenroe & Zhao, 1999) a été utilisée pour calculer le temps de concentration. HEC HMS calcule automatiquement le temps de réponse pour chaque sous-bassin.

$$T_c = 0.0195[(L / S^{0.5})^{0.77}]$$

Tc : Minutes, L : Plus long chemin d'écoulement (m), S : Pente du fleuve (m/m)

#### **2.4.3 Méthode de routage - Méthode Muskingum**

Les deux paramètres de la méthode de Muskingum pour le routage hydrologique, K et x, sont importants. Le paramètre K représente la partie translation ou concentration de l'opération de routage, tandis que le paramètre x représente la partie stockage. Dans notre bassin versant, nous utilisons K = 0,8 et x = 0,3.

#### **2.4.4 Subdivision des bassins versants pour la modélisation**

Le bassin versant a été divisé en sous-bassins plus petits pour améliorer les performances de la modélisation et permettre au modèle de fonctionner comme un modèle semi-distribué, comme le montre la figure 7.

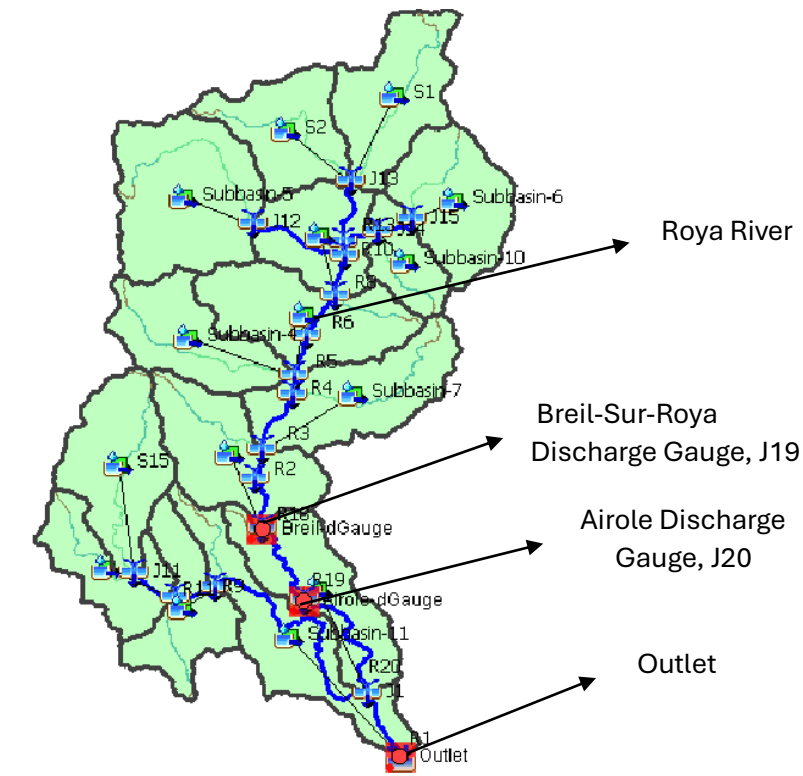


Figure 7 : Subdivision du bassin versant

### 3. Résultats

#### 3.1 Étalonnage et validation du modèle

L'efficacité d'un modèle hydrologique de bassin versant dépend de la qualité de son étalonnage, qui est déterminée par les capacités techniques du modèle ainsi que par la qualité des données d'entrée. Pour les simulations événementielles, le modèle de bassin versant HEC-HMS fait correspondre les temps des hydrogrammes, les valeurs de débit de pointe et les volumes de ruissellement entre la simulation et l'observation. Une combinaison d'approches d'étalonnage automatique et humaine a été utilisée dans cette étude. Pour trouver les valeurs optimales de paramètres qui correspondent le mieux aux volumes de débit simulés et observés, un processus d'étalonnage automatique connu sous le nom d'"optimisation par essais" dans HEC-HMS a été utilisé par Ruelland et al. (2008). Les résultats générés par le modèle hydrologique correspondaient étroitement aux hydrogrammes observés. La figure 8 compare les débits simulés et observés le long d'une série chronologique pour la période d'étalonnage, du 1 novembre au 15 décembre 2014. Comme observé dans les mesures de débit, le modèle avait tendance à surestimer le ruissellement. Néanmoins, les valeurs de débit réelles les plus élevées correspondaient bien aux pics simulés. Lorsque le modèle a été calibré par la suite, son débit de pointe était bien inférieur à ce qu'il était auparavant, comme le montre la figure 8. Le tableau 1 fournit des détails sur les paramètres HEC-HMS calibrés pour cette période de temps.

Les indices de performance sont décrits dans la partie

### 3.1.1 Calibration (1 novembre - 15 décembre 2014)

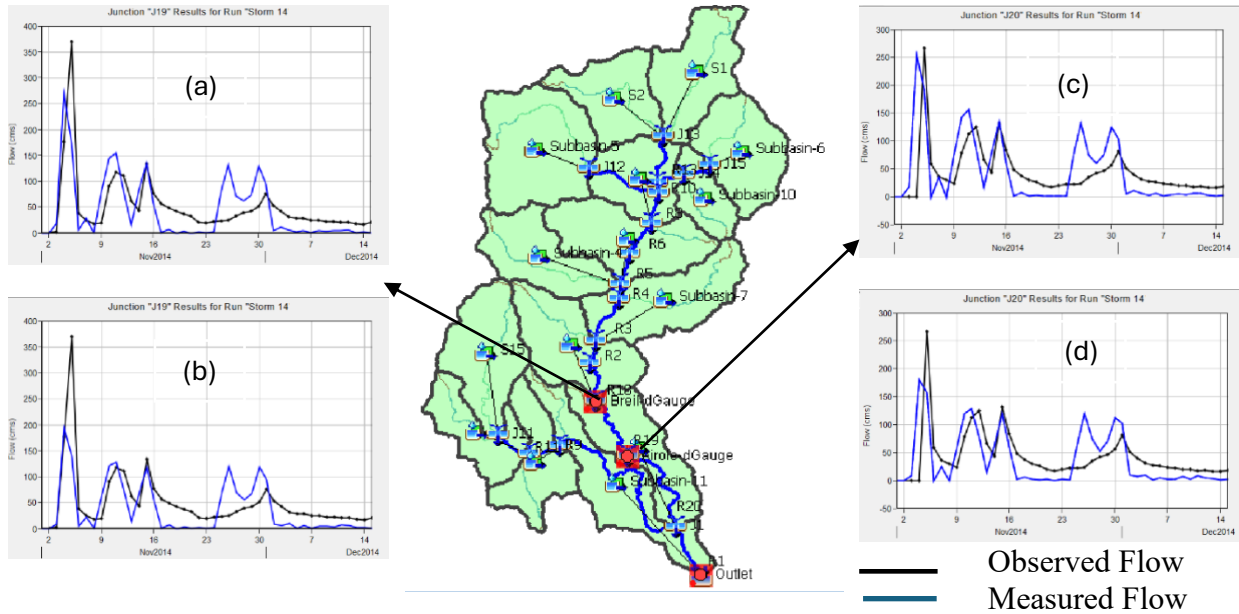


Figure 8 : Calibration 2014 (a) Débit de Breil avant (b) après, (c) Débit d'Airole avant (d) après

Tableau 1 : Données originales et calibrées pour 2014

Muskingum, K (hr.) and X					CN		Abstraction initiale, Ia (mm)		
Tronçons	Originale		Calibré		Sous-bassin	Originale	Calibré	Originale	Calibré
	K	X	K	X				Ia = 0.2S	
R1	0.8	0.3	1	0.5	S1	77.7	58.7	14.6	14.2
R2	0.8	0.3	1	0.5	S2	77.6	58.6	14.7	14.5
R3	0.8	0.3	1	0.5	S3	76.9	57.9	15.3	15.1
R4	0.8	0.3	1	0.5	S4	77.7	58.7	14.6	14.2
R5	0.8	0.3	1	0.5	S5	80.9	61.9	12	11.8
R6	0.8	0.3	1	0.5	S6	77.4	58.4	14.8	14.6
R7	0.8	0.3	1	0.5	S7	77.6	58.6	14.7	5
R8	0.8	0.3	1	0.5	S8	78.5	59.5	13.9	13.7
R9	0.8	0.3	1	0.5	S9	76.8	57.8	15.3	15.1
R10	0.8	0.3	1	0.5	S10	77.6	58.6	14.7	14.5
R11	0.8	0.3	1	0.5	S11	76.5	57.5	15.6	15.4
R12	0.8	0.3	1	0.5	S12	74.5	55.5	17.4	17.2
R13	0.8	0.3	1	0.5	S13	73.2	54.2	18.6	18.4
R14	0.8	0.3	1	0.5	S14	77.9	58.9	14.4	114.2
R15	0.8	0.3	1	0.5	S15	77.7	58.7	14.6	14.2
R18	0.8	0.3	1	0.5					
R19	0.8	0.3	1	0.5					
R20	0.8	0.3	1	0.5					

### 3.1.2 Validation (1 novembre - 30 décembre 2016)

Nous avons entraîné le modèle en utilisant les données de 2014, puis nous avons appliqué les paramètres calibrés à deux périodes distinctes (2016 et 2024) pour valider les performances du modèle. Les figures 9 et 10 montrent les résultats de ce processus de validation, et les tableaux 2 et 3 fournissent des informations supplémentaires.

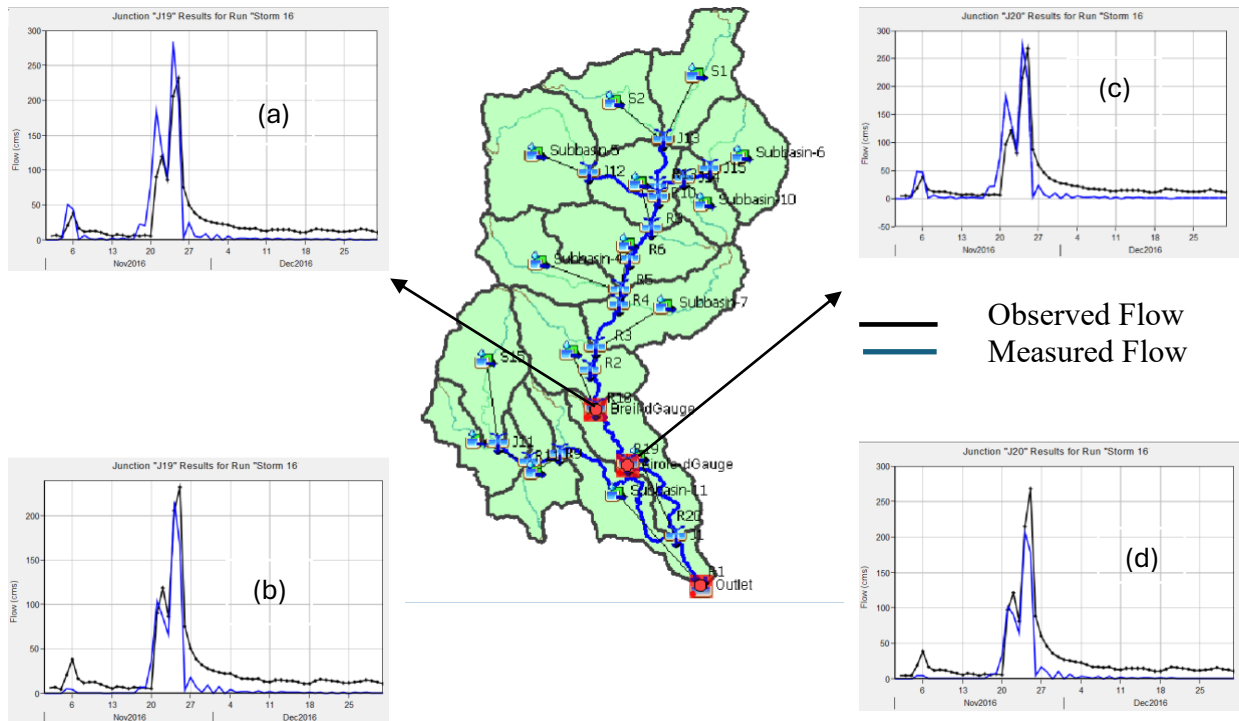


Figure 9 : Validation 2016 (a) Débit de Breil avant (b) après, (c) Débit d'Airole avant (d) après

Tableau 2 : Données originales et calibrées pour 2016

Muskingum, K (hr.) and X					Nombre de courbe		
Tronçons	Originale		Calibré		Sous-bassin	Originale	Calibré
	K	X	K	x			
R1	0.8	0.3	0.9	0.4	S1	77.7	52.7
R2	0.8	0.3	0.9	0.4	S2	77.6	52.6
R3	0.8	0.3	0.9	0.4	S3	76.9	51.9
R4	0.8	0.3	0.9	0.4	S4	77.7	52.7
R5	0.8	0.3	0.9	0.4	S5	80.9	55.9
R6	0.8	0.3	0.9	0.4	S6	77.4	52.4
R7	0.8	0.3	0.9	0.4	S7	77.6	52.6
R8	0.8	0.3	0.9	0.4	S8	78.5	53.5
R9	0.8	0.3	0.9	0.4	S9	76.8	51.8
R10	0.8	0.3	0.9	0.4	S10	77.6	52.6
R11	0.8	0.3	0.9	0.4	S11	76.5	51.5
R12	0.8	0.3	0.9	0.4	S12	74.5	49.5
R13	0.8	0.3	0.9	0.4	S13	73.2	48.2
R14	0.8	0.3	0.9	0.4	S14	77.9	52.9
R15	0.8	0.3	0.9	0.4	S15	77.7	52.7
R18	0.8	0.3	0.9	0.4			
R19	0.8	0.3	0.9	0.4			
R20	0.8	0.3	0.9	0.4			

3.1.3 Calibration (15 février - 30 avril 2024)

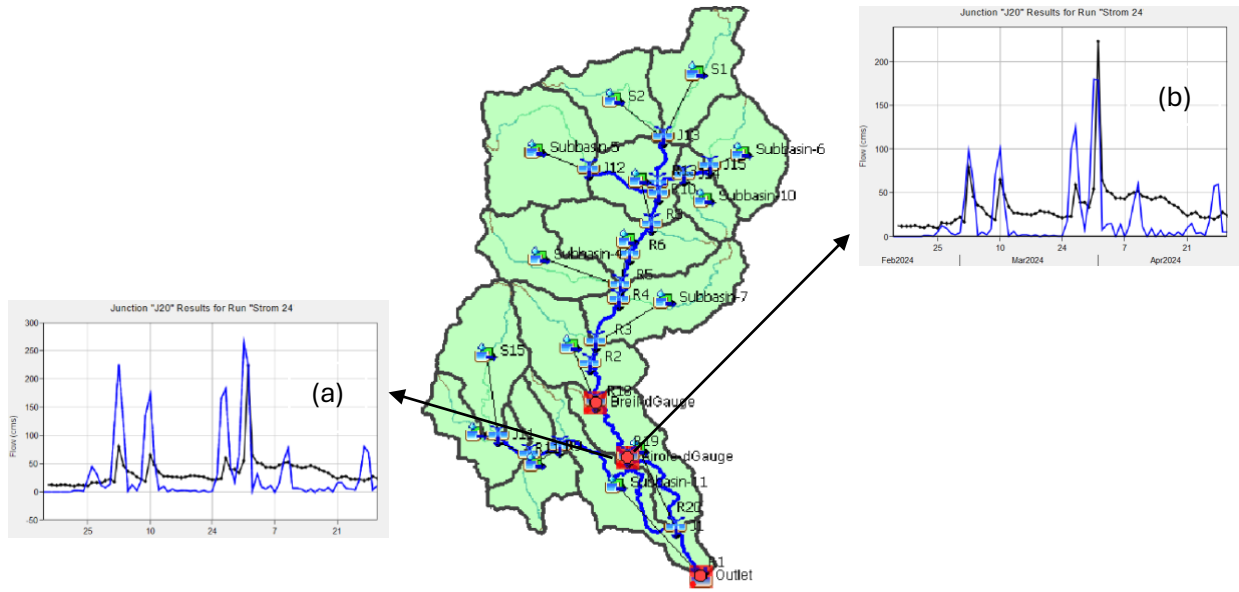


Figure 10 : Validation 2024 (a) Débit d'Airole avant (b) après

Tableau 3 : Données originales et calibrées pour 2024

Sous-bassin	Nombre de courbe, CN		Muskingum, K (hr.)		
	Originale	Calibré	Tronçons	Originale	Calibré
S1	77.7	39.7	R1	0.8	1
S2	77.6	39.6	R2	0.8	1
S3	76.9	38.9	R3	0.8	1
S4	77.7	39.7	R4	0.8	1
S5	80.9	42.9	R5	0.8	1
S6	77.4	39.4	R6	0.8	1
S7	77.6	39.6	R7	0.8	1
S8	78.5	40.5	R8	0.8	1
S9	76.8	38.8	R9	0.8	1
S10	77.6	39.6	R10	0.8	1
S11	76.5	38.5	R11	0.8	1
S12	74.5	36.5	R12	0.8	1
S13	73.2	35.2	R13	0.8	1
S14	77.9	39.9	R14	0.8	1
S15	77.7	39.7	R15	0.8	1
			R18	0.8	1
			R19	0.8	1
			R20	0.8	1

### 3.2 Évaluation du modèle

Les résultats de NSE sont présentés dans le tableau 5 et les résultats de  $R^2$  sont présentés dans les figures 11, 12, 13 et le tableau 4. Les périodes d'étalonnage et de validation (1 novembre au 15 décembre 2014 ; 1 novembre au 31 décembre 2016) sont représentées par des graphiques qui comparent les flux observés et simulés.

### 3.2.1 Résultat R<sup>2</sup>

#### 3.2.1.1 Étalonnage 2014

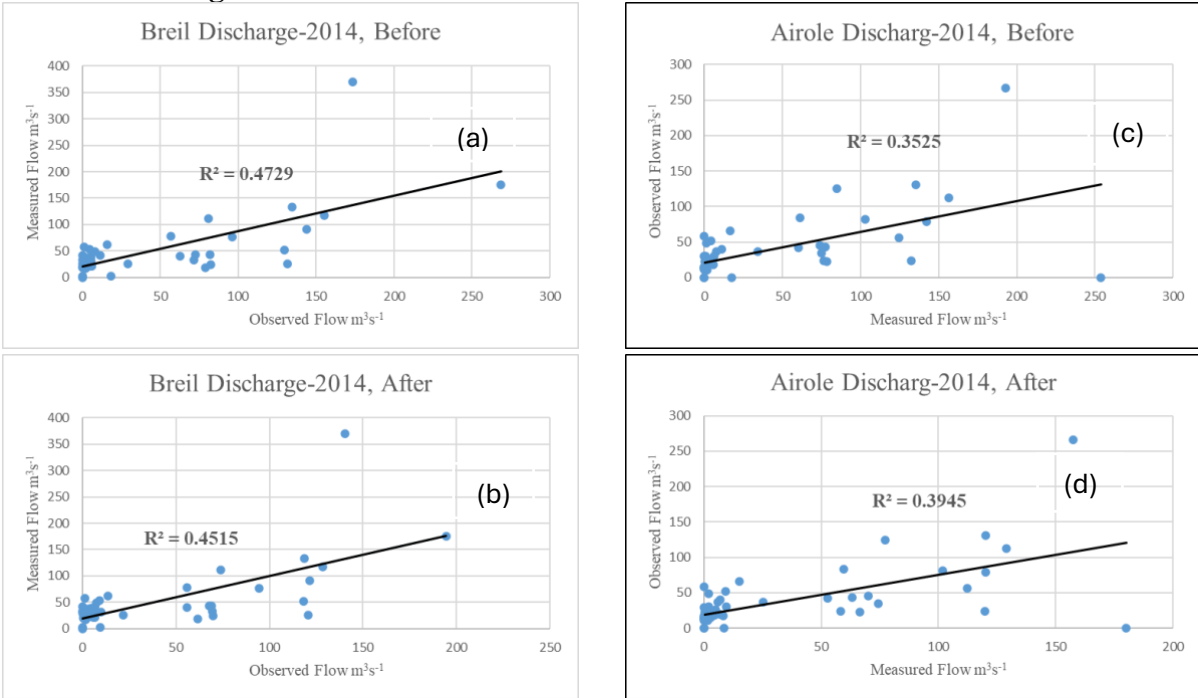


Figure 11 : R<sup>2</sup> 2014 (a) Débit de Breil avant (b) après (c) Débit d'Airole avant (d) après

#### 3.2.1.2 Validation 2016

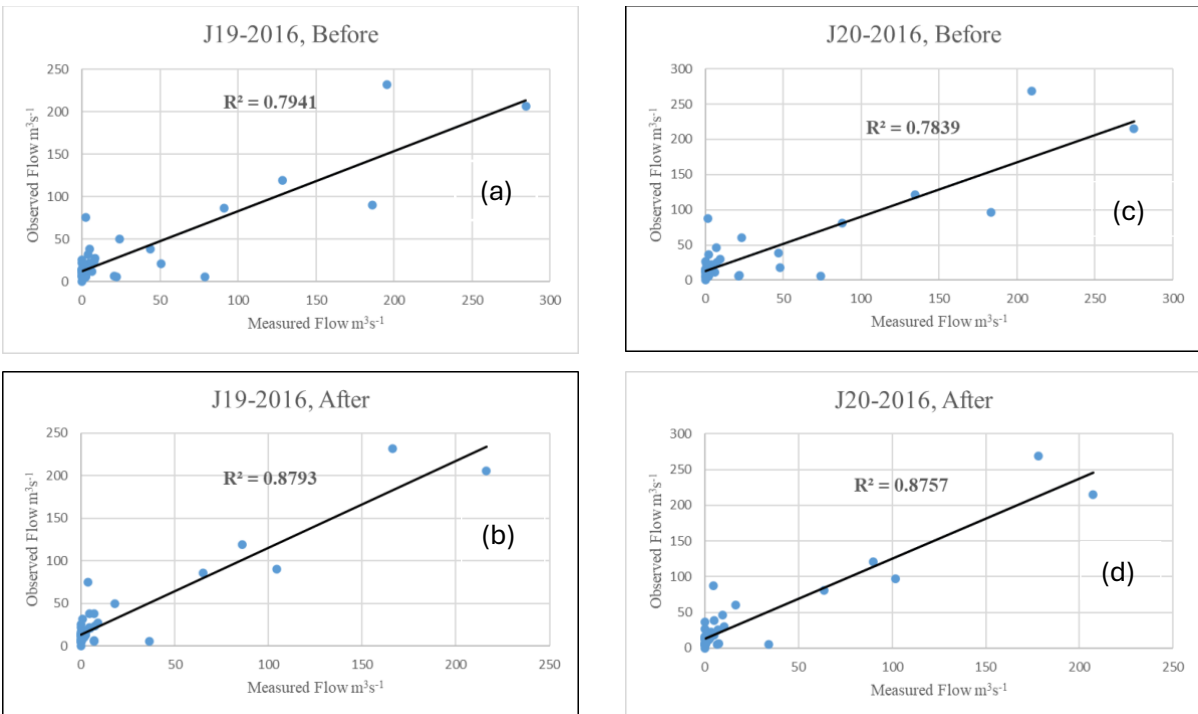


Figure 12 : R<sup>2</sup> 2016 (a) Débit de Breil avant (b) après (c) Débit d'Airole avant (d) après

### 3.2.1.3 Validation 2024

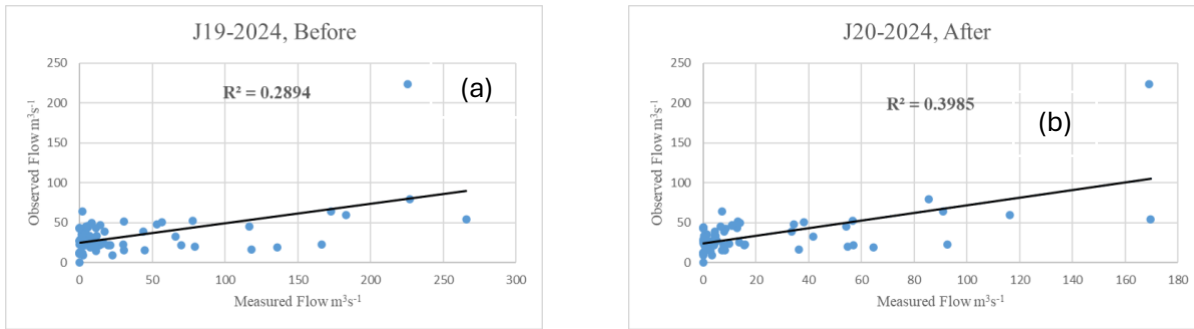


Figure 13 :  $R^2$  (a) Débit d'Airole avant (b) après

### 3.2.2 Résultats globaux $R^2$ et NSE

Les méthodes d'évaluation des prédictions indiquent que les performances de notre modèle avec les données des phases d'étalonnage et de validation se situent dans la plage "Satisfaisant à Très Bon" sauf pour 2024 qui sont insatisfaisantes. Les tableaux 4 et 5 résument les valeurs  $R^2$  et NSE, qui indiquent de bons résultats pour la validation de 2016 mais une performance médiocre pour 2024. Des essais supplémentaires doivent avoir lieu sur un plus grand nombre d'événements afin de déterminer si cette erreur est liée aux données de cet événement ou si la modélisation reste très variable selon les événements.

Tableau 4 : Résultats de calibration et de validation  $R^2$

Calibration			Validation			
2014			2016		2024	
Junctions	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
J19, Breil	0.4	0.5	0.8	0.9		
J20, Airole	0.2	0.3	0.8	0.9	0.3	0.4

Tableau 5 : Résultats NSE pour la calibration et la validation

Calibration			Validation			
2014			2016		2024	
Junctions	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
	NSE	NSE	NSE	NSE	NSE	NSE
J19, Breil	0.3	0.4	0.6	0.8		
J20, Airole	-0.4	0.03	0.7	0.8	-2.6	-0.4

#### 4. Conclusion

Chaque bassin versant a vu son modèle de simulation hydrologique de bassin versant HEC-HMS calibré et validé. Les facteurs les plus sensibles pour la modélisation du ruissellement se sont avérés être les coefficients de Muskingum et le SCS CN. D'autres auteurs ont également observé cette sensibilité dans leur étude du bassin versant de Dale Hollow dans le bassin de la Cumberland River aux États-Unis Gebre, (2015). L'applicabilité du modèle à différents bassins versants a été évaluée à l'aide de métriques de performance, notamment le  $R^2$  et le NSE.

Breil-sur-Roya et Airole sont les deux lieux de décharge où le modèle a prédit le plus précisément le débit quotidien des cours d'eau, bien qu'il y ait eu quelques légères sur- et sous-estimations des débits élevés.

Cette étude confirme que le modèle HEC-HMS peut être utilisé dans d'autres bassins versants présentant des caractéristiques hydrométéorologiques et d'occupation du sol similaires et peut être utilisé pour simuler et estimer les implications futures du changement climatique sur le ruissellement dans le bassin versant de la Roya.

#### 5. Références

- Adamovic, M., Branger, F., Braud, I., & Kralisch, S. (2016). Development of a data-driven semi-distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods. *Journal of Hydrology*, 541, 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.032>
- Angelidis P., Mystakidis G., Lalikidou S., Hrissanthou V. and Kotsovinos N. (2010), Computation of Hydrographs in Evros River Basin, *European Water*, **31**: 33-42.
- BRGM-SCP, 2006. Faisabilité de la mise en place d'un système d'annonce des crues sur la Roya. In: PIC INTERREG III A 2000-2006 ALCOTRA : EUROBASSIN.
- Chu, X. and Steinman, A., 2009. Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1), pp.119-124.
- Džubáková K. (2010), rainfall-Runoff Modelling: Its Development, Classification and Possible Applications. *Acta Geographica Universitatis Comenianae*, Vol. 54, No. 2, pp. 173-181.
- Fox, D. M., Youssaf, Z., Adnès, C., & Delestre, O. (2019). Relating imperviousness to building growth and developed area in order to model the impact of peri-urbanization on runoff in a Mediterranean catchment (1964-2014). *Journal of Land Use Science*, 14(3), 210–224. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2019.1681528>
- Frevert, D.K., Singh V. (eds.) 2006. *Watershed Models*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 653 p., ISBN 0-8493-3609-0.
- Gebre, S. L. (2015). Application of the HEC-HMS Model for Runoff Simulation of Upper Blue Nile River Basin. *Journal of Waste Water Treatment & Analysis*, 06(02). <https://doi.org/10.4172/2157-7587.1000199>

Guta, H. (2021). *Application of HEC-HMS for rainfall-runoff modelling in Mozambique and France*. null-null. <https://doi.org/10.3311/floodrisk2020.18.9>

Global Hydrologic Soil group :

([https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global\\_Hydrologic\\_Soil\\_Group.html](https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global_Hydrologic_Soil_Group.html))

Hipólito ,J. R and Vaz, A.C. (2012) *Hidrologia e Recursos Hídricos*, IST Press.

Halwatura D. Najim M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical. *Environmental Modelling. & Software*. Volume 46: pp. 55-162.

K, M. I. (2019). Hydrological Modeling of Upper Indus Basin Using HEC -HMS. *JOURNAL OF MECHANICS OF CONTINUA AND MATHEMATICAL SCIENCES*, 14(3). <https://doi.org/10.26782/jmcms.2019.06.00020>

Kent K. 1972. Travel Time, Time of Concentration and Lag. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 15.

Mcenroe, B. M., & Zhao, H. (1999). *LAG TIMES AND PEAK COEFFICIENTS FOR RURAL WATERSHEDS IN KANSAS*.

Milzow, C., Kgotlhang, L., Kinzelbach, W., Meier, P., & Bauer-Gottwein, P. (2009). The role of remote sensing in hydrological modelling of the Okavango Delta, Botswana. *Journal of environmental management* , 90 (7), 2252-2260.

Maidment, D.R. (1993). *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill.

Nasri M., Soleimani Sardoo F. and Katani M. 2011. Simulation of the Rainfall-Runoff Process Using of HEC-HMS Hydrological Model (A Case Study of Sheikh Bahaei Dam Basin). *World Academy of Science, Engineering and Technology* 78.

Oleyiblo J., Li Z. (2009). Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. *Water Science and Engineering*. 3(1):14-22.

ONF-RTM, ONF-DRN, INRAE-ETNA, 2022a. Retour d'exp'érience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vall'ee de la Roya - Volet torrentiel (No. V1). In: Direction D'épartementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06), Nice (France). <https://doi.org/10.57745/B69M2O>, 275 pp. +922 appendixes [online]. (last visited 10/31/2023).

Piton, G., Cohen, M., Flipo, M., Nowak, M., Chapuis, M., Melun, G., Robert, Y., Andréis, N., & Liebault, 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. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108981>

Romali, N. S., Yusop, Z., & Ismail, A. Z. (2018). Hydrological Modelling using HEC-HMS for Flood Risk Assessment of Segamat Town, Malaysia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 318(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/318/1/012029>

RUELLAND D., ARDOIN-BARDIN S., BILLEN G., SERVAT E.2008. Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several methods of rainfall interpolation on a large basin in West Africa. *Journal of Hydrology*. Vol. 361. Iss. 1–2 p. 96–117.

- Skhakhfa, I. D., & Ouerdachi, L. (2016). Hydrological modelling of Wadi resoul watershed, Algeria, by HEC-HMS model. *Journal of Water and Land Development*, 31(1), 139–147. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0045>
- Subramanya, K. (2013) Engineering hydrology, 4e. Tata McGraw-Hill Education.
- Scipal, K., Scheffler, C., & Wagner, W. (2005). Soil moisture-runoff relation at the catchment scale as observed with coarse resolution microwave remote sensing. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(3), 173–183.
- Strapazan, C., & Petruț, M. (2017). Application of arc hydro and HEC-HMS model techniques for runoff simulation in the headwater areas of covasna watershed (Romania). *Geographia Technica*, 12(1), 95–107. [https://doi.org/10.21163/GT\\_2017.121.10](https://doi.org/10.21163/GT_2017.121.10)
- Shaw, E. M. (1994). Hydrology in practice, VNR Int.
- Tsakiridis, P., & Hrissanthou, V. (2014). Application of a continuous rainfall-runoff model to the basin of Kosynthos River APPLICATION OF A CONTINUOUS RAINFALL-RUNOFF MODEL TO THE BASIN OF KOSYNTHOS RIVER USING THE HYDROLOGIC SOFTWARE HEC-HMS. In *Global NEST Journal* (Vol. 16, Issue 1). <https://www.researchgate.net/publication/261723178>
- Te Chow, V., Maidment, D.R., & Mays, L.W. (1988). Applied hydrology. USA: McGraw-Hill. Thompson, E.S., & de Beurs, K.M. (2018). Tracking the removal of buildings in rust belt cities with open-source geospatial data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73(October 2017), 471–481.
- United States Army Corps of Engineers (USACE) 2010. Hydrologic Modeling System HEC- HMS. User's Manual, Version 3.5. Hydrologic Engineering Center.
- Unduche, F., Tolossa, H., Senbeta, D., & Zhu, E. (2018). Evaluation of four hydrological models for operational flood forecasting in a Canadian Prairie watershed. *Hydrological Sciences Journal*, 63(8), 1133-1149.
- Yilma H, Moges SA (2007) Application of semi-distributed conceptual hydrological model for flow forecasting on upland catchments of Blue Nile River Basin, a case study of Gilgel Abbay catchment. *Catchment and Lake Research*, 200.
- Zhang GP, Savenije HG (2005) Rainfall-runoff modeling in a catchment with a complex groundwater flow system: application of the Representative Elementary Watershed (REW) approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9: 243–261.

*Activité 3.1 : Poursuite des études liées à la tempête Alex*  
*Attività 3.1 : Continuazione degli studi relativi alla tempesta Alex*

**Prodotto 3.1.3: Modellazioni idrologiche delle portate del fiume Roya in  
Francia e Italia**

# **Modellazione delle portate nella Valle della Roya**

## **D.M. Fox, M. Atiq**

**UMR ESPACE CNRS, Université Côte d'Azur**

### **Résumé**

Nei bacini fluviali di tutto il mondo, i modelli idrologici sono ampiamente utilizzati per migliorare la comprensione dei processi idrologici e la disponibilità delle risorse idriche. I modelli idrologici sono uno strumento cruciale per sviluppare strategie di adattamento al fine di valutare e prevedere la quantità d'acqua di cui disporranno i bacini fluviali a causa del cambiamento climatico. Affinché le proiezioni di portata possano essere affidabili, questi modelli devono essere correttamente calibrati e validati.

Nel bacino del fiume Roya, vicino al confine franco-italiano, la modellazione degli eventi è stata calibrata (2014) e validata utilizzando il modello idrologico HEC-HMS per due periodi di tempo (2016 e 2024). Durante le fasi di calibrazione e validazione, le simulazioni di deflusso sono state utilizzate per valutare le prestazioni del modello per ciascun sottobacino. L'efficienza di Nash-Sutcliffe (NSE) e il coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) sono stati utilizzati per valutare le prestazioni del modello. I parametri utilizzati per simulare le perdite per infiltrazione, la trasformazione del deflusso diretto sono il numero di curva SCS per le perdite, il metodo SCS Unit Hydrograph per la trasformazione e il metodo Muskingum per il routing.

Questo studio dimostra che il bacino del fiume Roya è efficacemente modellato utilizzando il modello idrologico HEC-HMS, consentendo di migliorare la valutazione e la previsione della risposta idrologica.

### **1. Introduzione**

I bacini idrografici del bacino del Mediterraneo sono soggetti a numerosi eventi estremi che possono causare perdite di vite umane e significative conseguenze economiche e sociali. La tempesta Alex del 2-3 ottobre 2020 ne è l'esempio perfetto. La geografia della regione, caratterizzata da numerose montagne circostanti, la rende particolarmente vulnerabile a eventi estremi. Inoltre, lo sviluppo lungo la costa mediterranea è aumentato a causa dell'attrattività e della crescita economica della regione.

Le forti piogge e lo scioglimento delle nevi a monte provocano inondazioni nella valle del Roia. Per gestire queste inondazioni, negli ultimi decenni le popolazioni hanno messo in atto misure come sistemi di previsione delle inondazioni e la zonizzazione delle pianure alluvionali. Queste strategie, insieme ai progressi nella modellazione informatica che consentono ai ricercatori di comprendere meglio l'impatto della pioggia sul paesaggio, hanno contribuito a ridurre i danni causati dalle inondazioni (Hipolito e Vaz, 2013).

I ricercatori utilizzano modelli da molti anni per prevedere l'impatto della pioggia su una determinata area. Recentemente, questi modelli sono stati adattati per tenere conto degli effetti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche. Anche le attività umane, come l'agricoltura, le dighe, le industrie e le città, modificano notevolmente il paesaggio, influenzando il flusso dell'acqua. Grazie alla modellazione informatica, ora possiamo non solo comprendere questi cambiamenti, ma anche prevedere i loro effetti futuri e sviluppare modi per mitigarli. In breve, la modellazione informatica è uno strumento potente ed economico per simulare future inondazioni (K, 2019).

Sono stati sviluppati numerosi modelli idrologici basati sui processi fisici, come il modello distribuito dell'Istituto di Idrologia (IHDM), il modello di gestione delle acque pluviali (SWMM), il sistema di modellazione delle precipitazioni-deflusso (PRMS), il sistema di previsione dei corsi d'acqua del National Weather Service (NWS), Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation (SSARR), Sistema Idrologico Europeo (SHE), TOPMODEL e altri (Frevert e Singh, 2006) e Džubáková (2010). Il nostro studio mira a utilizzare il modello idrologico HEC-HMS per eseguire simulazioni di modellazione pioggia-deflusso basate su eventi significativi nei bacini idrografici della valle della Roya e a determinare la portata ai punti di Breil-sur-Roya, Francia, e Airole, Italia. Il modello HEC-HMS è stato sviluppato dal Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti (USACE). In questo lavoro, abbiamo utilizzato questo approccio in quanto è stato utilizzato con successo negli ultimi anni per prevedere il deflusso delle piogge in molte regioni del mondo. Ad esempio, Oleyiblo e Li (2009) hanno convalidato modelli per due bacini idrografici cinesi. Chu e Steinman (2009) hanno utilizzato un'analisi combinata continua ed eventuale per un bacino idrografico del Michigan, negli Stati Uniti. Halwatura e Najim (2013) hanno validato un modello pioggia-deflusso per un bacino dello Sri Lanka, e Unduche et al. (2018) hanno scoperto che il modello poteva essere utilizzato per prevedere le inondazioni in Canada. L'obiettivo di questo studio è modellare eventi significativi nella Valle della Roya per valutare il potenziale del modello HEC-HMS nel simulare le portate di punta.

## **2. Metodologia**

La modellazione idrologica mira a stimare gli idrogrammi di portata a partire dai bacini idrografici, e i risultati possono poi essere utilizzati come input per una possibile modellazione idraulica. La figura 1 mostra i metodi utilizzati per questa analisi di modellazione idrologica.

HEC-HMS fornisce approcci per stimare la portata base, convertire le precipitazioni in eccesso e calcolare le perdite idrologiche. La parte successiva dettaglia la configurazione del modello HEC-HMS. Il modello idrologico è stato verificato e calibrato in una seconda fase. L'efficienza del modello di Nash-Sutcliffe (NSE) e il coefficiente  $R^2$  sono stati utilizzati per valutare l'efficacia della calibrazione.

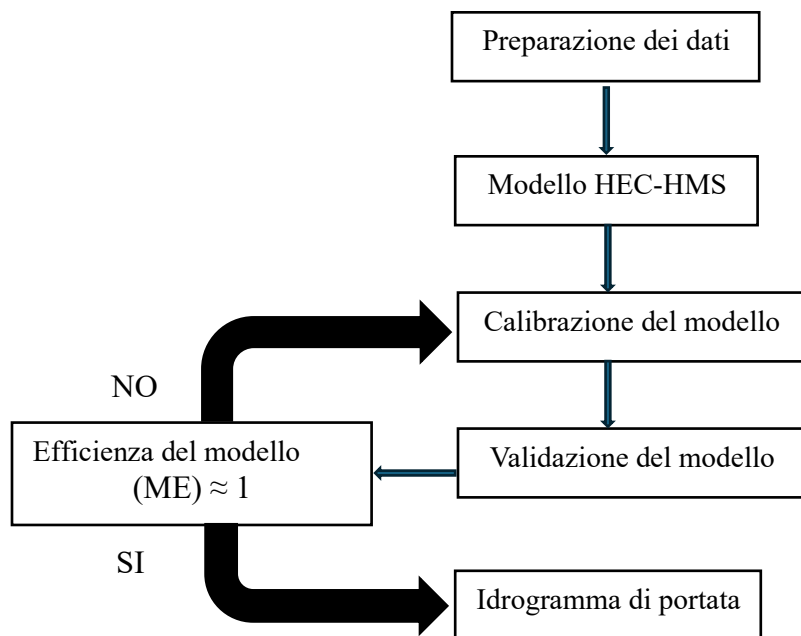
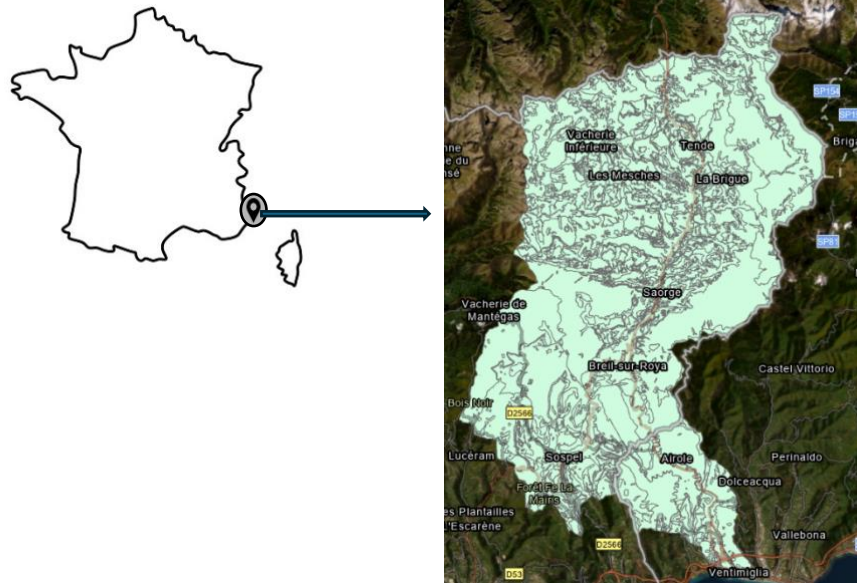


Figura 1: Diagramma di flusso che mostra la metodologia di lavoro di questo studio

## 2.1 Area di studio

La valle del Roia si trova al confine franco-italiano. Il fiume Roya nasce in Francia al colle di Tenda e sfocia nel Mar Mediterraneo a Ventimiglia, in Italia. La superficie del bacino idrografico è di 670 km<sup>2</sup> con una lunghezza del fiume di 60 km secondo Piton et al. (2024). La superficie del bacino idrografico in Francia è di 394 km<sup>2</sup>, con una lunghezza del fiume di 44 km. La pianura alluvionale ha un clima mediterraneo con una temperatura media annuale di 14,5 °C e precipitazioni di 791 mm secondo Vidal et al. (2010). Il bacino idrografico comprende due stazioni fluviometriche, a Breil-sur-Roya in Francia (a monte) e ad Airole in Italia (a valle), oltre a otto pluviometri distribuiti su tutto il bacino.

Il Roia e i suoi affluenti attraversano pendii ripidi e valli strette. Le valli di alcuni bacini glaciali sono leggermente più ampie delle gole profonde che le separano. L'alveo principale presenta forti pendenze: tra l'1,3% e il 5,1% per 20 km, tra l'1% e il 2% negli ultimi 20 km prima del confine, e oltre il 5% nella parte più alta del corso della Roya, a monte di Vievola secondo l'ONF-RTM et al. (2022). Le piene si propagano rapidamente a causa delle forti pendenze, in particolare nella parte alta della valle secondo BRGM-SCP (2006). Lo Shapefile della Francia proviene dal sito web (<https://www.istockphoto.com/fr/illustrations/france>) come mostrato in Figura 2.



*Figura 2: L'area di studio della Valle del Roya*

## 2.2 Dati

Per stimare la modellazione pioggia-scorrimento e diversi parametri idrologici, sono state utilizzate diverse fonti di dati, tra cui modelli digitali del terreno (DTM), dati pluviometrici, misure idro-morfologiche e dati di telerilevamento (Scipal et al., 2005; Milzow et al., 2009). Per creare un modello idrologico per l'analisi del bacino fluviale, i dati disponibili per la modellazione pioggia-scorrimento, come le precipitazioni, le caratteristiche topografiche, l'uso del suolo e i parametri di rugosità, sono stati raccolti, elaborati e integrati in un Sistema Informativo Geografico (GIS). Le caratteristiche topografiche del bacino fluviale sono state estratte da un modello digitale del terreno a risoluzione di 30 metri ottenuto dal sito web ASTER DEM. I dati sull'uso del suolo a una risoluzione di 100 metri sono stati acquisiti dal sito web Corine Land Cover di Copernicus. A causa della pendenza della zona, la maggior parte della zona di studio rientra nelle categorie di suolo C e D. Di conseguenza, i dati sul suolo provenienti dal Global Hydrological Soil Group sono stati aggiornati per adattarsi alle caratteristiche del bacino fluviale.

Il modello è stato calibrato utilizzando dati pluviometrici evento del periodo dal 1° novembre al 15 dicembre 2014 e validato utilizzando dati del periodo dal 1° novembre al 31 dicembre 2016 e dal 15 febbraio al 30 aprile 2024. I dati pluviometrici giornalieri sono stati recuperati dal sito web SAFRAN. Poiché lo scioglimento della neve e le precipitazioni sono le principali fonti d'acqua della regione, il volume totale delle precipitazioni che contribuiscono al flusso del bacino fluviale è stato modellato utilizzando la somma di questi due parametri. Ci sono due punti di misurazione del flusso: Breil-sur-Roya (43°54'42"N, 7°31'E), vicino al confine francese, dove i dati sono stati estratti dal sito web Hydroportail, e Airole, sul lato italiano, dove i dati sono stati estratti dalla stazione pluviometrica di Airole (43°52'23"N, 7°32'41"E).

## 2.3 Preparazione dei dati per la modellazione idrologica

### 2.3.1 Utilizzo del suolo (LULC)

Le mappe di copertura del suolo della Roya per l'anno più recente, il 2018, sono state scaricate a una risoluzione di 100 m dal sito web Copernicus. È stata creata una nuova serie di classi unendo le 25 classi CLC inizialmente incluse nelle mappe. Sono state create sei nuove categorie: aree urbane, foreste, terreni agricoli, suoli nudi, masse d'acqua e praterie/arbusti, come mostrato in figura 3. Successivamente, a ciascuna categoria di uso del suolo è stato assegnato un valore di CN.



Mappa di Copertura del Suolo

Categoria di Uso del Suolo	CN
Foresta	74
Terreno Agricolo	79
Prati e Arbusteti	80
Area Urbana	88
Terreno Arido	94
Corpi Idrici	100

Numero della Curva Assegnato

Figura 3: Mappa di uso e copertura del suolo e numero della curva assegnato, CN

### 2.3.2 Raggruppamenti idrologici dei suoli

Il sito web del Global Hydrological Soil Group fornisce dati sui suoli e, sulla base di questi dati, il nostro bacino idrografico è classificato in cinque categorie: B, C, D, B/D e C/D. Tuttavia, a causa della forte pendenza e della mappa di copertura del suolo del nostro bacino idrografico, abbiamo stimato che le nostre categorie di suoli rientrano solo nelle categorie C e D, come mostrato in figura 4, e hanno valori di numero di curva di runoff (CN) elevati.

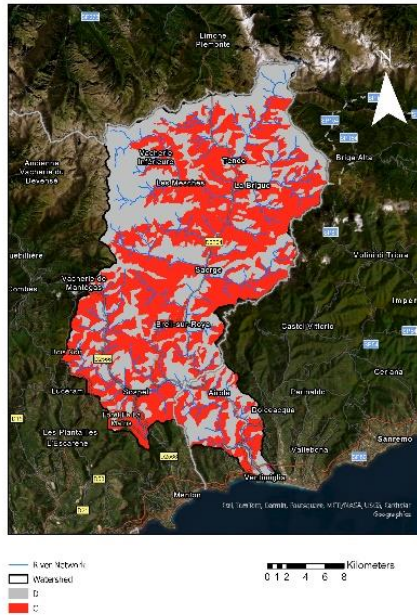
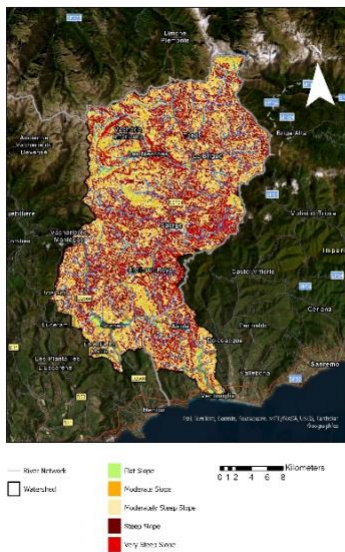


Figura 4: La mappa del suolo dell'area di studio

### 2.3.3 Pendenza

La pendenza è stata calcolata utilizzando un modello digitale del terreno e varia da 0° a 73°. Le pendenze sono state divise in cinque gruppi: pendenza pianeggiante, pendenza moderata, pendenza moderatamente ripida, pendenza ripida e pendenza molto ripida, come mostrato in Figura 5. Il coefficiente di pendenza è stato quindi applicato ai valori di CN inizialmente assegnati in base all'uso del suolo e alle caratteristiche pedologiche.



Mappa della Pendenza

Categoria di Pendenza	Intervallo di Pendenza (Gradi)	Coefficiente di Pendenza
Pendenza Piatta	$0 \geq 10$	0.9
Pendenza Moderata	$10 \geq 20$	0.95
Pendenza Moderatamente Ripida	$20 \geq 30$	1
Pendenza Ripida	$30 \geq 40$	1.05
Pendenza Molto Ripida	$40 \geq 73$	1.10

Coefficiente di Pendenza Assegnato

Figura 5: Mappa della pendenza con coefficiente di pendenza associato

### 2.3.4 Valori finali di CN

Nel nostro bacino idrografico, i calcoli descritti sopra forniscono valori di CN compresi tra 66,6 e 100, come mostrato in Figura 6.

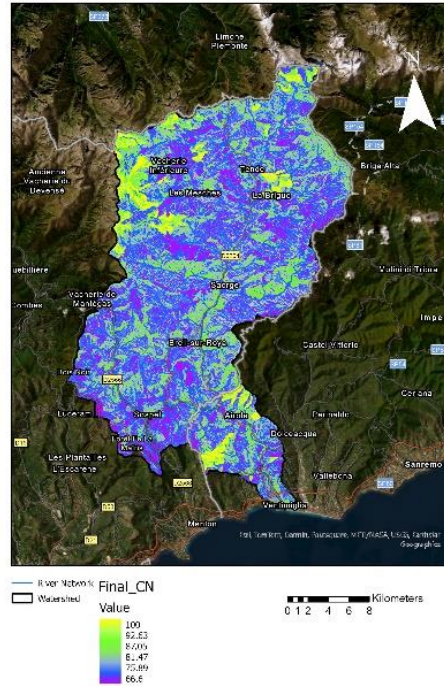


Figura 6: Il numero finale della curva del nostro bacino

## 2.4 Configurazione del modello HEC-HMS

### 2.4.1 Funzione di perdita - Metodo SCS

È importante distinguere il deflusso di base dal deflusso diretto per stimare le precipitazioni effettive. Il primo passo consiste nel scegliere una tecnica di separazione del deflusso di base. Qui, viene applicata la tecnica della base fissa di Chow et al. (1988). Questo metodo consente di collegare il deflusso di base all'inizio dell'evento al tempo di picco di piena; quindi, di estenderlo fino al momento in cui inizia la recessione. Tracciando i dati di portata logaritmica, che mostrano una tendenza lineare durante il periodo di recessione, è possibile determinare questo punto di flesso Shaw, (1994). Il volume di pioggia effettivo si ottiene integrando l'idrogramma di deflusso e viene quindi distribuito ad ogni passo temporale selezionando una funzione di perdita. Questo metodo consente di stimare un idrogramma che corrisponde al deflusso diretto osservato e di determinare il parametro del metodo di perdita in modo iniziale. La seguente formula viene utilizzata per calcolare le precipitazioni effettive.

$$Pe=(P-Ia)^2/(P-Ia+S)$$

Dove Pe è l'eccesso di precipitazioni al tempo t, P è la profondità cumulativa delle precipitazioni al tempo t e Ia è l'astrazione iniziale, nota anche come perdita iniziale;  $Ia = 0.2S$  dove  $S = (25400 -$

$254 \cdot CN / CN$  che è generalmente definito come la ritenzione massima possibile del bacino idrografico. Per i suoli ad alto tasso di infiltrazione, il valore di CN è basso e tende a 0, per le superfici impermeabili, è di 100. Come menzionato da Subramanya (2008), che raccomanda  $I_a \approx 0,3S$  nei contesti indiani, questo parametro può essere regolato in base ai fatti locali. I valori di CN sono calcolati su scala di sotto bacino idrografico.

#### **2.4.2 Trasformazione - Tempo di risposta**

Dopo un breve periodo di intensa pioggia su un bacino idrografico, c'è un ritardo prima che il deflusso raggiunga il suo picco. Questo ritardo è una proprietà del bacino idrografico che descrive il suo tempo di risposta (Kent, 1972). Il tempo di concentrazione del bacino deve essere determinato prima che il tempo di risposta possa essere determinato (Nasri et al., 2011). La formula di Kirpich-Ramser (Mckenroe & Zhao, 1999) è stata utilizzata per calcolare il tempo di concentrazione. HEC-HMS calcola automaticamente il tempo di risposta per ogni sotto-bacino.

$$T_c = 0.0195[(L/S^{0.5})^{0.77}]$$

$T_c$ : Minuti,  $L$ : Lunghezza del percorso di deflusso più lungo (m),  $S$ : Pendenza del corso d'acqua (m/m)

#### **2.4.3 Metodo di routing - Metodo di Muskingum**

I due parametri del metodo di Muskingum per il routing idrologico,  $K$  e  $x$ , sono importanti. Il parametro  $K$  rappresenta la parte di traslazione o concentrazione dell'operazione di routing, mentre il parametro  $x$  rappresenta la parte di immagazzinamento. Nel nostro bacino idrografico, utilizziamo  $K = 0,8$  e  $x = 0,3$ .

#### **2.4.4 Suddivisione dei bacini idrografici per la modellazione**

Il bacino idrografico è stato diviso in sotto-bacini più piccoli per migliorare le prestazioni della modellazione e consentire al modello di funzionare come un modello semi-distribuito, come mostrato in figura 7.

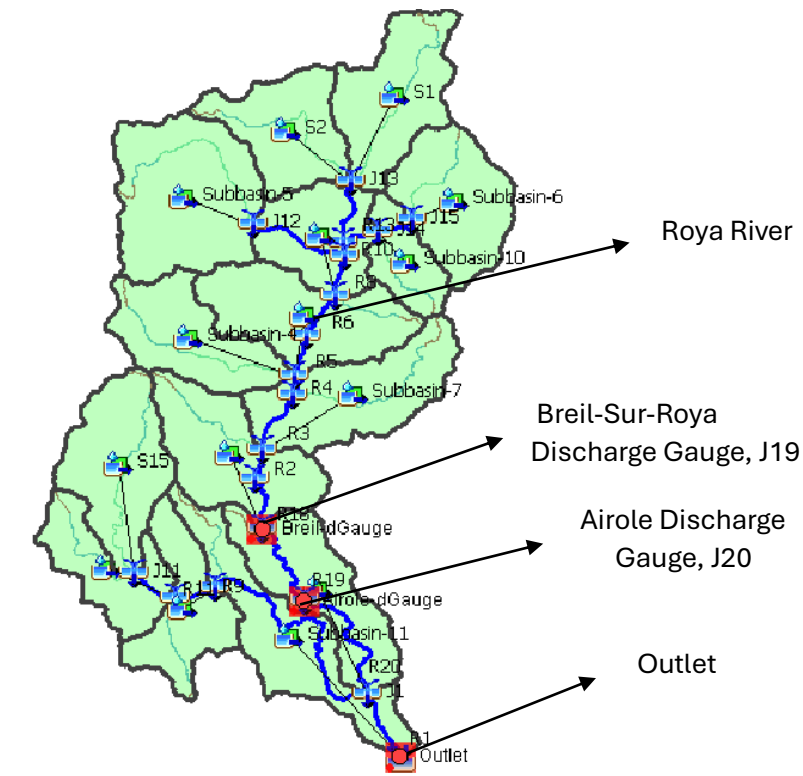


Figura 7: Suddivisione del bacino

### 3. Risultati

#### 3.1 Calibrazione e validazione del modello

L'efficacia di un modello idrologico di bacino dipende dalla qualità della sua calibrazione, determinata sia dalle capacità tecniche del modello che dalla qualità dei dati in ingresso. Per simulazioni di eventi, il modello di bacino HEC-HMS confronta i tempi degli idrogrammi, i valori di picco di portata e i volumi di deflusso tra la simulazione e le osservazioni. In questo studio è stata utilizzata una combinazione di approcci di calibrazione automatica e manuale. Per trovare i valori ottimali dei parametri che meglio corrispondono ai volumi di deflusso simulati e osservati, è stato utilizzato un processo di calibrazione automatica noto come "ottimizzazione per tentativi" in HEC-HMS, come descritto da Ruelland et al. (2008). I risultati generati dal modello idrologico corrispondevano strettamente agli idrogrammi osservati. La figura 8 confronta le portate simulate e osservate lungo una serie temporale per il periodo di calibrazione, dal 1° novembre al 15 dicembre 2014. Come osservato nelle misure di portata, il modello tendeva a sovrastimare il deflusso. Tuttavia, i valori di picco di portata più elevati corrispondevano bene ai picchi simulati. Successivamente, calibrando il modello, il suo picco di portata è diventato significativamente inferiore, come mostrato in Figura 8. La Tabella 1 fornisce i dettagli sui parametri HEC-HMS calibrati per questo periodo.

Gli indici di prestazione sono descritti nella sezione

### 3.1.1 Calibrazione (1° novembre - 15 dicembre 2014)

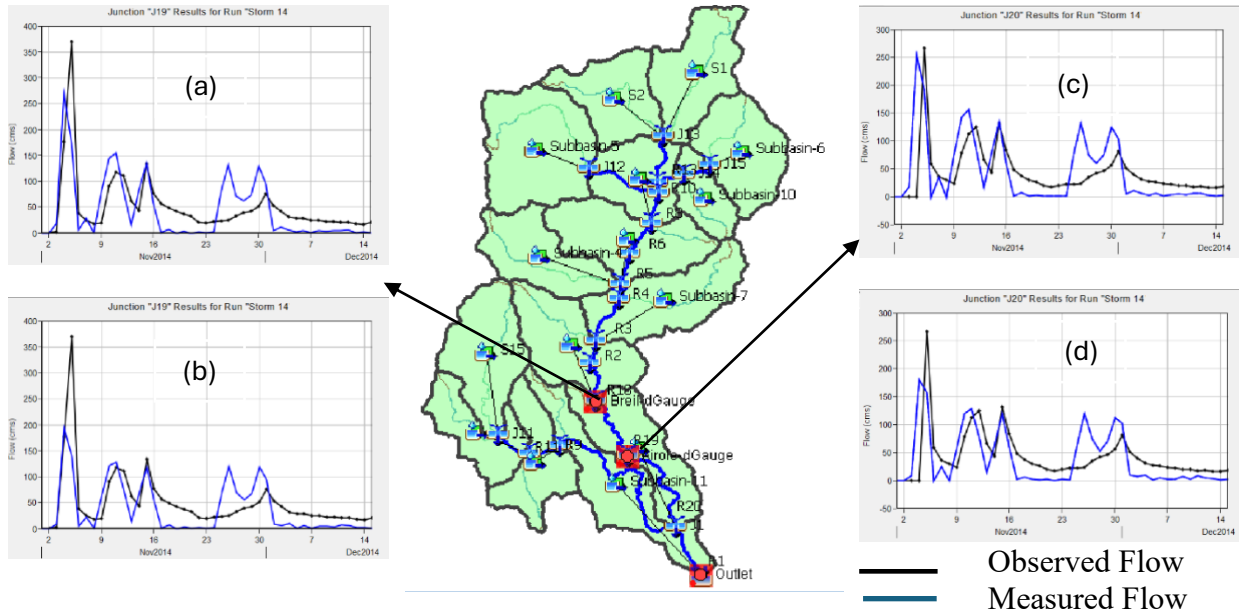


Figura 8: Calibrazione 2014 (a) Scarica Breil prima (b) dopo, (c) Scarica Airole prima (d) dopo

Tabella 1: Dati originali e di calibrazione per il 2014

Muskingum, K (hr.) and X					CN			Astrazione iniziale, Ia (mm)	
Tratti	Original		Calibrato		Subbacino	Original	Calibrato	Original	Calibrato
	K	X	K	X				Ia = 0.2S	
R1	0.8	0.3	1	0.5	S1	77.7	58.7	14.6	14.2
R2	0.8	0.3	1	0.5	S2	77.6	58.6	14.7	14.5
R3	0.8	0.3	1	0.5	S3	76.9	57.9	15.3	15.1
R4	0.8	0.3	1	0.5	S4	77.7	58.7	14.6	14.2
R5	0.8	0.3	1	0.5	S5	80.9	61.9	12	11.8
R6	0.8	0.3	1	0.5	S6	77.4	58.4	14.8	14.6
R7	0.8	0.3	1	0.5	S7	77.6	58.6	14.7	5
R8	0.8	0.3	1	0.5	S8	78.5	59.5	13.9	13.7
R9	0.8	0.3	1	0.5	S9	76.8	57.8	15.3	15.1
R10	0.8	0.3	1	0.5	S10	77.6	58.6	14.7	14.5
R11	0.8	0.3	1	0.5	S11	76.5	57.5	15.6	15.4
R12	0.8	0.3	1	0.5	S12	74.5	55.5	17.4	17.2
R13	0.8	0.3	1	0.5	S13	73.2	54.2	18.6	18.4
R14	0.8	0.3	1	0.5	S14	77.9	58.9	14.4	114.2
R15	0.8	0.3	1	0.5	S15	77.7	58.7	14.6	14.2
R18	0.8	0.3	1	0.5					
R19	0.8	0.3	1	0.5					
R20	0.8	0.3	1	0.5					

### 3.1.2 Validazione (1 novembre - 30 dicembre 2016)

Il modello è stato addestrato utilizzando i dati del 2014, successivamente sono stati applicati i parametri calibrati a due periodi distinti (2016 e 2024) per validarne le prestazioni. Le figure 9 e 10 illustrano i risultati di questo processo di validazione, mentre le tabelle 2 e 3 forniscono ulteriori informazioni.

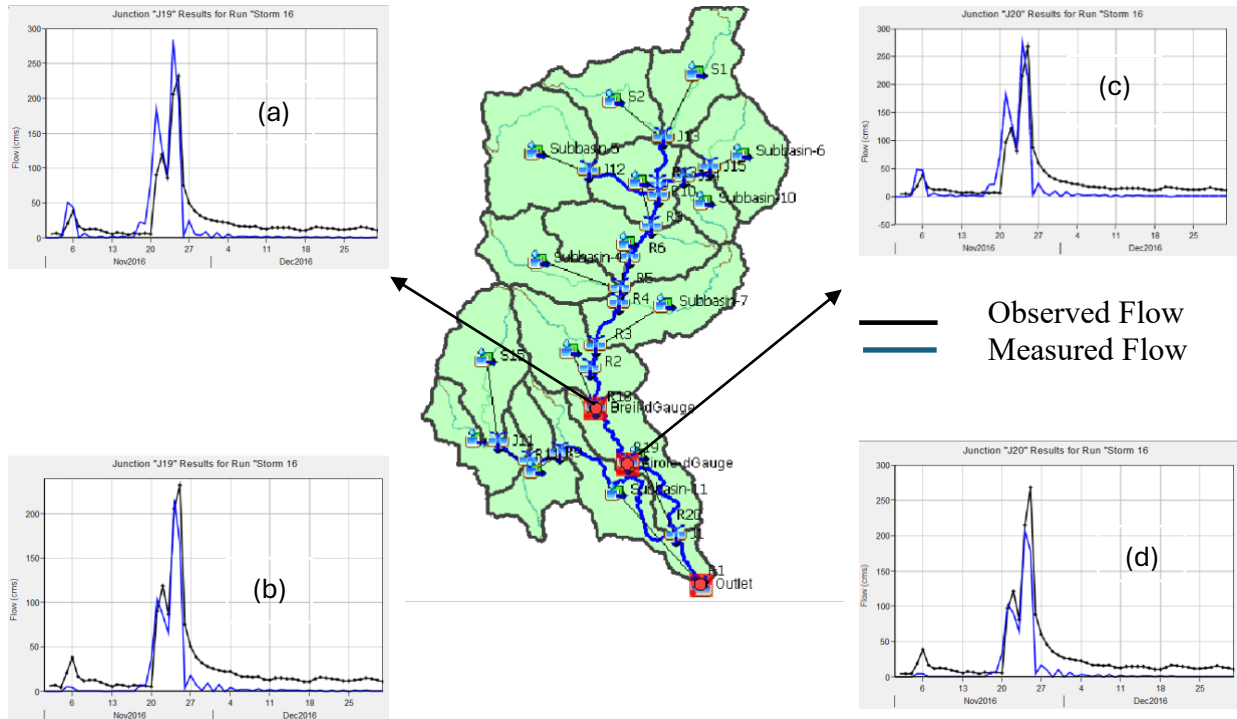


Figura 9: Validazione 2016 (a) Scarica Breil prima (b) dopo, (c) Scarica Airole prima (d) dopo

Tabella 2: Dati originali e di calibrazione per il 2016

Muskingum, K (hr.) and X					Numero della Curva		
Tratti	Original		Calibrato		Subbacino	Original	Calibrato
	K	X	K	x			
R1	0.8	0.3	0.9	0.4	S1	77.7	52.7
R2	0.8	0.3	0.9	0.4	S2	77.6	52.6
R3	0.8	0.3	0.9	0.4	S3	76.9	51.9
R4	0.8	0.3	0.9	0.4	S4	77.7	52.7
R5	0.8	0.3	0.9	0.4	S5	80.9	55.9
R6	0.8	0.3	0.9	0.4	S6	77.4	52.4
R7	0.8	0.3	0.9	0.4	S7	77.6	52.6
R8	0.8	0.3	0.9	0.4	S8	78.5	53.5
R9	0.8	0.3	0.9	0.4	S9	76.8	51.8
R10	0.8	0.3	0.9	0.4	S10	77.6	52.6
R11	0.8	0.3	0.9	0.4	S11	76.5	51.5
R12	0.8	0.3	0.9	0.4	S12	74.5	49.5
R13	0.8	0.3	0.9	0.4	S13	73.2	48.2
R14	0.8	0.3	0.9	0.4	S14	77.9	52.9
R15	0.8	0.3	0.9	0.4	S15	77.7	52.7
R18	0.8	0.3	0.9	0.4			
R19	0.8	0.3	0.9	0.4			
R20	0.8	0.3	0.9	0.4			

### 3.1.3 Calibrazione (15 febbraio - 30 aprile 2024)

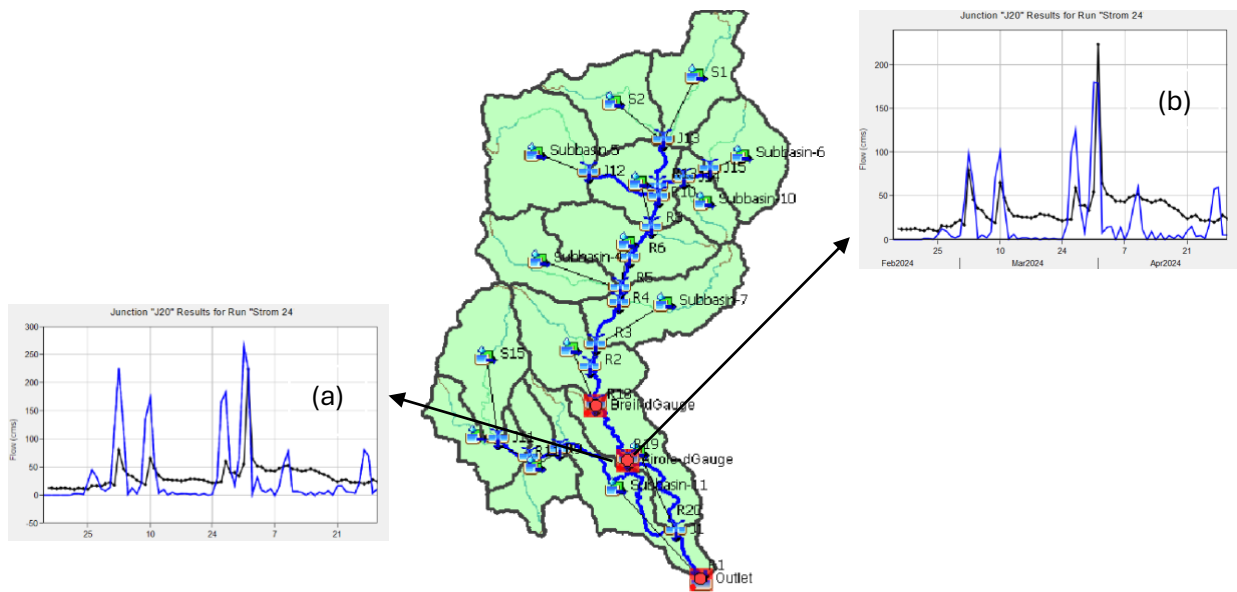


Figura 10: Validazione 2024 (a) Scarica Airole prima (b) dopo

Tabella 3: Dati originali e di calibrazione per il 2024

Subbacino	Numero della Curva, CN		Muskingum, K (hr.)		
	Original	Calibrato	Tratti	Original	Calibrato
S1	77.7	39.7	R1	0.8	1
S2	77.6	39.6	R2	0.8	1
S3	76.9	38.9	R3	0.8	1
S4	77.7	39.7	R4	0.8	1
S5	80.9	42.9	R5	0.8	1
S6	77.4	39.4	R6	0.8	1
S7	77.6	39.6	R7	0.8	1
S8	78.5	40.5	R8	0.8	1
S9	76.8	38.8	R9	0.8	1
S10	77.6	39.6	R10	0.8	1
S11	76.5	38.5	R11	0.8	1
S12	74.5	36.5	R12	0.8	1
S13	73.2	35.2	R13	0.8	1
S14	77.9	39.9	R14	0.8	1
S15	77.7	39.7	R15	0.8	1
			R18	0.8	1
			R19	0.8	1
			R20	0.8	1

### 3.2 Valutazione del modello

I valori di NSE sono riassunti nella Tabella 5, mentre i risultati di  $R^2$  sono presentati in modo più dettagliato nelle Figure 11, 12, 13 e nella Tabella 4. I periodi di calibrazione e validazione (1 novembre - 15 dicembre 2014; 1 novembre - 31 dicembre 2016) sono illustrati da grafici che confrontano i flussi osservati e quelli simulati dal modello.

### 3.2.1 Risultato R2

#### 3.2.1.1 Calibrazione 2014

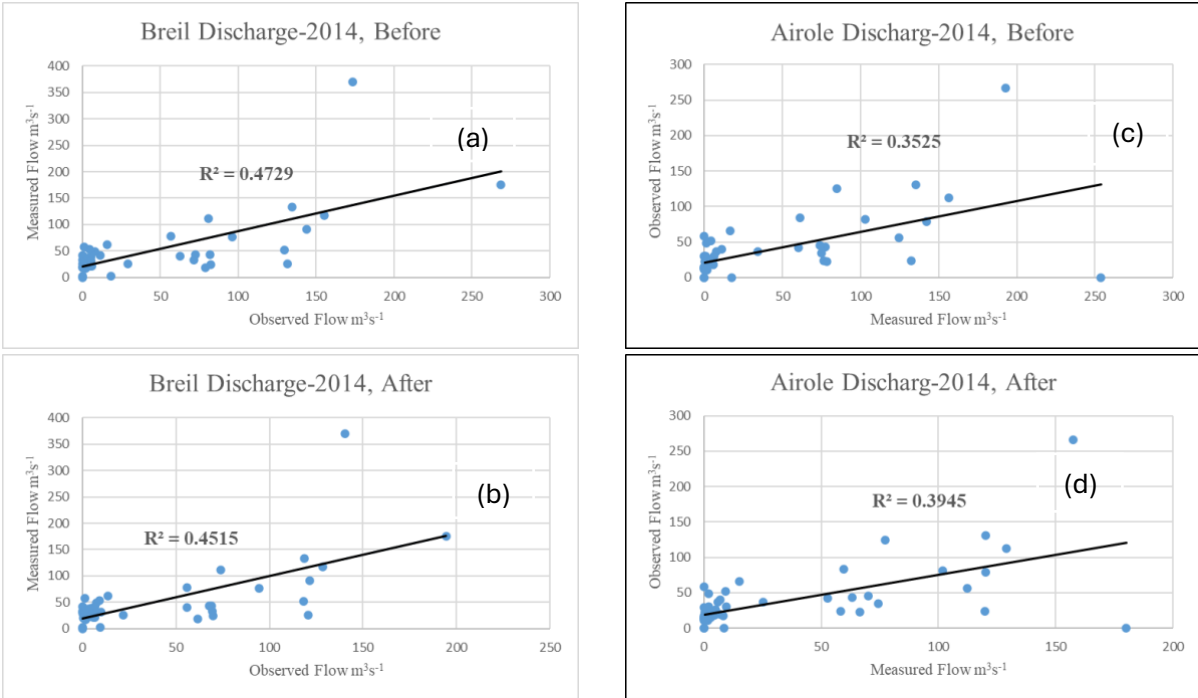


Figura 11: R2 2014 (a) Scarica Breil prima (b) dopo (c) Scarica Airole prima (d) dopo

#### 3.2.1.2 Validazione 2016

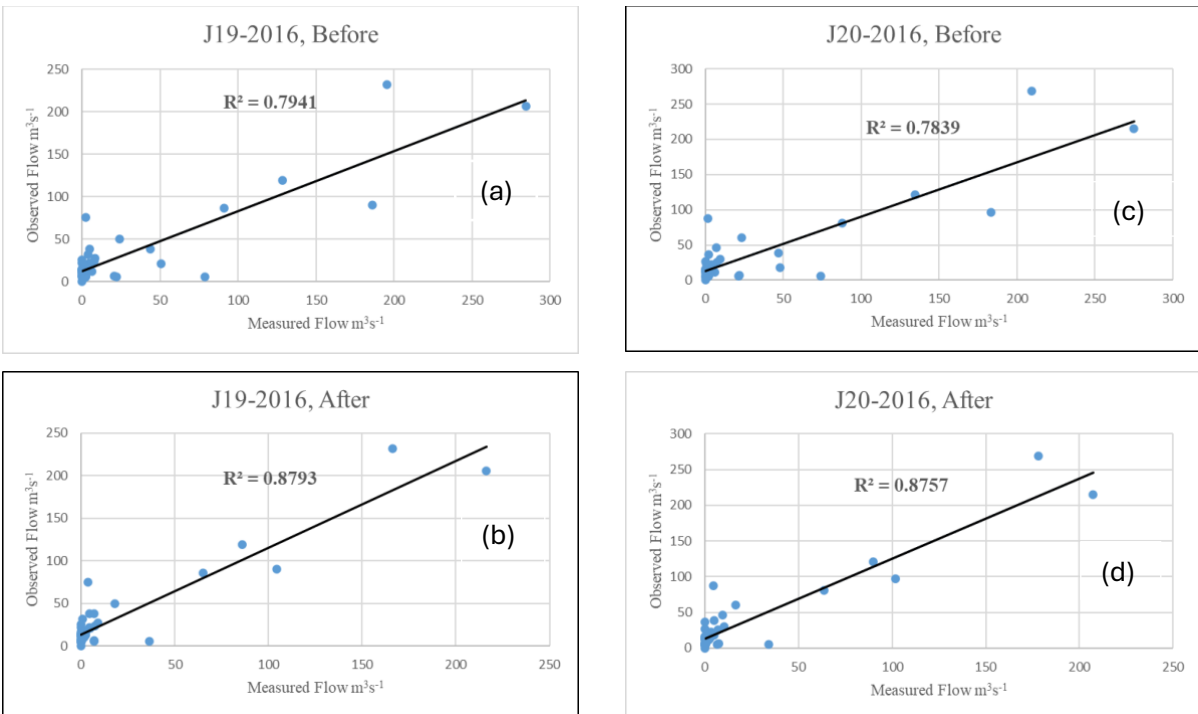


Figura 12: R2 2016 (a) Scarica Breil prima (b) dopo (c) Scarica Airole prima (d) dopo

### 3.2.1.3 Validazione 2024

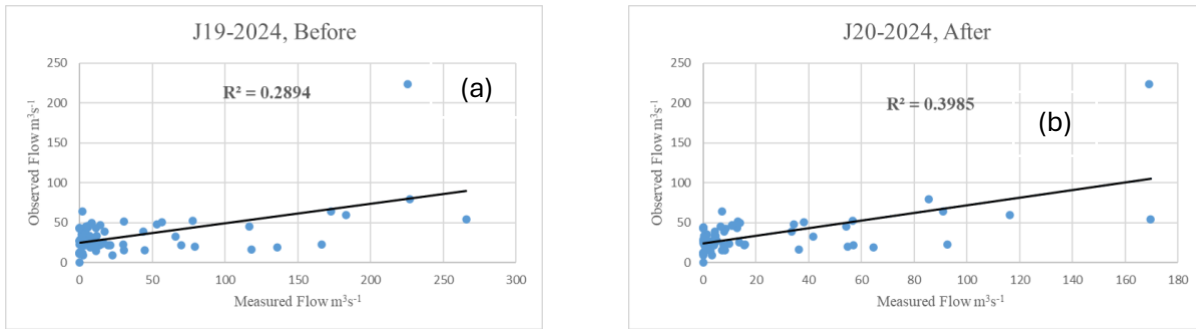


Figura 13: R2 (a) Scarica Airole prima (b) dopo

### 3.2.2 Risultato complessivo R<sup>2</sup> e NSE

I metodi di valutazione delle previsioni indicano che le prestazioni del nostro modello, utilizzando i dati delle fasi di calibrazione e validazione, rientrano nell'intervallo "Soddisfacente a Molto Buono", ad eccezione del 2024 che risulta insoddisfacente. Le Tabelle 4 e 5 riassumono i valori di R<sup>2</sup> e NSE, indicando buoni risultati per la validazione del 2016 ma una performance mediocre per il 2024. Sono necessari ulteriori test su un numero maggiore di eventi per determinare se questo errore sia legato ai dati di quell'evento specifico o se la modellazione rimanga molto variabile a seconda degli eventi.

Tabella 4: Risultati di calibrazione e validazione R2

Calibrazione			Validazione			
2014			2016		2024	
Giunzioni	Prima	Dopo	Prima	Dopo	Prima	Dopo
	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
J19, Breil	0.4	0.5	0.8	0.9		
J20, Airole	0.2	0.3	0.8	0.9	0.3	0.4

Tabella 5: Risultati NSE per calibrazione e validazione

Calibrazione			Validazione			
2014			2016		2024	
Giunzioni	Prima	Dopo	Prima	Dopo	Prima	Dopo
	NSE	NSE	NSE	NSE	NSE	NSE
J19, Breil	0.3	0.4	0.6	0.8		
J20, Airole	-0.4	0.03	0.7	0.8	-2.6	-0.4

#### 4. Conclusione

Ogni bacino idrografico è stato sottoposto a calibrazione e validazione utilizzando il modello idrologico HEC-HMS. I fattori che hanno mostrato la maggiore sensibilità nella simulazione del deflusso sono risultati essere i coefficienti di Muskingum e il parametro CN del metodo SCS. Altri autori hanno osservato una simile sensibilità in studi precedenti, come quello di Gebre (2015) sul bacino del Dale Hollow nel bacino del Cumberland River negli Stati Uniti. L'applicabilità del modello a diversi bacini è stata valutata utilizzando indicatori di performance come il coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) e l'efficienza di Nash-Sutcliffe (NSE).

Breil-sur-Roya e Airole sono le due stazioni dove il modello ha previsto con maggiore accuratezza la portata giornaliera dei corsi d'acqua, sebbene siano state osservate alcune lievi sovrastime e sottostime dei picchi di portata.

Questo studio conferma che il modello HEC-HMS può essere applicato ad altri bacini idrografici con caratteristiche idrometeorologiche e di uso del suolo simili e può essere utilizzato per simulare e stimare gli impatti futuri dei cambiamenti climatici sul deflusso nel bacino della Roya.

#### 5. Riferimenti

- Adamovic, M., Branger, F., Braud, I., & Kralisch, S. (2016). Development of a data-driven semi-distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods. *Journal of Hydrology*, 541, 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.032>
- Angelidis P., Mystakidis G., Lalikidou S., Hrisanthou V. and Kotsovinos N. (2010), Computation of Hydrographs in Evros River Basin, *European Water*, **31**: 33-42.
- BRGM-SCP, 2006. Faisabilité de la mise en place d'un système d'annonce des crues sur la Roya. In: PIC INTERREG III A 2000-2006 ALCOTRA : EUROBASSIN.
- Chu, X. and Steinman, A., 2009. Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1), pp.119-124.
- Džubáková K. (2010), rainfall-Runoff Modelling: Its Development, Classification and Possible Applications. *Acta Geographica Universitatis Comenianae*, Vol. 54, No. 2, pp. 173-181.
- Fox, D. M., Youssaf, Z., Adnès, C., & Delestre, O. (2019). Relating imperviousness to building growth and developed area in order to model the impact of peri-urbanization on runoff in a Mediterranean catchment (1964-2014). *Journal of Land Use Science*, 14(3), 210–224. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2019.1681528>
- Frevert, D.K., Singh V. (eds.) 2006. Watershed Models. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 653 p., ISBN 0-8493-3609-0.
- Gebre, S. L. (2015). Application of the HEC-HMS Model for Runoff Simulation of Upper Blue Nile River Basin. *Journal of Waste Water Treatment & Analysis*, 06(02). <https://doi.org/10.4172/2157-7587.1000199>
- Guta, H. (2021). *Application of HEC-HMS for rainfall-runoff modelling in Mozambique and France*. null-null. <https://doi.org/10.3311/floodrisk2020.18.9>
- Global Hydrologic Soil group :  
([https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global\\_Hydrologic\\_Soil\\_Group.html](https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global_Hydrologic_Soil_Group.html))

- Hipólito ,J. R and Vaz, A.C. (2012) Hidrologia e Recursos Hídricos, IST Press.
- Halwatura D. Najim M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical. *Environmental Modelling. & Software*. Volume 46: pp. 55-162.
- K, M. I. (2019). Hydrological Modeling of Upper Indus Basin Using HEC -HMS. *JOURNAL OF MECHANICS OF CONTINUA AND MATHEMATICAL SCIENCES*, 14(3).  
<https://doi.org/10.26782/jmcms.2019.06.00020>
- Kent K. 1972. Travel Time, Time of Concentration and Lag. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 15.
- Mcenroe, B. M., & Zhao, H. (1999). *LAG TIMES AND PEAK COEFFICIENTS FOR RURAL WATERSHEDS IN KANSAS*.
- Milzow, C., Kgotlhang, L., Kinzelbach, W., Meier, P., & Bauer-Gottwein, P. (2009). The role of remote sensing in hydrological modelling of the Okavango Delta, Botswana. *Journal of environmental management* , 90 (7), 2252-2260.
- Maidment, D.R. (1993). Handbook of hydrology. McGraw-Hill.
- Nasri M., Soleimani Sardoo F. and Katani M. 2011. Simulation of the Rainfall-Runoff Process Using of HEC-HMS Hydrological Model (A Case Study of Sheikh Bahaei Dam Basin). World Academy of Science, Engineering and Technology 78.
- Oleyiblo J., Li Z. (2009). Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. *Water Science and Engineering*. 3(1):14-22.
- ONF-RTM, ONF-DRN, INRAE-ETNA, 2022a. Retour d'exp' erience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vall' ee de la Roya - Volet torrentiel (No. V1). In: Direction D' epartementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06), Nice (France). <https://doi.org/10.57745/B69M2O>, 275 pp. +922 appendixes [online]. (last visited 10/31/2023).
- Piton, G., Cohen, M., Flipo, M., Nowak, M., Chapuis, M., Melun, G., Robert, Y., Andréis, N., & Liebault, 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.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108981>
- Romali, N. S., Yusop, Z., & Ismail, A. Z. (2018). Hydrological Modelling using HEC-HMS for Flood Risk Assessment of Segamat Town, Malaysia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 318(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/318/1/012029>
- RUELLAND D., ARDOIN-BARDIN S., BILLEN G., SERVAT E.2008. Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several methods of rainfall interpolation on a large basin in West Africa. *Journal of Hydrology*. Vol. 361. Iss. 1–2 p. 96–117.
- Skhakhfa, I. D., & Ouerdachi, L. (2016). Hydrological modelling of Wadi ressoul watershed, Algeria, by HEC-HMS model. *Journal of Water and Land Development*, 31(1), 139–147. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0045>
- Subramanya, K. (2013) Engineering hydrology, 4e. Tata McGraw-Hill Education.
- Scipal, K., Scheffler, C., & Wagner, W. (2005). Soil moisture-runoff relation at the catchment scale as observed with coarse resolution microwave remote sensing. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(3), 173-183.

- Strapazan, C., & Petruț, M. (2017). Application of arc hydro and HEC-HMS model techniques for runoff simulation in the headwater areas of covasna watershed (Romania). *Geographia Technica*, 12(1), 95–107. [https://doi.org/10.21163/GT\\_2017.121.10](https://doi.org/10.21163/GT_2017.121.10)
- Shaw, E. M. (1994). *Hydrology in practice*, VNR Int.
- Tsakiridis, P., & Hrissanthou, V. (2014). Application of a continuous rainfall-runoff model to the basin of Kosynthos River APPLICATION OF A CONTINUOUS RAINFALL-RUNOFF MODEL TO THE BASIN OF KOSYNTHOS RIVER USING THE HYDROLOGIC SOFTWARE HEC-HMS. In *Global NEST Journal* (Vol. 16, Issue 1). <https://www.researchgate.net/publication/261723178>
- Te Chow, V., Maidment, D.R., & Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. USA: McGraw-Hill. Thompson, E.S., & de Beurs, K.M. (2018). Tracking the removal of buildings in rust belt cities with open-source geospatial data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73(October 2017), 471–481.
- United States Army Corps of Engineers (USACE) 2010. *Hydrologic Modeling System HEC- HMS. User's Manual, Version 3.5*. Hydrologic Engineering Center.
- Unduche, F., Tolossa, H., Senbeta, D., & Zhu, E. (2018). Evaluation of four hydrological models for operational flood forecasting in a Canadian Prairie watershed. *Hydrological Sciences Journal*, 63(8), 1133-1149.
- Yilma H, Moges SA (2007) Application of semi-distributed conceptual hydrological model for flow forecasting on upland catchments of Blue Nile River Basin, a case study of Gilgel Abbay catchment. *Catchment and Lake Research*, 200.
- Zhang GP, Savenije HG (2005) Rainfall-runoff modeling in a catchment with a complex groundwater flow system: application of the Representative Elementary Watershed (REW) approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9: 243–261.