

Schéma directeur de gestion globale du Rancure et ses affluents (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

RAPPORT D'ETUDE

Octobre 2025

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr

Schéma directeur de gestion globale du Rancure et ses affluents

Plan de gestion de l'espace alluvial

Phase 1 : Diagnostic

Commanditaire : Syndicat Mixte Asse Bléone (SMAB)

Auteur(e)s : Florent Baby, David Criado, Marie Malascrabes

Responsable du rapport

Florent BABY – Département Risques Naturels – Groupe Risques Inondations et Littoraux
Tél. : +33(0)6 58 75 03 06
Courrier : florent.baby@cerema.fr
Direction Territoriale Méditerranée – 30 avenue Albert Einstein – CS 13593 Aix en Provence Cedex 3

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
Version 1	10/2025	Première version complète du rapport transmise au SMAB
Version 2	01/2026	Prise en compte des remarques du SMAB
Version 3	06/2026	Version définitive du rapport

Références

N° Affaire NOVA : 24-ME_0399

N° Chrono : RN/26-062

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
Florent Baby	Cerema Dter Méditerranée	Auteur	BABY Florent (florent.baby)	Signature numérique de BABY Florent (florent.baby) Date : 2026.06.17 11:13:15 +02'00'
David Criado	Cerema Dter Méditerranée	Auteur	David CRIADO	Signature numérique de David CRIADO Date : 2026.06.17 11:37:10 +02'00'
Marie Malascrabes	Cerema Dter Méditerranée	Auteur	MALASCRABES Marie (marie.malascrabes)	Signature numérique de MALASCRABES Marie (marie.malascrabes) Date : 2026.06.18 14:36:05 +02'00'
Frédéric Pons	Cerema Dter Méditerranée	Relecteur	PONS Frédéric (frederic.pons)	Signature numérique de PONS Frédéric (frederic.pons) Date : 2026.06.17 11:45:16 +02'00'
Patrice Maurin	Cerema Dter Méditerranée	Valideur	Patrice MAURIN 2310006374mp	Signature numérique de Patrice MAURIN 2310006374mp Date : 2026.06.19 15:47:53 +02'00'

Résumé de l'étude

Cette étude constitue la première phase d'un futur plan de gestion de l'espace alluvial du Rancure visant à établir un diagnostic. Elle repose sur une analyse trajectorielle (passé, présent, futur) de son fonctionnement hydromorphologique pour comprendre ses évolutions et définir les enjeux. L'analyse diachronique (1950-2021) révèle une réduction progressive de la largeur de la bande active et une tendance générale à l'incision du lit au sein des terrasses anciennes. Ces dynamiques sont la conséquence d'un déficit sédimentaire : le cours d'eau remanie principalement son stock alluvial hérité plutôt que de recevoir des apports externes.

En l'absence de données de débits, l'hydrologie a été caractérisée par une analyse bivariée des pluies pour définir des scénarios de crues de référence. Une analyse des écoulements a permis d'identifier les zones de débordement préférentielles. Les risques majeurs identifiés sont notamment la formation d'embâcles de bois aux nombreux ouvrages et l'engravement de certains secteurs qui aggravent les inondations.

Le diagnostic prospectif dégage des scénarios d'évolution pour orienter la gestion future face à ces dynamiques complexes

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Rancure	Puimichel
Hydromorphologie	Erosion des berges
Analyse trajectorielle	Modélisation hydraulique
Transport solide	Embâcles
Analyse diachronique	
Analyse bivariée des pluies	

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- ☒ Accès libre : document accessible au public sur internet
- ☐ Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- ☐ Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

Contexte et objet de l'étude

Le Syndicat Mixte Asse Bléone (SMAB) a souhaité réaliser une étude globale du bassin versant du Rancure afin d'établir un diagnostic complet et d'élaborer un plan de gestion de l'espace alluvial. Cette démarche vise à comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire du Rancure et de ses affluents pour proposer des actions assurant un bon fonctionnement morphologique du cours d'eau, en adéquation avec les usages et les enjeux du territoire, y compris la réduction des risques d'érosion et d'inondation.

Le Rancure est un affluent de la Durance situé dans les contreforts des Alpes du Sud, drainant un bassin versant de 96 km². De régime torrentiel à écoulement non pérenne, son lit présente sur une vingtaine de kilomètres une pente décroissante (de 3 à 1% environ) qui lui permet de développer un transport solide par charriage important, notamment en raison de la présence de formations géologiques facilement érodables. Ce fonctionnement est aujourd'hui confronté à plusieurs déséquilibres, notamment une incision progressive de plusieurs ravins affluents en tête de bassin, une réduction de la bande active et une perturbation générale du transit sédimentaire, les matériaux transportés ne semblant plus transiter correctement jusqu'au cours d'eau récepteur.

Le diagnostic doit permettre de recenser et de cartographier les divers enjeux liés aux cours d'eau (usages urbains, agricoles, transit sédimentaire, inondations, etc.). L'objectif global de l'étude est double :

- Réaliser un diagnostic complet du cours d'eau comprenant des analyses hydrologique, hydraulique et hydromorphologique, objet du présent rapport.
- Élaborer un plan de gestion de l'espace alluvial composé de diverses actions prioritaires sur l'ensemble du bassin versant, valant schéma directeur de gestion.

Cette mission a été confiée au Cerema par le SMAB.

Sommaire

1	Analyse bibliographique	12
1.1	Diagnostics généraux	12
1.1.1	Schéma d'aménagement hydraulique du Rancure	12
1.1.1.1	Généralités	12
1.1.2	Schéma pluriannuel de gestion et de valorisation de la ripisylve des cours d'eau– Bassin versant du Rancure	13
1.1.3	Bassin versant du Rancure : Diagnostics - Etudes préliminaires & proposition d'un programme global d'action	15
1.2	Risques naturels / Études Hydrauliques	16
2	Contexte du bassin versant du Rancure	17
2.1	Contexte physique.....	17
2.1.1	Contexte géographique et administratif.....	17
2.1.2	Contexte climatique	17
2.1.2.1	Climat du bassin versant du Rancure	17
2.1.2.2	Précipitations et évolutions potentielles dans le temps.....	19
2.1.3	Contexte hydrographique.....	23
2.1.4	Occupation du sol	26
2.2	Contexte pluviométrique et hydrologique.....	29
2.2.1	Analyse pluviométrique	29
2.2.1.1	Données de pluies disponibles	29
2.2.1.2	Estimation des temps de concentration	31
2.2.1.3	Contexte hydrométéorologique	36
2.2.1.4	Analyse bivariée des pluies.....	37
2.2.2	Analyse hydrologique.....	46
2.2.2.1	Hydrologie fréquentielle : approche par analogie	46
2.2.2.2	Apport des modélisations hydrologiques/hydrauliques.....	53
2.2.2.3	Crues historiques.....	60
2.2.2.4	Synthèse.....	66
2.3	Contexte géologique et géomorphologique.....	67
2.3.1	Les dépôts tertiaires.....	67
2.3.2	Les dépôts quaternaires.....	70
2.3.3	Géomorphologie	70
2.3.3.1	Contexte géomorphologique	70
2.3.3.2	Impact morphologique	73
2.4	Contexte hydrogéologique	76
2.5	Contexte humain.....	79
2.5.1	Population et environnement socio-économique.....	79

2.5.2	Voies de communication	79
2.5.3	Usages liés à l'eau	80
2.6	Contexte environnemental	83
2.6.1	Lien entre hydromorphologie et biodiversité	83
2.6.2	Les zonages et inventaires environnementaux	83
2.6.3	Les milieux aquatiques	84
2.6.4	Les Zones Humides	84
2.6.4.1	Préambule	84
2.6.4.2	Différents types de zones humides présentes	85
2.6.4.3	Etat des zones humides et plan de gestion	86
3	Fonctionnement hydromorphologique du bassin versant	89
3.1	Séquençage spatial et temporel	89
3.1.1	Fonctionnement conceptuel du Rancure	89
3.1.2	Sectorisation du cours d'eau (séquençage spatial)	90
3.1.2.1	Sectorisation du Rancure	90
3.1.2.2	Sectorisation du Puimichel	95
3.1.3	Séquençage temporel	97
3.2	Analyse trajectorielle historique	98
3.2.1	Évolution de l'occupation des sols du bassin versant	98
3.2.2	Évolution du forçage climatique	100
3.2.3	Forçage anthropique	100
3.2.3.1	Bref historique des actions anthropiques sur le bassin versant du Rancure	100
3.2.3.2	Les perturbateurs hydromorphologiques et le corsetage du lit	102
3.2.4	Analyse diachronique	108
3.2.4.1	Evolution en plan	108
3.2.4.2	Evolution du profil en long	115
3.2.5	Synthèse de l'analyse trajectorielle historique	135
3.3	Analyse fonctionnelle actuelle	135
3.3.1	Évaluation de la source/recharge sédimentaire	135
3.3.1.1	Apports solides externes : une production dominée par les matériaux fins	135
3.3.1.2	Apports solides internes : le remaniement du stock alluvial comme source principale de matériaux grossiers	135
3.3.2	Granulométrie	136
3.3.2.1	Objectifs et enjeux	136
3.3.2.2	Méthodologie	136
3.3.2.1	Résultats	137
3.3.3	Evaluation du transport solide	139
3.3.3.1	Objectifs et données mobilisées	139
3.3.3.2	Méthode de calcul et principe d'interprétation	141

3.3.3.3	Limites et incertitudes de l'exercice.....	142
3.3.3.4	Résultats et interprétation	142
3.3.4	Flottants et formation d'embâcles	145
3.3.4.1	Potentiel de production de flottants	145
3.3.4.2	Interaction ouvrages/flottants	146
3.3.5	Synthèse de l'analyse fonctionnelle actuelle	147
3.4	Analyse trajectorielle prospective.....	147
3.4.1	Tendances héritées et leur projection future	147
3.4.2	L'Incertitude majeure : la "Super-Variable" climatique	148
3.4.3	Scénarios d'évolution dynamique du Rancure.....	148
3.4.3.1	Scénario tendanciel ("Laisser-faire") :	148
3.4.3.2	Scénario de rupture par forçage climatique :	148
3.4.4	Synthèse et implications pour la gestion future	148
4	Analyse hydraulique.....	150
4.1	Évaluation des conditions d'écoulement	150
4.1.1	Objectifs.....	150
4.1.2	Classification hydro-morphologique au regard de l'analyse hydraulique	150
4.1.2.1	Indicateurs calculés le long de l'axe du Rancure et du Puimichel	150
4.1.2.2	Classification hydro-morphologique	151
4.1.3	Stratégie calculatoire par type de cluster hydromorphologique	155
4.1.4	Évaluation des niveaux d'eau et des points de débordement.....	159
4.1.4.1	Niveaux d'eau avec le fonds actuel pour les crues de référence	159
4.1.4.2	Niveaux d'eau en considérant l'évolution systématique des fonds pour les crues de référence	165
4.1.5	Synthèse sur les conditions d'écoulement	167
4.2	Apport de la modélisation hydraulique 2D	167
4.2.1	Intérêts et limites de la modélisation hydraulique 2D à fonds fixe.....	168
4.2.1.1	Limites intrinsèques du « fonds fixe » en contexte torrentiel	168
4.2.1.2	Intérêts	168
4.2.2	Présentation de Cartino 2D et de la stratégie de modélisation	168
4.2.2.1	Méthode Cartino 2D	168
4.2.2.2	Description des modèles.....	170
4.2.2.3	Modèle Numérique de Terrain (MNT)	172
4.2.2.4	Lignes de contrainte et points singuliers	173
4.2.3	Simulation d'évènements historiques documentés.....	174
4.2.3.1	Caractérisation de l'aléa pluviométrique des événements sélectionnés	175
4.2.3.2	Résultats de la modélisation et comparaison aux observations	181
4.2.4	Simulation des crues de référence avec fonds actuels.....	183
4.2.5	Synthèse sur l'apport de la modélisation hydraulique 2D	186

4.3	Érosion des berges	186
4.3.1	Estimation de l'élargissement effectif du lit lors des crues de 2014 et 2019	186
4.3.1.1	Méthodologie	186
4.3.1.2	Résultats.....	187
4.3.2	Évaluation de l'élargissement potentiel du lit via le « chenal à l'équilibre »	190
4.3.2.1	Principe et cadre physique.....	190
4.3.2.2	Adaptation de la méthode	191
4.3.2.3	Calibration du rapport de contrainte de cisaillement supra-critique	191
4.3.2.4	Comparaison des élargissements modélisés et observés pour les crues de 2014 et 2019	192
4.3.2.5	Estimation des élargissements pour les crues de référence.....	194
4.3.3	Synthèse sur l'érosion des berges	199
5	Glossaire.....	200
6	Bibliographie	202
Annexes	206	
Annexe 1	Analyse bivariée des pluies basée sur la durée équivalente	206
Annexe 2	Hyétogrammes et hydrogrammes issus de l'analyse bivariée	211
Annexe 3	Modélisations hydrauliques 2D : évènements d'août 1998, janvier 2014 et novembre 2019.....	217
Annexe 4	Elargissements médians simulés du chenal actif pour les crues de référence et emprise globale de la bande active historique 1950 et des terrasses anciennes .	225

Introduction

À la demande du Syndicat Mixte Asse Bléone (SMAB), la présente étude vise à établir un diagnostic complet du bassin versant du Rancure en vue de l'élaboration d'un plan de gestion de son espace alluvial. Cette démarche a pour objectif de concilier le bon fonctionnement morphologique du cours d'eau avec les usages et les enjeux du territoire, incluant la réduction des risques d'inondation et d'érosion. Le Rancure, cours d'eau à régime torrentiel non pérenne, présente en effet des déséquilibres, tels qu'une incision de certains ravins affluents, une perturbation du transit sédimentaire et une réduction de sa bande active, qui justifient une analyse approfondie.

Pour répondre à ce besoin, ce rapport de diagnostic dresse un état des lieux multidimensionnel du bassin versant. Il s'appuie d'abord sur une analyse bibliographique des études antérieures avant de décrire en détail le contexte général du territoire à travers ses multiples facettes : **physique** (géographie, climat, occupation du sol), **pluviométrique et hydrologique**, **géologique et géomorphologique**, mais aussi **humain** (population, usages de l'eau, infrastructures) et **environnemental** (zonages, habitats, qualité de l'eau).

Sur la base de ce panorama complet, l'étude analyse ensuite plus spécifiquement **le fonctionnement hydromorphologique** et les **dynamiques hydrauliques** du cours d'eau et de ses affluents. En s'appuyant sur le concept de trajectoire géomorphologique, elle décrypte l'évolution historique, le fonctionnement actuel et les tendances futures du système. Cette partie évalue notamment la production et le transport des sédiments, ainsi que la problématique des flottants. Une analyse hydraulique détaillée vient compléter ce volet, en qualifiant les conditions d'écoulement, en s'appuyant notamment sur des simulations hydrauliques 2D et en évaluant les risques d'érosion des berges.

Ce diagnostic intégré, qui croise les approches thématiques et les échelles d'analyse, constituera ainsi le socle initial à l'élaboration, dans une seconde phase, d'un plan de gestion adapté aux spécificités du Rancure.

La Figure 1 illustre l'architecture générale du diagnostic et les principaux volets d'analyse mobilisés dans l'étude.

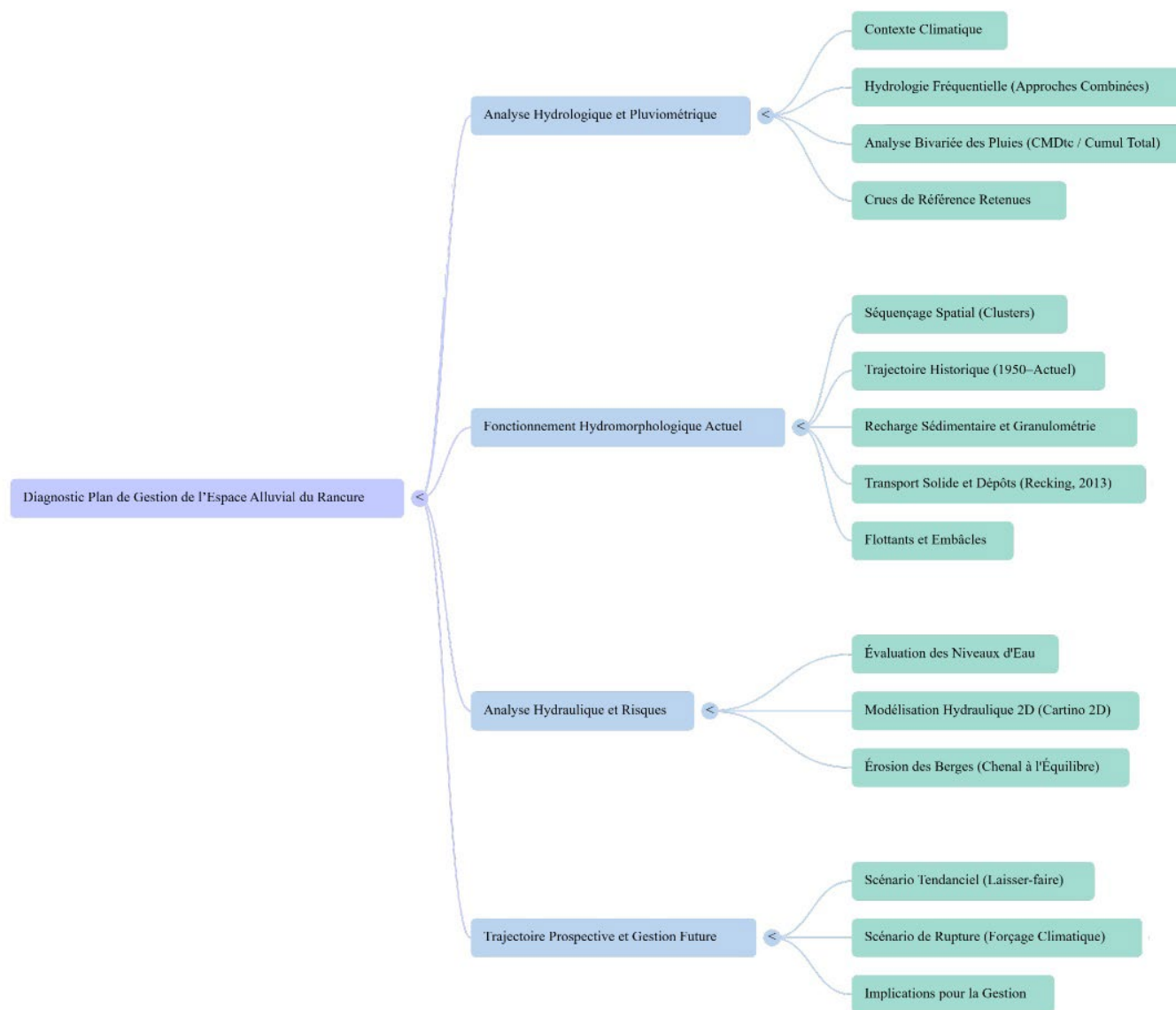


Figure 1 Organisation générale du diagnostic du plan de gestion de l'espace alluvial du Rancure.

1 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Diagnostics généraux

1.1.1 Schéma d'aménagement hydraulique du Rancure

1.1.1.1 Généralités

Le Schéma d'aménagement hydraulique du Rancure réalisé par la Société du Canal de Provence en 1994 [1] est la première étude visant à dresser un diagnostic général du Rancure et à cartographier l'aléa inondation par débordement de cours d'eau, notamment dans la traversée du Castellet et de la commune d'Oraison. Cette étude finalisée en mars 1994 fait suite à une crue notable du Rancure et du Puimichel en janvier 1994 avec des débordements au niveau des deux communes.

Concernant les caractéristiques physiques et géologiques du bassin versant du Rancure, l'étude (SCP, 1994) [1] met en avant l'impact des formations géologiques (conglomérat de Valensole et argiles rouges en tête de bassin) sur :

- Le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant avec des formations facilement érodables entraînant une érosion profonde des ravins situés en amont du bassin et un charriage très important de matériaux par le Rancure.
- L'écoulement non pérenne du Rancure avec des formations alternant des niveaux caillouteux très perméables et des niveaux d'argiles imperméables donnant naissance à des sources perchées et des écoulements hypodermiques de la rivière en fonds de vallée.

Une analyse hydrologique notamment sur les crues extrêmes (probabilité d'occurrence rare) est menée sur le Rancure au niveau du Castellet et d'Oraison. Les résultats de l'étude sont analysés au paragraphe 2.2.2.

Concernant l'aléa « inondation par débordement de cours d'eau », il est cartographié sur la base d'une analyse hydrogéomorphologique avec la délimitation sur le Rancure du :

- Lit mineur : lit actif du cours d'eau en 1994.
- Lit moyen : espace délimité par les différents épisodes de crues anciens. Il peut également correspondre à une dénomination « classique » pour les rivières torrentielles : « terrasses anciennes ».
- Lit majeur : champ maximal d'inondation correspondant au talus de la première terrasse alluviale ou au relief formant « l'encaissant » de la vallée alluviale.

Cette analyse hydrogéomorphologique a été menée en décomposant le Rancure en 6 secteurs : voir Figure 2.

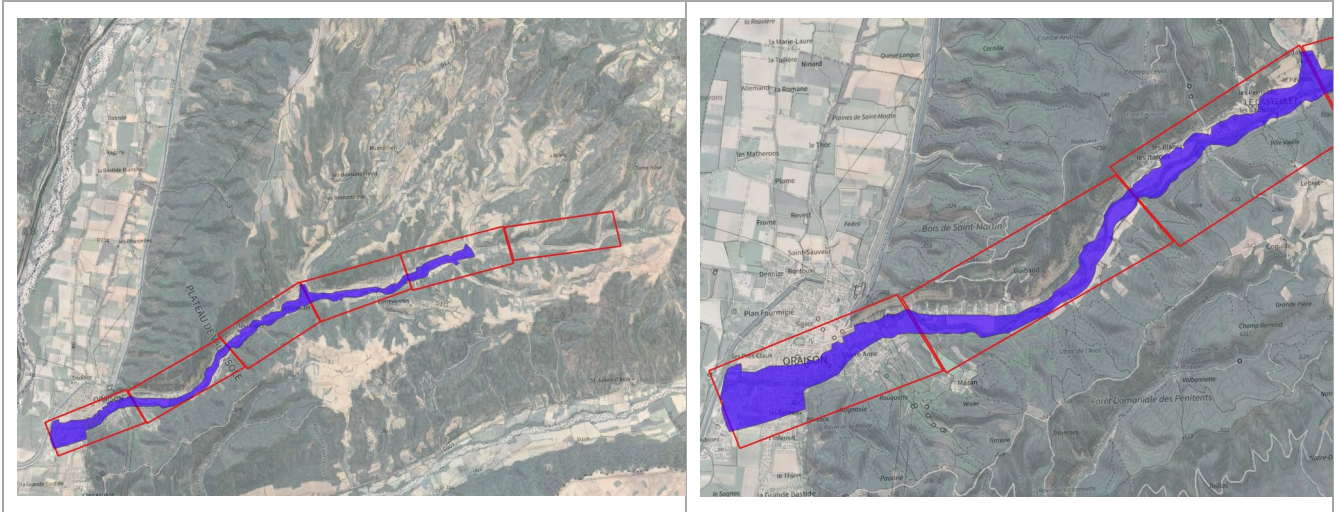


Figure 2 Etude (SCP, 1994) : cartographie de l'aléa inondation via une analyse hydrogéomorphologique (à gauche : vue générale ; à droite : zoom sur la traversée du Castellet et d'Oraison)

A l'issue de ce diagnostic, le Schéma d'aménagement du Rancure proposé par la SCP prévoit une restauration du lit avec le débroussaillage des berges et du lit, le tronçonnage sélectif d'arbres ou la plantation d'arbres (traversée d'Oraison) selon les secteurs et la régularisation des sections du Rancure avec suppression des sections rétrécies. En complément de cette restauration du lit, l'étude recommande l'intervention sur plusieurs ouvrages avec des réfections de seuils, l'aménagement de certains passages à gué et la modification de ponts (au niveau d'Oraison) en raison de leur sous-dimensionnement en termes de capacité hydraulique.

1.1.2 Schéma pluriannuel de gestion et de valorisation de la ripisylve des cours d'eau– Bassin versant du Rancure

L'état des lieux et le diagnostic du Schéma pluriannuel de gestion et de valorisation de la ripisylve des cours d'eau du département des Alpes de Hautes Provence a été réalisé, pour le bassin versant du Rancure, par EGIS Eau en 2011 [2]. Sur la base d'une décomposition du Rancure en 10 tronçons homogènes (voir Figure 3), un état des lieux de la ripisylve le long du cours d'eau est effectué sur les trois strates : plantes herbacées, arbustes et arbres (exemple à la Figure 4).

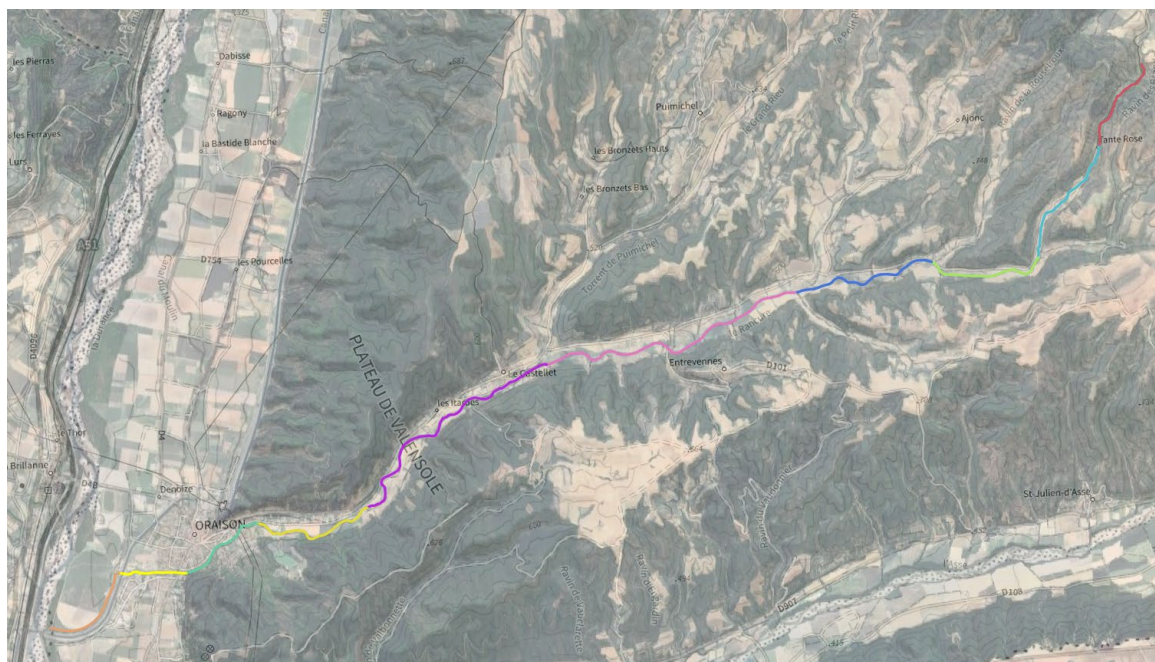


Figure 3 Etat des lieux et diagnostic de la ripisylve du Rancure (EGIS Eau, 2011) : découpage en tronçons homogènes

Outre le diagnostic sur la ripisylve, l'étude indique des éléments hydromorphologiques sur chaque tronçon à partir de la méthodologie explicitée dans le guide de l'ONEMA sur les « Eléments

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

d'hydromorphologie fluviale » [3]. A ce titre le faciès d'écoulement est considéré comme un faciès « lotique »¹ de type « radier » jusqu'à l'entrée d'Oraison puis « plat lotique »² jusqu'à la confluence avec la Durance. Il est également indiqué les tronçons du Rancure qui sont utilisés comme piste par les agriculteurs : voir Figure 5.

L'état des lieux répertorie également les ouvrages ayant une influence potentielle sur la morphologie du Rancure. Au total 23 fiches « ouvrage » sont disponibles.

Le découpage en tronçons hydromorphologiquement homogènes défini par l'étude d'EGIS Eau en 2011 [2] est à intégrer dans l'analyse sur le fonctionnement hydrogeomorphologique du bassin versant du Rancure, au regard notamment du diagnostic effectué sur la ripisylve pour chaque tronçon.

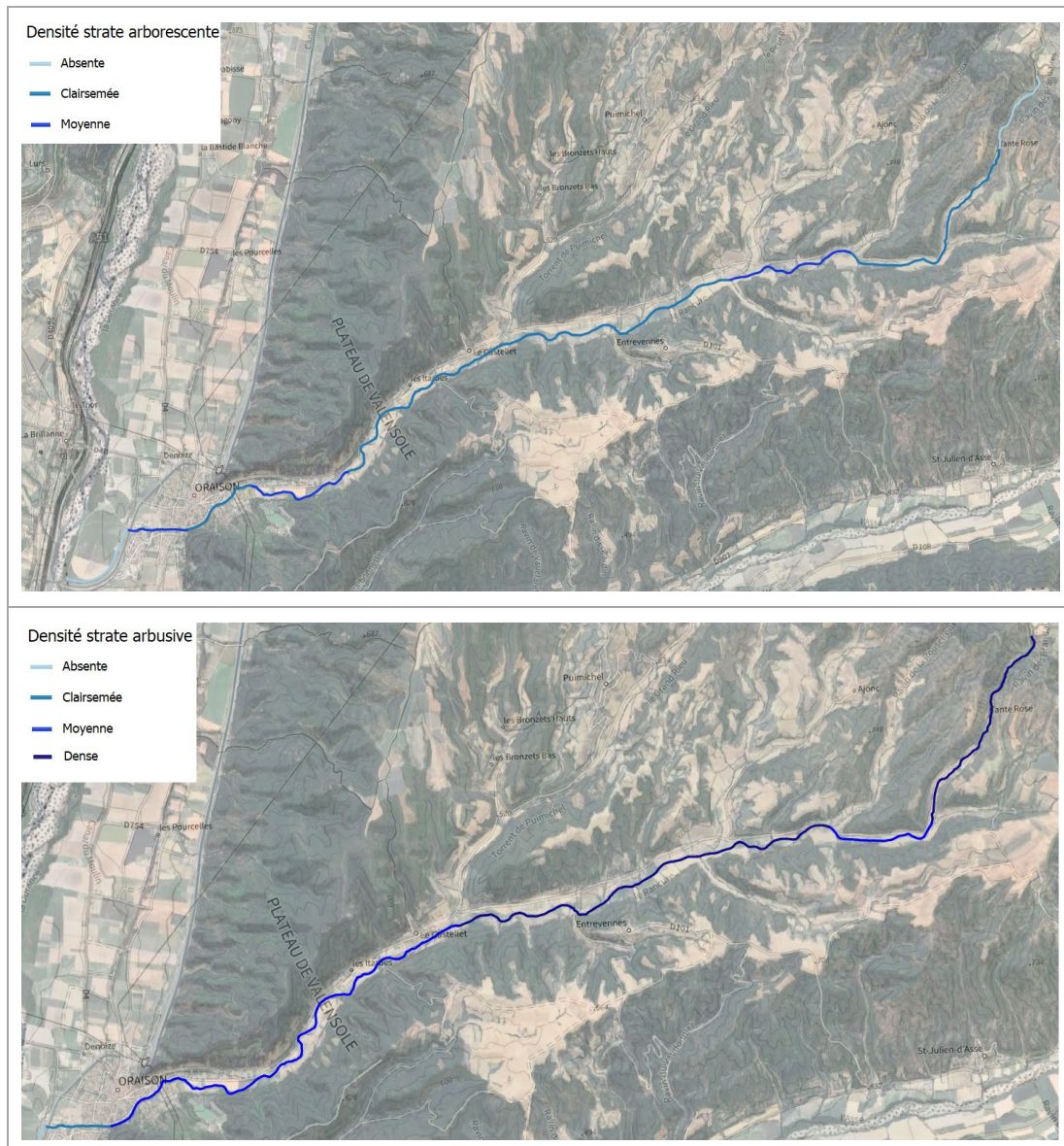


Figure 4 Etat des lieux et diagnostic de la ripisylve du Rancure (EGIS Eau, 2011) : densité estimée de la strate arborescente et arbustive

¹ En hydromorphologie, un faciès lotique désigne les caractéristiques physiques et dynamiques d'un cours d'eau en mouvement, c'est-à-dire d'un milieu où l'eau circule de manière continue (rivières, ruisseaux, fleuves). Ce terme s'oppose au faciès lentique, qui concerne les milieux d'eau stagnante (lacs, étangs, mares).

² Un plat lotique est une zone spécifique d'un cours d'eau (milieu lotique) caractérisée par un écoulement modéré et régulier, ni trop rapide ni trop lent. Il s'agit d'une section intermédiaire entre les zones plus turbulentes (comme les radiers) et les zones plus calmes (comme les mouilles)

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025



Figure 5 Etat des lieux et diagnostic de la ripisylve du Rancure (EGIS Eau, 2011) : tronçons ou partie des tronçons utilisés comme une piste

1.1.3 Bassin versant du Rancure : Diagnostics - Etudes préliminaires & proposition d'un programme global d'action

L'étude (SMAB, 2021) [4] s'inscrit dans le cadre de la gestion des milieux aquatiques et de la prévention des inondations (compétence GEMAPI). Elle visait à actualiser l'état des lieux initié en 1994 par la Société du Canal de Provence [1] et synthétisé au paragraphe 1.1.1, à distinguer les actions relevant de la compétence GEMAPI de celles qui ne le sont pas, et à identifier d'éventuels besoins en études complémentaires (notamment hydrauliques). L'objectif global est d'initier un programme d'actions pour la gestion, l'entretien et la restauration du territoire.

Le diagnostic repose sur trois axes principaux :

- Une analyse bibliographique des études existantes (dont les travaux mentionnés dans cette partie bibliographique),
- Des prospections de terrain menées en 2019-2020,
- Des échanges avec les élus et techniciens locaux.

Ces éléments permettent de dresser un état des lieux détaillé du territoire. Un certain nombre d'éléments du présent rapport sont issus de cette étude.

Outre les constats sur le milieu physique, le milieu humain et l'occupation des sols, l'étude met en évidence, sur le plan hyromorphologique, une réduction progressive de la bande active du Rancure et de ses affluents ainsi qu'une perturbation des confluences, notamment suite à la construction d'ouvrages (ex. canal EDF, seuil de la route d'Entrevennes) qui ont modifié le transit sédimentaire.

En termes de qualité des eaux et de ses usages, les eaux superficielles, intermittentes, ne font pas l'objet d'un suivi régulier tandis que les prélèvements en eau potable (à partir de sources et forages) révèlent quelques préoccupations, notamment la contamination par des produits phytosanitaires.

Le diagnostic recense également la répartition des captages d'eau, certains étant classés comme « prioritaires », et souligne la nécessité d'une meilleure gestion de la ressource en eau.

1.2 Risques naturels / Études Hydrauliques

En complément des diagnostics généraux réalisés sur le Rancure, plusieurs études hydrauliques transmises par le SMAB ont été examinées. Le Tableau 1 recense ces études en précisant, pour chacune, les éléments pertinents pour le présent diagnostic.

Références de l'étude	Éléments récupérés
Rapport de présentation du PPRn d'Oraison _ DDE_1999 [5]	Dégâts constatés lors des crues de 1992 et 1994
Étude hydraulique sur le passage à gué sur le torrent du Puimichel à l'amont du pont de la RD101_Dimensionnement Hydraulique_SCP_2003	Identification des zones de débordement du Puimichel sur le secteur du pont de la RD101
Étude hydraulique du ravin du Rancure_SOGREAH_2007 [6]	Résultats de l'analyse hydrologique
Cartographie des zones inondables par la méthode hydrogéomorphologique_Département des Alpes de Haute Provence_Ginger-SIEE_2008 [7]	Cartographie du zonage d'inondation au sens hydrogéomorphologique du Rancure à l'aval de la confluence avec le Puimichel
Projet de plan de prévention des risques naturels du Castellet_Rapport de présentation_DDT04/Alp'Georisques_2014 [8]	Dégâts constatés sur le Castellet lors de certaines crues historiques du Rancure et du ravin de la Fouent/Fontaine
Schéma directeur de gestion globale de l'Asse et ses affluents _ État des lieux-Diagnostic_Hydrétudes_2022 [9]	
Abaissement partiel du gué du pont de la RD101 sur le Rancure à Entrevennes et réinjection des matériaux dans la durance _ Compte-rendu de visite_SMAB_Aout 2023 [10]	Volume extrait du Rancure en amont du passage à gué et déposé dans la Durance _ Valeurs des mesures granulométriques effectuées
Étude hydraulique _ Reconstruction du pont du Puimichel et effacement du passage à gué de la RD101_ABO ERG Environnement_2024 [11]	

Tableau 1 Études hydrauliques et hydrogéomorphologiques menées sur le Rancure et les bassins versants adjacents

2 CONTEXTE DU BASSIN VERSANT DU RANCURE

2.1 Contexte physique

2.1.1 Contexte géographique et administratif

Le Rancure est un affluent de la Durance, situé dans le département des Alpes-de-Haute-Provence, dans les contreforts des Alpes du Sud, entre les bassins de la Bléone au Nord et de l'Asse au Sud. Il prend sa source dans la commune de Saint-Jeannet, au sud du col de l'Espinouse, à environ 880 mètres d'altitude. Son cours, d'une longueur d'environ 24 km, s'oriente généralement vers l'ouest-sud-ouest avant de confluer avec la Durance dans la commune d'Oraison, à environ 335 mètres d'altitude.

La superficie du bassin versant du Rancure est de 96 km² à la confluence avec la Durance et de 79 km² au Castellet (voir Figure 6).

Le Rancure traverse sept communes faisant partie de deux EPCI différents :

- Durance Luberon Verdon Agglomération (DLVA) : Puimichel, Entrevennes, Le Castellet, Oraison (confluence).
- Provence Alpes Agglomération (PAA) : Saint-Jeannet (source), Bras d'Asse, Saint-Julien-d'Asse, Les Mées.

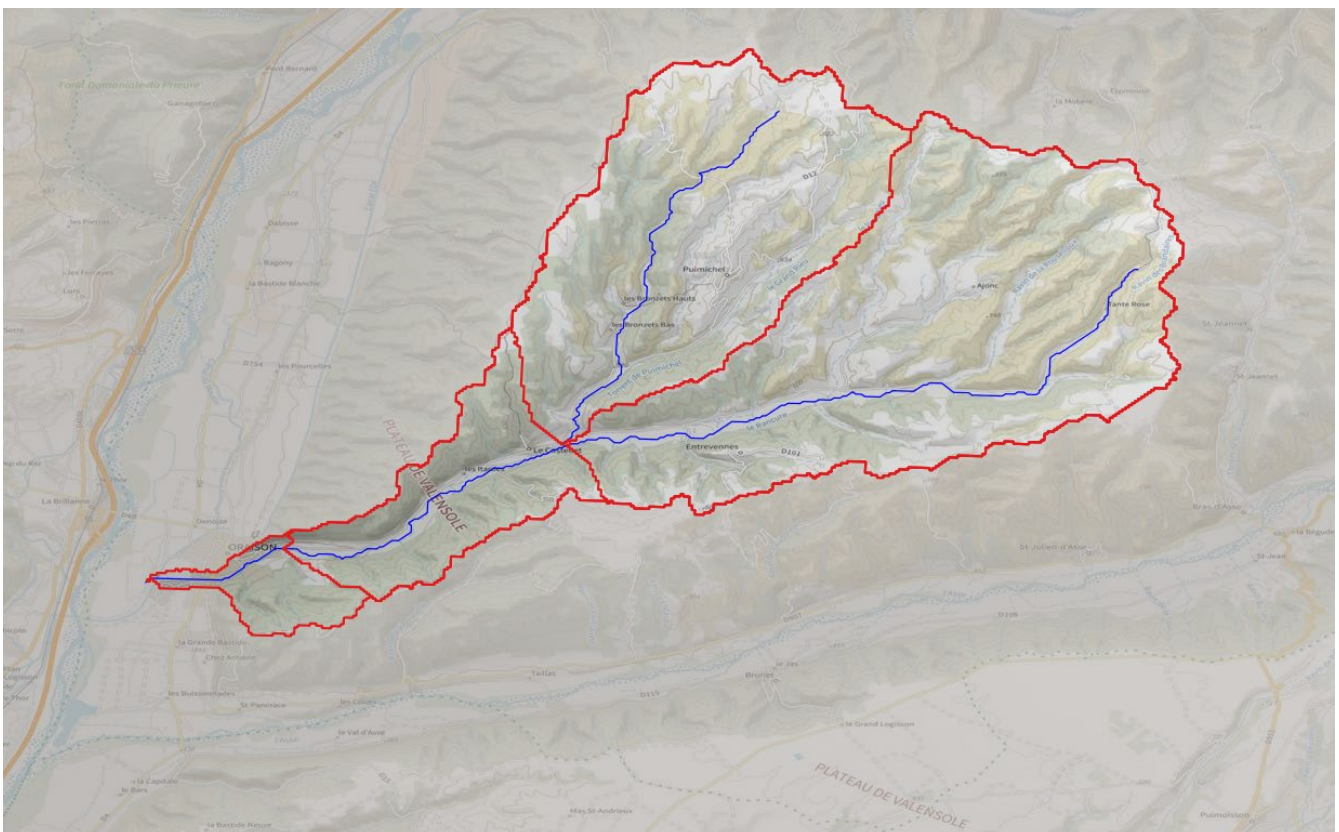


Figure 6 Présentation du bassin versant du Rancure

2.1.2 Contexte climatique

2.1.2.1 Climat du bassin versant du Rancure

D'un point de vue climatique, dans le Sud-Est de la France, les masses d'air méditerranéennes, ont une influence forte et directe sur une bande littorale plus ou moins large mais leur effet ne se cantonne pas au voisinage des côtes. La dynamique des masses d'air est ainsi contrainte par le jeu contradictoire des **Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)**

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

reliefs qui font barrière (Cévennes et Alpes), et des vallées qui canalisent les flux (Rhône notamment) : voir Figure 7. En progressant à l'intérieur des terres, les masses d'air perdent leurs caractères initiaux pour en acquérir d'autres à mesure qu'elles interagissent avec le milieu continental qu'elles traversent. De ce fait, les termes du bilan énergétique se modifient, les températures d'été deviennent plus élevées et celles d'hiver plus basses ; l'amplitude thermique augmente. De leur côté, les reliefs jouent aussi un rôle décisif : sur les versants au vent, le volume et le nombre de jours de précipitation s'élèvent tandis qu'ils diminuent sous le vent par effet de foehn.

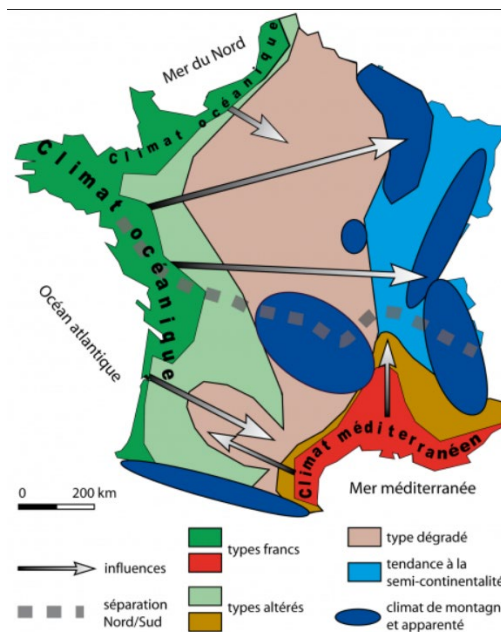


Figure 7 Schéma synthétique de l'espace des climats en France hexagonale [12]

Une étude du CNRS de 2010 réalisée par (Joly et al., 2010) [12] a permis de classer les climats de la France hexagonale en huit grands types. Partant des mesures, aux stations météorologiques, de précipitation et de température mises à disposition par Météo-France, un jeu de 14 variables intégrant une série temporelle de 30 ans (1971-2000) a été défini pour caractériser les climats et leurs modalités distinctives de variation. Une méthode originale dite d'interpolation locale a permis de reconstituer les champs spatiaux continus des variables en question et de les exprimer sous forme de couches géospatiales. Il en a résulté 8 types de climats (voir Figure 8) dont trois concernent les Alpes-de-Haute-Provence :

- Type 1 : climats de montagne : il regroupe tous les lieux où les influences montagnardes et/ou semi-continental sont prépondérantes, ce qui se traduit par : un nombre de jours et un cumul élevé de précipitation, une température moyenne inférieure à 9,4°C et, corrélativement, plus de 25 jours au cours desquels la température minimale a été inférieure à -5°C et moins de 4 avec un maximum supérieur à 30°C. La variabilité interannuelle des précipitations de juillet et des températures d'hiver et d'été est maximale.
- Type 2 : le climat semi-continental et le climat des marges montagnardes qui fait la transition avec les climats de montagne. Les précipitations sont légèrement plus faibles et moins fréquentes que le Type 1, mais la variabilité climatique sur la normale 1971-2000 est tout aussi élevée. Le faible rapport entre les précipitations d'automne et d'été est une autre caractéristique de ce type.
- **Type 6 : le climat méditerranéen altéré.** Le méditerranéen altéré s'étend surtout sur les Alpes et les Préalpes du sud, englobant l'essentiel des deux départements des Alpes-de-Haute-Provence et de la Drôme. La température moyenne annuelle est élevée, avec des jours de froid en nombre réduit et des jours chauds compris entre 15 et 23/an. La variabilité interannuelle des températures de juillet est minimale : l'été est répétitivement chaud d'une année à l'autre. **Le cumul des précipitations annuelles est moyen (800-950 mm) mais elles ne sont pas**

réparties homogènement. L'automne et l'hiver, humides et très variables d'une année à l'autre, s'opposent à l'été, sec et stable sur la normale 1971-2000.

Le bassin versant du Rancure fait presque partie intégralement de la zone climatique de type « Méditerranéen altéré » (voir Figure 8). Une très faible portion, sur les hauteurs du bassin à l'Est, est concernée par le type 2 des marges montagnardes.

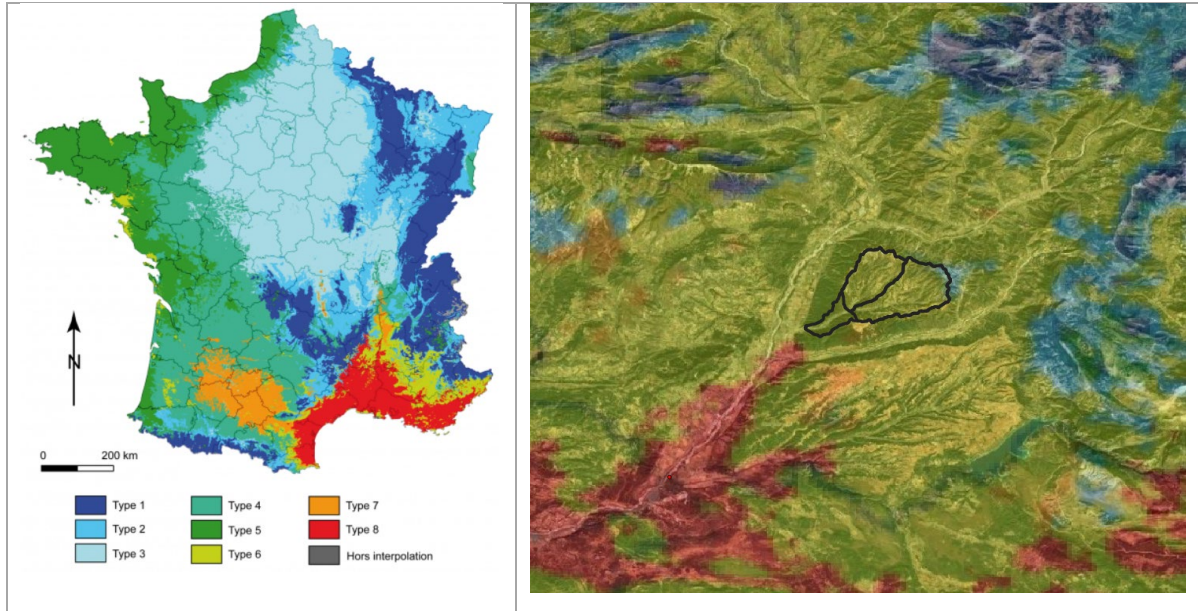


Figure 8 Typologie climatique du territoire français en 8 classes selon (Joly et al., 2010) (à gauche) [12] ; Zoom sur la zone du bassin versant du Rancure (à droite)

Le classement de type « Méditerranéen altéré » par (Joly et al., 2010) pour le bassin versant du Rancure est assez cohérent avec la définition des zones et régions climatiques établie par Météo France en 2020 qui place le bassin, certes en climat de montagne mais à proximité directe de la bande de transition : voir Figure 9.

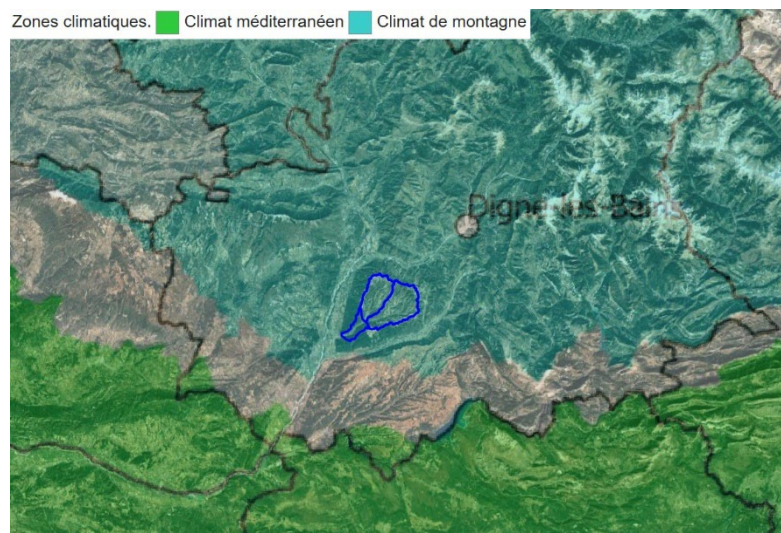


Figure 9 Zones climatiques définies par Météo France : zoom sur le bassin versant du Rancure

2.1.2.2 Précipitations et évolutions potentielles dans le temps

En termes de précipitations, le pluviomètre de Météo France situé au Castellet (données de pluies journalières disponibles depuis 1958) permet de donner un premier aperçu sur l'évolution des précipitations annuelles : voir Figure 10. Le test de Mann-Kendall ($p\text{-value} = 0.782$) mené sur la régression linéaire des cumuls annuels sur l'ensemble de la chronique ne semble pas montrer une tendance significative à la baisse ou à l'augmentation. Cela est confirmé par l'absence de significativité

du test de Wilcoxon ($W = 510$, $p\text{-value} = 0.942$) sur la comparaison des cumuls annuels avant et après l'an 2000.

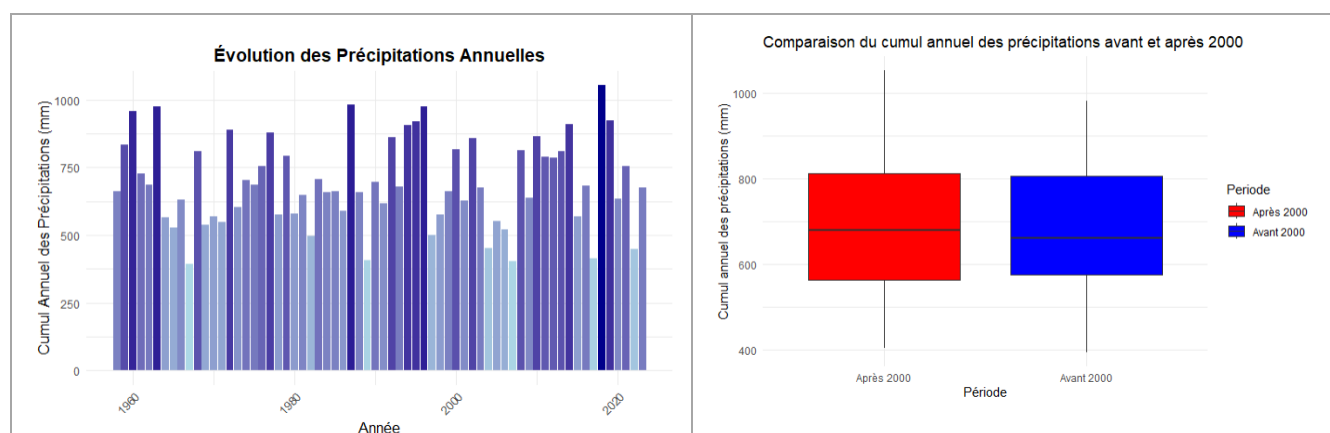


Figure 10 Évolution des cumuls de pluies annuelles depuis 1958 (à gauche) ; Comparaison des cumuls annuels avant et après 2000 (à droite) [pluviomètre du Castellet – Météo France]

La Figure 11 permet de visualiser la répartition saisonnière des précipitations. **L'automne (septembre-novembre) est la saison la plus pluvieuse, ce qui correspond bien au climat méditerranéen influencé notamment par des épisodes cévenols. L'été (juin-août) est plus sec, mais il peut y avoir des pics liés aux orages estivaux.** Une analyse spécifique sur la répartition saisonnière des records de pluies selon les différentes durées de cumuls est menée au paragraphe 2.2.1.

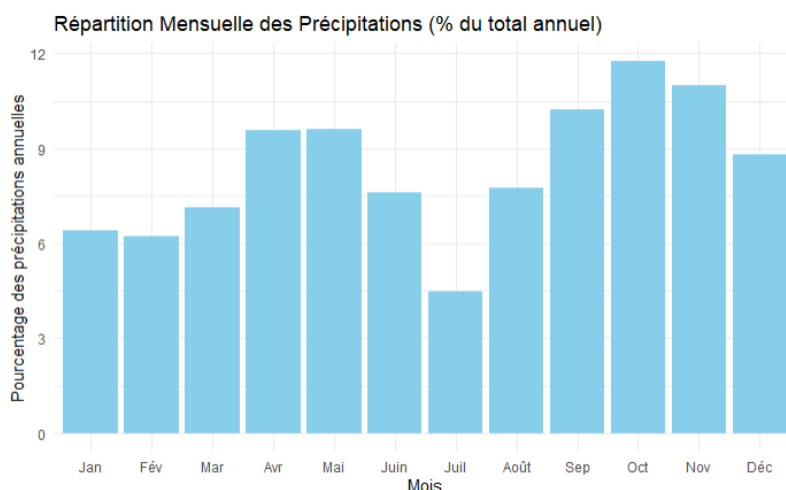


Figure 11 Répartition mensuelle moyenne des précipitations sur l'ensemble de la chronique (pluviomètre du Castellet – Météo France)

En termes d'évolution sur la répartition saisonnière des pluies, le test de Mann-Kendall ($p\text{-value} = 0.782$) est mené sur la régression linéaire de la répartition des précipitations mensuelles dans le total annuel sur l'ensemble de la chronique ne semble pas montrer une tendance significative à la baisse ou à l'augmentation à l'exception des mois d'été et notamment le mois d'août (tendance à la baisse) : voir Tableau 2. Cela est confirmé par l'absence de significativité du test de Wilcoxon sur la comparaison des répartitions des précipitations mensuelles dans le total annuel avant et après l'an 2000 (tendance significative pour le mois d'août et tendance légère pour les mois de juillet et juin) : voir Figure 12.

Ces résultats suggèrent que l'été joue un rôle de moins en moins prépondérant dans le régime de précipitations au fil du temps. Cette diminution des précipitations estivales ne semble pas s'accompagner d'un effet de compensation sur une autre saison, aucune période de l'année ne se distinguant par une augmentation marquée qui viendrait contrebalancer cette tendance.

Une hypothèse plausible est que l'été devient progressivement plus sec sur le long terme, ce qui pourrait constituer un indice d'un changement climatique impactant les précipitations estivales.

Mois	p_value ³	S ⁴	Tendance
Janvier	0.932	-16	Pas de tendance significative
Février	0.258	-205	Pas de tendance significative
Mars	0.164	-252	Pas de tendance significative
Avril	0.698	71	Pas de tendance significative
Mai	0.412	149	Pas de tendance significative
Juin	0.088	-302	Tendance légère à la baisse
Juillet	0.083	-314	Tendance légère à la baisse
Août	0.042	-367	Tendance à la baisse
Septembre	0.412	-149	Pas de tendance significative
Octobre	0.258	205	Pas de tendance significative
Novembre	0.252	203	Pas de tendance significative
Décembre	0.371	159	Pas de tendance significative

Tableau 2 Résultats des tests de Mann-Kendall sur la répartition des précipitations mensuelles dans le total annuel sur l'ensemble de la chronique

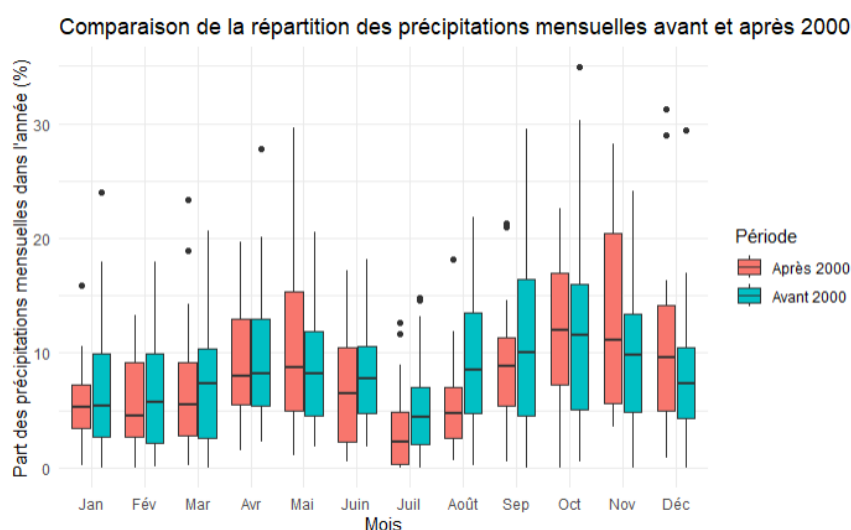


Figure 12 Répartition des précipitations mensuelles dans le total annuel : avant et après 2000 (pluviomètre du Castellet – Météo France). Rq : Les points noirs indiquent les outliers, situés en dehors de l'intervalle statistique défini par les moustaches du boxplot.

En termes d'évolution des événements « importants » voire « majeurs », une analyse est menée afin d'évaluer s'ils deviennent plus fréquents et/ou plus intenses au fil du temps. Pour cela les événements dits « importants » sont sélectionnés à partir d'un seuil de pluie journalière égal au quantile de période de retour biennale (PJ2ans = 50 mm selon traitement de la loi généralisée des valeurs extrêmes « GEV » GEV de la chronique de pluies du pluviomètre du Castellet). L'évolution de la fréquence annuelle de ces événements ainsi que leur intensité moyenne est analysée sur l'ensemble de la

³ p-value : La p-value indique la probabilité d'obtenir un résultat aussi extrême que celui observé sous l'hypothèse nulle (absence de tendance). Une p-value inférieure ou égale à 0,05 est généralement considérée comme statistiquement significative, indiquant une tendance significative.

⁴ S (Mann-Kendall) : Le test de Mann-Kendall évalue la tendance monotone des séries temporelles. La somme S représente la différence des rangs entre les paires de valeurs ; un S négatif indique une tendance à la baisse, tandis qu'un S positif indique une tendance à la hausse.

chronique (voir Figure 13). L'application du test de Mann-Kendall (p -value = 0.61 et 0.79) ne semble pas montrer de tendance significative à la hausse.

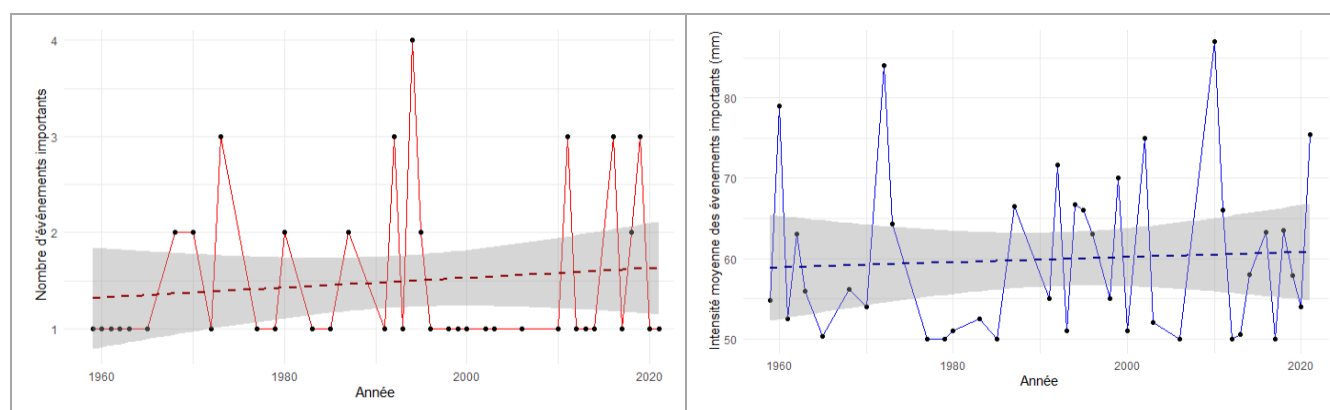


Figure 13 Évolution du nombre d'événements importants ($PJ > PJ2ans$) par année (à gauche) ; Evolution de l'intensité moyenne des événements importants par année (à droite) _ (pluviomètre du Castellet – Météo France)

Cette observation est complétée par l'évolution des quantiles de pluies⁵ (période de retour 2 ans à 20 ans) sur la période avant et après 2000. Plusieurs périodes de 24 ans sont analysées afin de rester sur une taille d'échantillons comparable : 1958/1981 ; 1968/1991 ; 1977/2000 ; 2000/2023. Les valeurs sur la chronique complète sont également déterminées (voir Figure 14). L'analyse des valeurs des différents quantiles ne montre pas de tendance particulière.

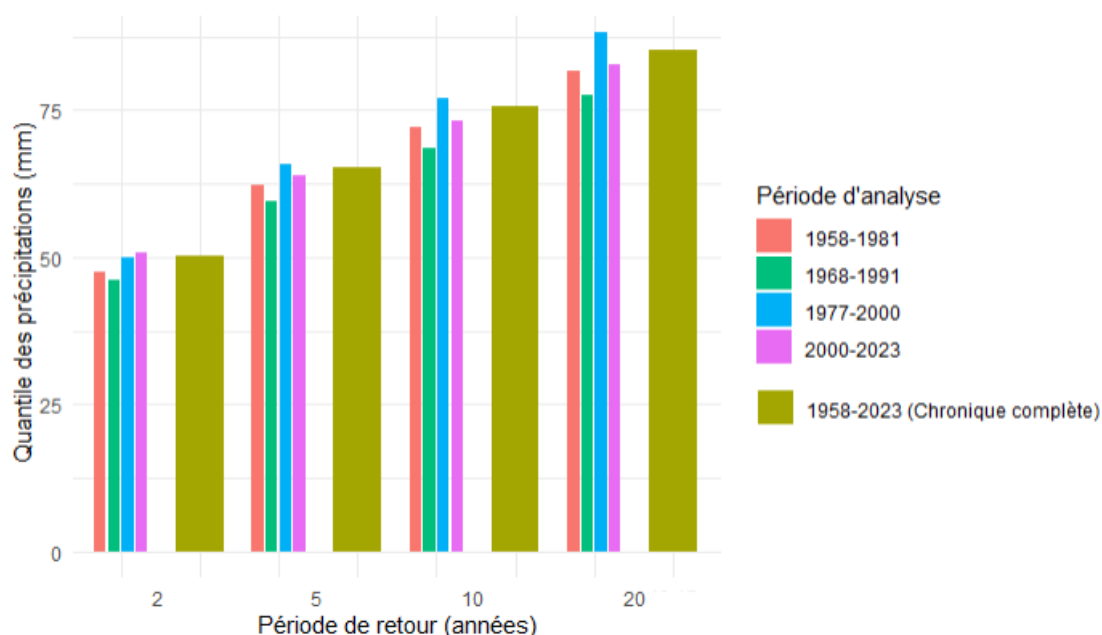


Figure 14 Comparaison des quantiles de pluies journalières pour différentes périodes : avant et après 2000 (pluviomètre du Castellet – Météo France)

Le bassin versant du Rancure est principalement influencé par un **climat méditerranéen altéré**, caractérisé par des températures élevées, un été sec et une variabilité interannuelle marquée des précipitations, bien que ses zones les plus élevées soient soumises aux influences des marges montagnardes. L'analyse des tendances pluviométriques, basée sur les données du pluviomètre de Météo France au Castellet depuis 1958, ne met pas en évidence de variation significative des cumuls annuels avant et après 2000, sauf pour une baisse notable des précipitations estivales, particulièrement en août. Enfin, l'évaluation des événements extrêmes et des quantiles de pluies sur différentes périodes ne montre pas de tendance claire à l'intensification ou à l'augmentation de leur fréquence.

⁵ Les quantiles de précipitations sont estimés à partir des valeurs maximales journalières annuelles, en ajustant une loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV) afin de déterminer, pour chaque période de retour, la hauteur de pluie correspondant à une probabilité annuelle d'occurrence de $1/T$.

2.1.3 Contexte hydrographique

Le bassin versant du Rancure couvre une superficie totale de 96 km² et s'étend sur sept communes : Entrevennes, Puimichel, Le Castellet, Oraison, Saint-Jeannet, Bras-d'Asse et Saint-Julien-d'Asse. Le bassin est délimité au nord par celui de la Bléone, et au sud et à l'est par celui de l'Asse.

Le cours d'eau principal, le Rancure, caractérisé par un linéaire total de 23,9 km, prend sa source à Saint-Jeannet, à une altitude de 880 mètres, et se jette dans la Durance à Villeneuve, à 338 mètres d'altitude. Son tracé est orienté d'est en ouest, avec des affluents majeurs en rive droite, en particulier le Puimichel qui draine un bassin versant de 33 km² à sa confluence avec le Rancure (voir Figure 15).

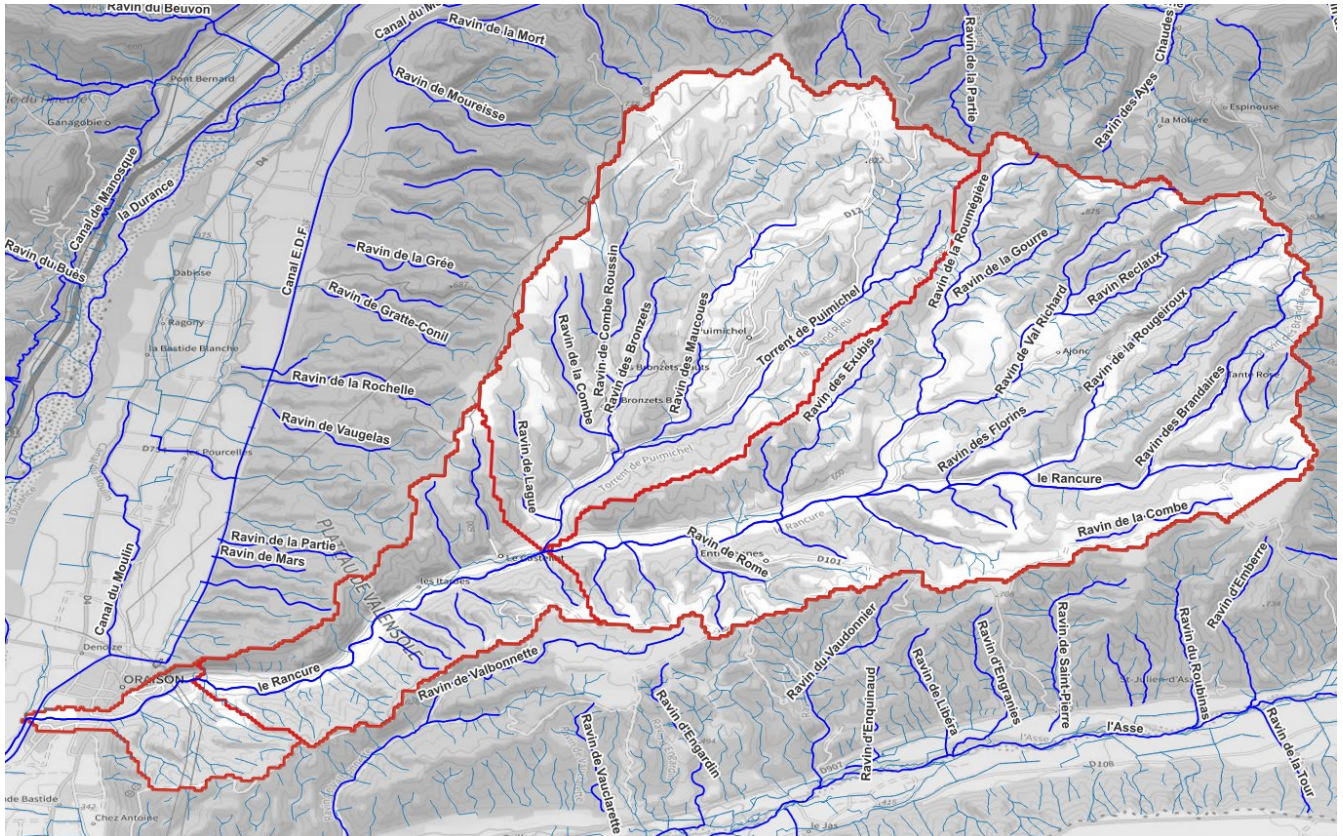


Figure 15 Cours d'eau et tronçons hydrographique du Rancure au sens de la BD Topage de l'IGN

L'analyse morphométrique d'un bassin versant permet de mieux comprendre son comportement hydrologique. Cette analyse repose sur des paramètres clés qui décrivent la forme, la structure et les caractéristiques du bassin versant ainsi que son réseau hydrographique :

- Caractéristiques géométriques (indices de forme) : surface, périmètre, longueur et largeur du rectangle équivalent, indice de Gravelius, indice de Horton
- Courbe hypsométrique et altitudes caractéristiques
- Indices de pente
- Formes du réseau hydrographique
- Densité de drainage et densité hydrographique

Cette analyse morphométrique est menée sur le bassin versant du Rancure à son exutoire mais aussi sur deux sous-bassins versants du Puimichel et du Rancure avant leur confluence (Figure 16).

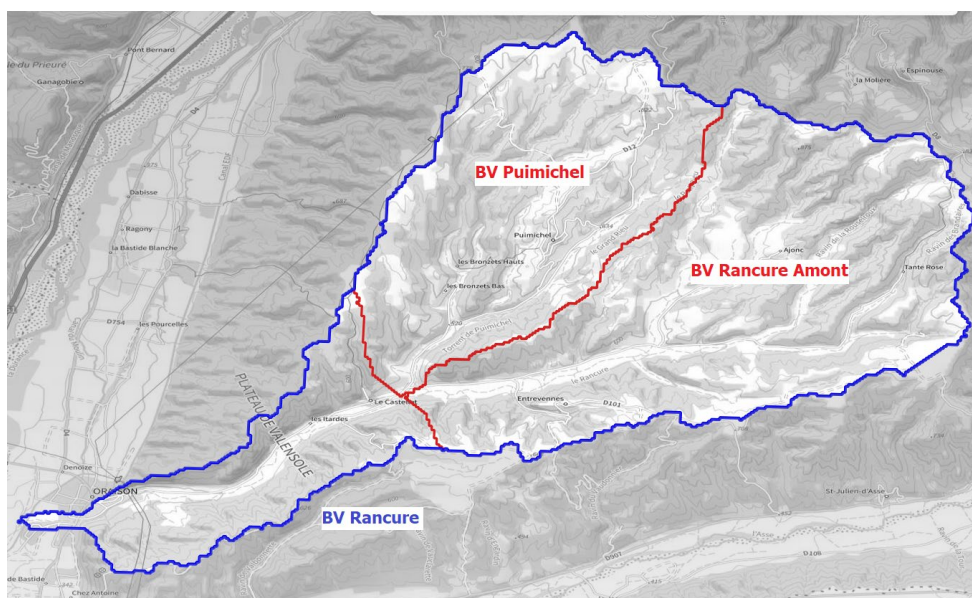


Figure 16 Délimitation du bassin versant du Rancure (amont et à l'exutoire) et du Puimichel (à la confluence avec le Rancure)

La forme du bassin versant influence l'organisation de l'écoulement et peut avoir un impact sur l'allure de l'hydrogramme associé à un événement pluvieux. Cette caractéristique est décrite à travers les dimensions du rectangle équivalent (longueur et largeur), ainsi que par des indicateurs de compacité tels que l'indice de Gravelius et l'indice de Horton (voir Tableau 3).

L'indice de Gravelius permet d'évaluer la compacité d'un bassin versant. Un bassin avec une valeur plus élevée est généralement plus allongé, tandis qu'un indice plus faible est associé à une forme plus compacte. Selon cet indicateur, le bassin du Rancure, aussi bien à la confluence avec le Puimichel qu'à son exutoire, présente une forme allongée, tandis que le bassin du Puimichel se distingue par une forme modérément compacte.

L'indice de Horton est également utilisé pour caractériser la morphologie d'un bassin versant. La valeur obtenue pour **le Puimichel** est représentative d'un **bassin à relief vallonné, avec une longueur de drainage relativement réduite**. En revanche, les valeurs observées pour **le Rancure**, aussi bien à la confluence avec le Puimichel qu'à son exutoire, suggèrent **une structure hydrographique plus développée, avec un écoulement préférentiel le long du réseau principal**.

Bassin	Surface (km ²)	Périmètre (km)	Longueur		Largeur Equivalente (km)	Indice Gravelius Kg	Indice Horton Kh
			Cours d'eau Principal (km)	Longueur Equivalente (km)			
Rancure_Amont	47	43	13.5	19.3	2.4	1.8	0.26
Puimichel	33	32	8.9	14.3	2.3	1.6	0.41
Rancure_Confl Durance	95	75	22.3	32.6	2.9	2.0	0.19

Tableau 3 Caractéristiques morphométriques du bassin versant du Rancure à son exutoire ainsi que du Puimichel et du Rancure avant leur confluence

Concernant l'altimétrie, les courbes hypsométriques et les altitudes caractéristiques sont présentées à la Figure 17 et au Tableau 4. La forme en S des courbes hypsométriques, associée à des valeurs d'indice hypsométrique avoisinant 0.55, indique que les bassins versants étudiés sont en phase de transition géomorphologique. **Cette morphologie traduit la coexistence de reliefs marqués en amont et d'une plaine plus étendue en aval, caractéristique des zones de contreforts montagneux où les dynamiques d'érosion et de dépôt influencent l'organisation du relief.**

L'indice global de pente et le dénivelé spécifique (voir Tableau 4) permettent de quantifier l'inclinaison générale du bassin et son effet sur les écoulements. L'analyse de ces paramètres met en évidence des différences entre les bassins étudiés :

- Le bassin de Puimichel présente la pente la plus marquée, en cohérence avec son relief plus contraint et son indice de Gravelius relativement faible, traduisant une morphologie plus compacte.
- Le bassin de « Rancure_Amont » affiche une pente légèrement plus douce, ce qui traduit une topographie moins contraignante et une organisation intermédiaire entre les formes compactes et allongées.
- Le bassin de « Rancure_Confl_Durance » présente la pente la plus faible, en accord avec son indice de Gravelius plus élevé, caractéristique des bassins allongés où l'écoulement est plus progressif.

Ces résultats confirment les tendances observées à travers les indices de forme (Gravelius et Horton) et suggèrent que la structure morphologique des bassins influence leur capacité à concentrer ou à disperser les écoulements.

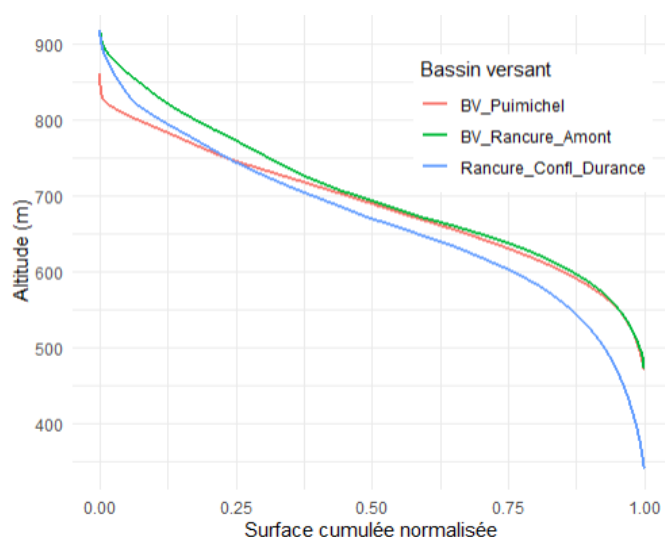


Figure 17 Courbes hypsométriques du bassin versant du Rancure à son exutoire ainsi que du Puimichel et du Rancure avant leur confluence

Bassin Versant	Altitude Min (m)	Altitude Max (m)	Altitude Médiane (m)	Indice Hypsometrie	Indice Global Pente	Dénivelé Spécifique (m)
Puimichel	472	860	689	0.55	0.018	102
Rancure_Amont	472	918	693	0.53	0.016	110
Rancure_Confl_Durance	340	918	669	0.57	0.012	109

Tableau 4 Altitudes caractéristiques du bassin versant du Rancure à son exutoire ainsi que du Puimichel et du Rancure avant leur confluence

L'analyse du réseau hydrographique complète l'évaluation morphométrique et altimétrique des bassins étudiés. Elle repose sur trois indicateurs « classiques » : la densité de drainage (Dd), la fréquence de drainage (Fd) et le facteur de texture (Td) : voir Tableau 5. Ces paramètres permettent d'évaluer l'organisation spatiale du réseau hydrographique. Cette analyse est menée à partir de la cartographie des tronçons hydrauliques de la BD Topage de l'IGN.

<i>Bassin Versant</i>	<i>Longueur Réseau</i> (km)	<i>Surface</i> (km ²)	<i>Nombre tronçons</i>	<i>Nbre Confluences</i>	<i>Densité de drainage</i> (km/km ²)	<i>Fréquence de drainage</i> (tronçons /km ²)	<i>Facteur Texture</i> (confluences /km ²)
<i>Puimichel</i>	102	33	412	220	3.15	12.5	6.7
<i>Rancure_Amont</i>	157	47	560	308	3.33	11.9	6.6
<i>Rancure_Confl_Durance</i>	317	95	975	538	3.35	10.3	5.7

Tableau 5 Caractéristiques du réseau de drainage du bassin versant du Rancure à son exutoire ainsi que du Puimichel et du Rancure avant leur confluence

La densité de drainage correspond à la longueur totale du réseau hydrographique rapportée à la surface du bassin versant (km/km²). Les valeurs obtenues sont assez élevées et homogènes entre les trois bassins versants, ce qui traduit une bonne structuration du réseau hydrographique et un maillage relativement dense.

La fréquence de drainage représente le nombre de tronçons hydrographiques rapporté à la surface du bassin versant (tronçons/km²). Le bassin de Puimichel présente la valeur la plus élevée (12.5 tronçons/km²), ce qui indique un réseau plus fragmenté. Cette segmentation est cohérente avec son indice de Gravelius modéré (1.6), qui traduit un bassin moins allongé et plus ramifié. La fréquence diminue progressivement en allant vers l'aval, avec une valeur plus faible pour le Rancure à la confluence avec la Durance. Cela correspond à un réseau plus structuré avec des tronçons plus longs et mieux connectés, en adéquation avec l'allongement du bassin et sa pente plus faible.

Le facteur de texture est le rapport entre le nombre de confluences et la surface du bassin versant (confluences/km²). Le bassin de Puimichel possède le facteur de texture le plus élevé (6.7 confluences/km²), ce qui reflète une fragmentation plus forte du réseau, cohérente avec son relief vallonné et sa pente plus marquée (Ig = 0.018 m/m).

L'analyse du réseau hydrographique du Rancure met en évidence une structuration progressive des écoulements, depuis un réseau fragmenté et ramifié en amont, notamment sur le bassin de Puimichel, jusqu'à une organisation plus linéaire et hiérarchisée vers l'aval. Cette évolution est directement influencée par la morphologie des bassins versants, où les indices de forme, de pente et d'altitude confirment une transition entre un relief vallonné en amont et une plaine plus étendue en aval.

2.1.4 Occupation du sol

Une analyse qualitative de l'occupation des sols du bassin versant du Rancure a été menée dans le cadre de la mise à jour de l'atlas des paysages des Alpes-de-Haute-Provence en 2017 [13]. Cette analyse, qui porte en réalité sur le « Plateau de Puimichel » dont la délimitation correspond peu ou prou au bassin versant du Rancure avant son entrée dans Oraison, permet de mettre en avant les éléments suivants (voir également la Figure 18 et la Figure 19 issues de la base de données OCSGE de l'IGN) :

- **Une occupation des sols fortement influencée par l'agriculture, qui se répartit principalement sur les parties hautes du plateau et les fonds de vallées** (notamment celle du Rancure et du Puimichel).
 - Les cultures dominantes sont le lavandin (omniprésent et influençant fortement le paysage), la sauge sclérée, les céréales et les prairies de fauche ainsi que les vergers de pommiers et oliveraies (localisés principalement autour des villages et hameaux).
 - **Recul de l'agriculture traditionnelle (cultures au sec + élevage) au profit de cultures céréalières et lavandin** et une transformation progressive des terres : certaines parcelles agricoles abandonnées sont soit remises en culture, soit laissées en friche.
- **Une occupation des sols également structurée par des formations végétales naturelles, témoins des évolutions agricoles et climatiques.** Autrefois largement exploitées pour l'élevage et les cultures, **certaines zones connaissent aujourd'hui un recul des activités**

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

agricoles traditionnelles, entraînant un phénomène de friche et d'embroussaillage. Les parcours à moutons, qui structuraient autrefois l'espace rural, se réduisent au profit d'une reprise de la végétation spontanée, modifiant ainsi la physionomie du territoire. Les formations boisées jouent un rôle central dans cette transformation. Au sud et à l'ouest du plateau, l'influence méditerranéenne favorise la présence de chênes verts, de pins d'Alep et de chênes blancs, tandis qu'à l'intérieur et au nord-est, où l'influence méditerranéenne est moindre, on retrouve des boisements morcelés de feuillus et des taillis. Les ripisylves, présentes le long des cours d'eau intermittents et du Rancure, contribuent également à la diversité écologique locale.

- Une occupation des sols également influencée par l'activité humaine et les dynamiques agricoles contemporaines. **Le bassin versant du Rancure demeure faiblement urbanisé, avec un habitat dispersé constitué principalement de villages perchés et d'exploitations isolées.**

L'occupation des sols du bassin versant du Rancure repose ainsi sur une coexistence entre agriculture et milieux naturels, avec une dominance de cultures (lavandin, céréales) et de boisements en extension. **Les dynamiques actuelles entraînent une transformation progressive du paysage, marquée par la réduction des zones agricoles traditionnelles et l'extension des formations forestières et arbustives.**

D'un point de vue quantitatif, les résultats de cette analyse se retrouvent dans la répartition des usages et de l'occupation des sols à l'échelle du bassin versant du Rancure où (voir Figure 20) :

- la sylviculture (in fine les forêts) et l'agriculture représentent respectivement 60% et 33% de la surface totale du territoire ;
- les feuillus recouvrent 52% du bassin versant et les formations herbacées et arbustives 37%.

Concernant l'évolution de l'occupation des sols avec le recul des surfaces cultivées au profit d'espaces en friche voire d'espaces boisées, celle-ci est visible dans une certaine mesure sur la comparaison de l'occupation des sols de la base Corine Land Cover (issue de photo-interprétation d'images satellitaires) entre le millésime 1990 et 2018 (voir Figure 21). Ainsi près de 300 hectares (3km², 3% de la surface du bassin versant) sont passés d'une végétation arbustive à une forêt de feuillus.

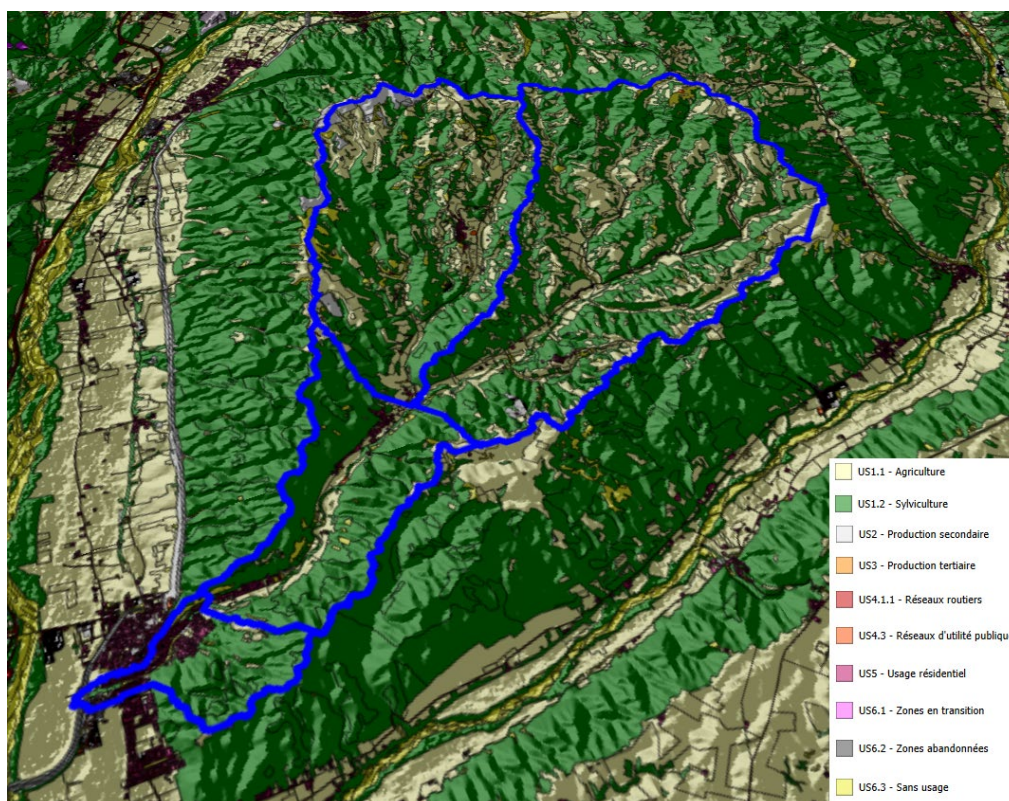


Figure 18 Occupation des sols (2021) du bassin versant du Rancure : type d'usage (OCSGE IGN)

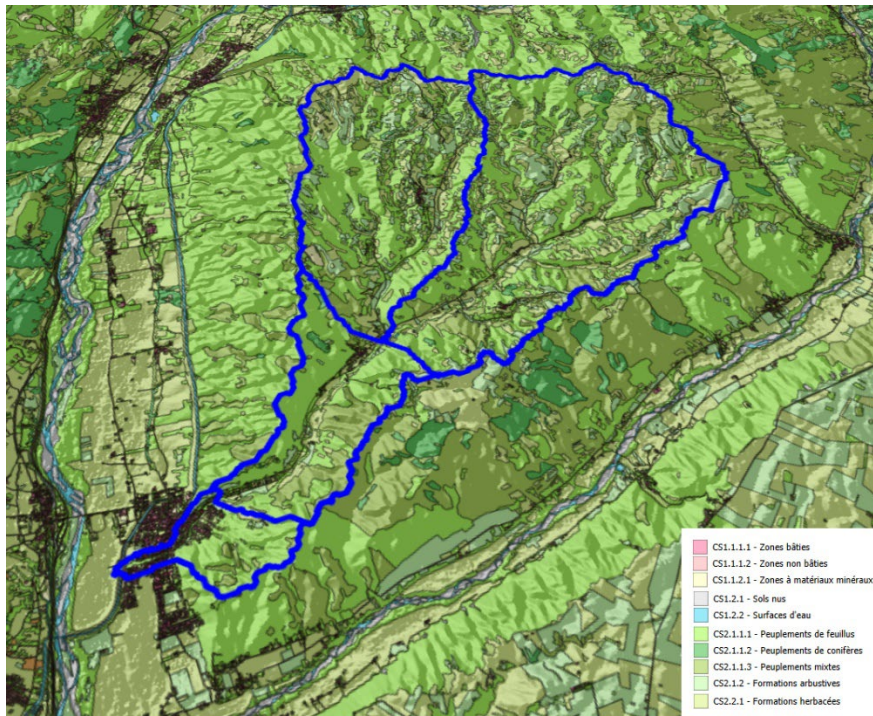


Figure 19 Occupation des sols (2021) du bassin versant du Rancure : type d'occupation (OCSGE IGN)

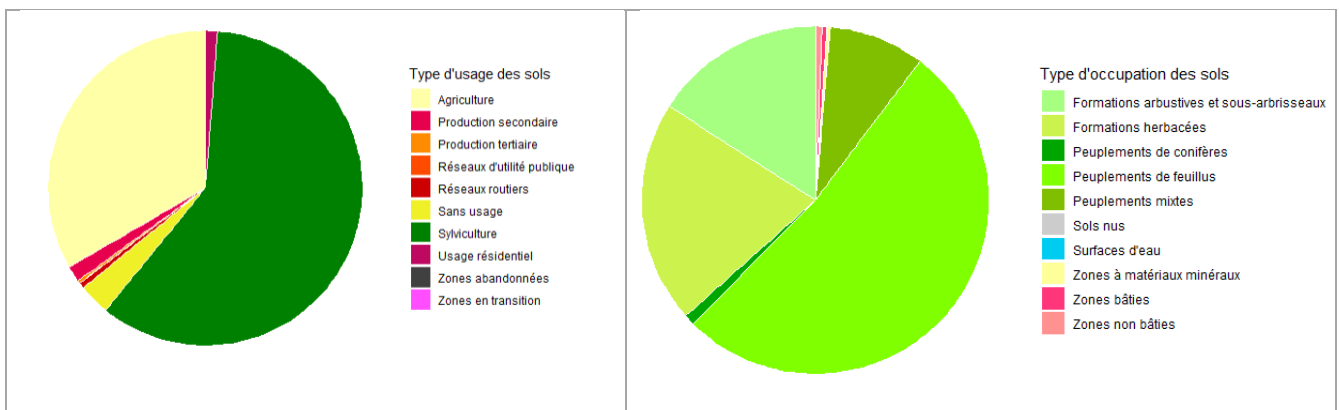


Figure 20 Répartition de l'usage (à gauche) et de l'occupation (à droite) des sols sur le bassin versant du Rancure (données OCSGE IGN)

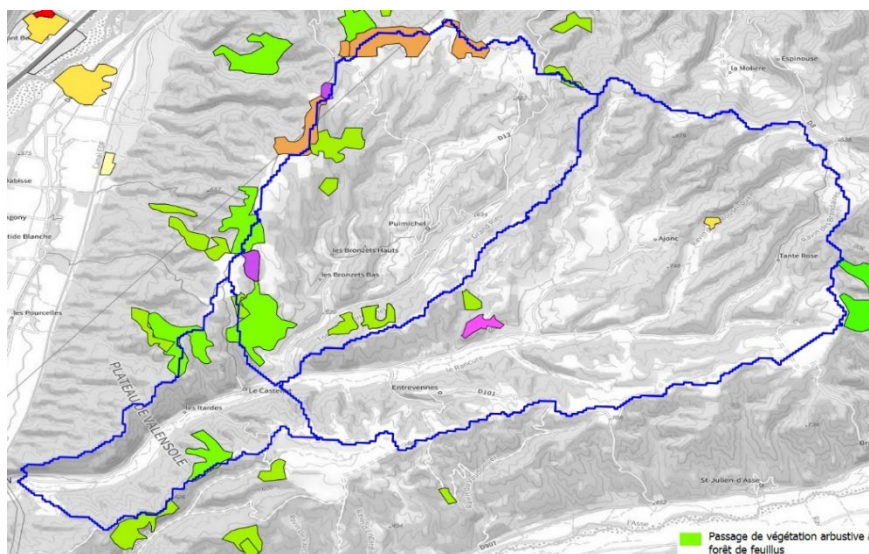


Figure 21 Zones d'évolution de l'occupation des sols entre 1990 et 2018 (source : Corine Land Cover)

2.2 Contexte pluviométrique et hydrologique

Une analyse approfondie du régime pluviométrique et hydrologique du bassin versant du Rancure est menée, afin de mieux caractériser les dynamiques des précipitations et leur influence sur les écoulements et le transport solide.

2.2.1 Analyse pluviométrique

2.2.1.1 Données de pluies disponibles

Les données pluviométriques du bassin versant du Rancure proviennent de plusieurs sources complémentaires : le pluviomètre de Météo France au Castellet, qui offre une chronique longue des précipitations journalières depuis 1958, ainsi que les produits de réanalyse et/ou d'observation SAFRAN, COMEPHORE et ANTILOPE, permettant une couverture spatiale et temporelle plus détaillée des précipitations à différentes échelles : voir Tableau 6.

Source	Type de données	Période de disponibilité	Résolution spatiale	Résolution temporelle
Pluviomètre du Castellet	Mesures in situ (station Météo-France)	Depuis 1958	Point unique (station)	Quotidienne
SAFRAN	Réanalyse météorologique basée sur les observations	Depuis 1958	8 km	Quotidienne
COMEPHORE	Radar et stations météo combinés	Depuis 1997	1 km	Horaire
ANTILOPE	Estimation radar + correction par stations météo	Depuis 2007	1 km	15 mins et Horaire

Tableau 6 Données pluviométriques disponibles sur le bassin versant du Rancure (Météo France)

Outre ces données de pluies observées, il est également intéressant d'utiliser les pluies SHYREG qui ont été mises à jour en France hexagonale en 2019. En effet la méthode SHYPRE, développée par l'INRAE depuis une vingtaine d'années, permet de générer ponctuellement de longues chroniques de pluies synthétiques afin d'estimer des quantiles de pluies de différentes durées (1h à 72h). La version régionalisée appelée SHYREG permet d'avoir des quantiles de pluies jusqu'aux fréquences très rares sur l'ensemble d'un territoire à l'échelle kilométrique ([14], [15]) : voir Figure 22.

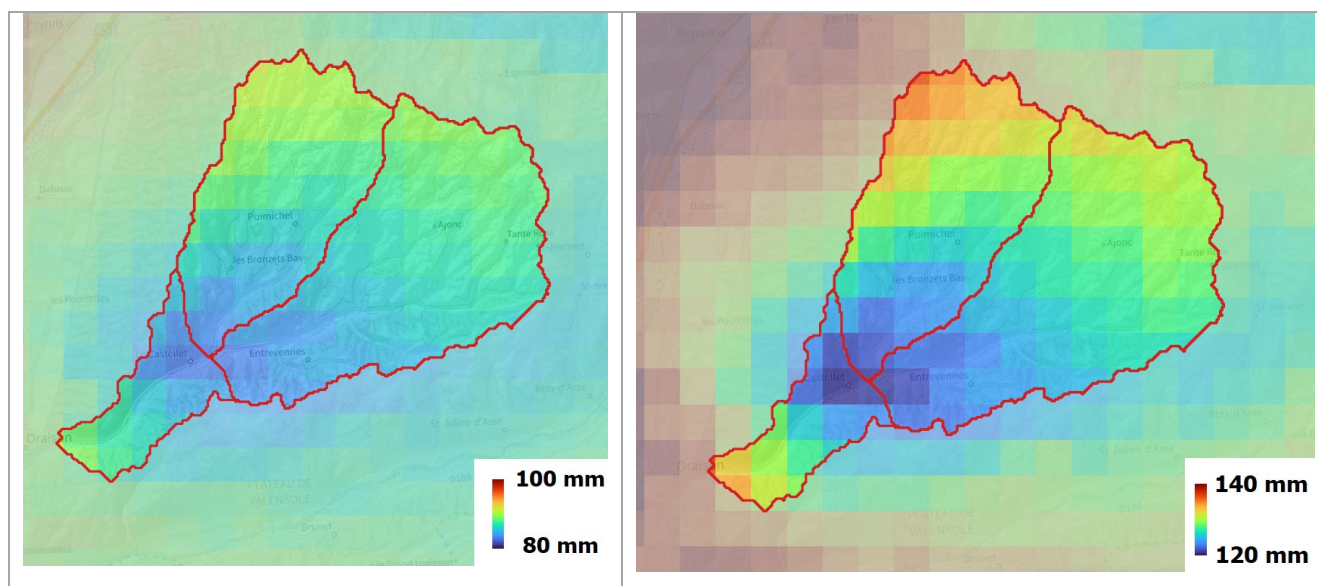


Figure 22 Cartes des quantiles de pluie pour une durée de 24h et différentes périodes de retour (à gauche : 10 ans et à droite : 100 ans) issues de la base SHYREG 2019

Afin d'estimer la variabilité des résultats selon les sources de données, celles-ci sont comparées sur des durées de cumuls communes à savoir « Pluie Journalière » et « Pluie 24h ». Un ajustement de la loi généralisée des valeurs extrêmes « GEV » est réalisé, pour les pluies des bassins versants⁶ dont le contour est décrit à la Figure 22, sur l'ensemble de la chronique du pluviomètre du Castellet ainsi que sur celles de la base SAFRAN et COMEPHORE (voir Tableau 7). Les Figure 23 et Figure 24 présentent les graphiques « Q-Q plot » pour les différents ajustements « GEV » réalisés. Un Q-Q plot (Quantile-Quantile plot) est un outil graphique permettant de vérifier si une distribution empirique suit une loi théorique donnée (dans notre cas : loi GEV). Il compare les quantiles observés des données avec les quantiles théoriques attendus sous l'hypothèse de la loi choisie.

Bassin Versant	Pluies Journalières (mm)			Pluies 24h (mm)	
		T10ans / T100ans		T10ans / T100ans	
	Pluviomètre Castellet	SAFRAN	COMEPHORE	COMEPHORE	SHYREG avec Abattement
Puimichel		66 / 89	79 / 103	86 / 127	81 / 119
Rancure_Amont	75 / 108	70 / 100	79 / 115	88 / 167	81 / 119
Rancure_Entrée Oraison		68 / 96	77 / 102	86 / 153	80 / 117

Tableau 7 Quantile 10ans et 100 ans des de pluies journalières et pluies 24h selon les différentes sources de données disponibles

Les ajustements GEV sur les pluies journalières montrent une bonne adéquation aux données. Toutefois, bien que la chronique SAFRAN soit d'une durée similaire à celle du pluviomètre du Castellet, les quantiles de pluie qu'elle fournit sont environ 10% inférieurs, sans doute en raison de sa résolution spatiale de 64 km², moins adaptée aux bassins versants de taille modérée (~95 km²). À l'inverse, bien que COMEPHORE dispose d'une chronique plus courte, ses quantiles journaliers restent proches de ceux du pluviomètre du Castellet, avec un écart inférieur à 5%. Ainsi, en première intention, dans le cadre de l'analyse statistique des précipitations, les données SAFRAN ne seront pas retenues.

⁶ Les pluies distribuées issues des produits SAFRAN, COMEPHORE et ANTILOPE ont été moyennées spatialement sur l'ensemble du bassin versant du Rancure (et de certains sous-bassins versants) afin d'obtenir des pluies de bassin homogènes.

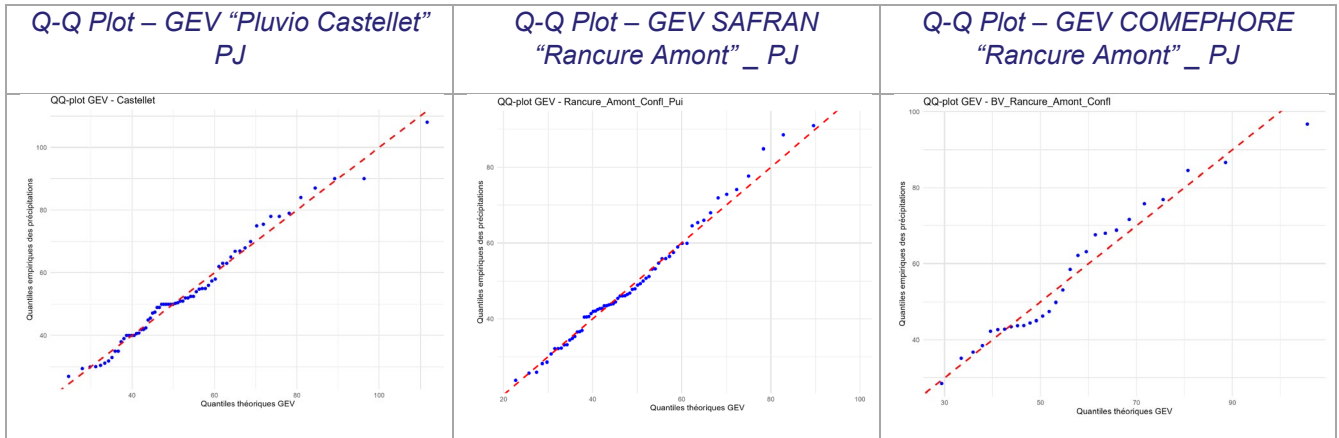


Figure 23 Graphiques « Q-Q plot » pour l'ajustement GEV sur les pluies journalières pour le pluviomètre du Castellet et sur les pluies journalières de bassin du Puimichel (à sa confluence avec le Rancure) pour les bases SAFRAN et COMEPHORE

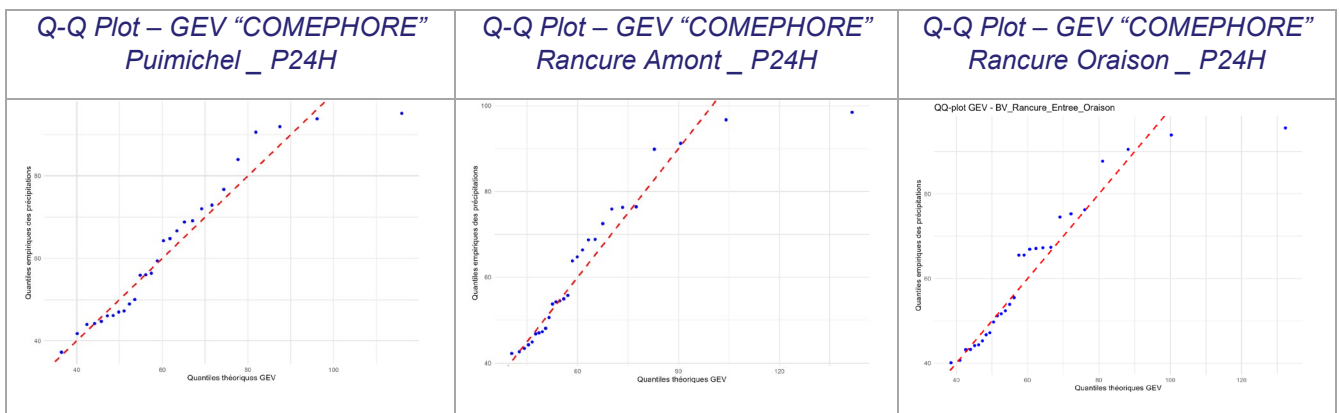


Figure 24 Graphiques « Q-Q plot » pour l'ajustement GEV sur les pluies 24h des trois bassins versants considérés : Puimichel, Rancure Amont et Rancure à l'entrée d'Oraison (base COMEPHORE)

Pour comparer les quantiles des pluies 24h entre COMEPHORE et SHYREG Pluie, un coefficient d'abattement a été appliqué aux données SHYREG, conformément à l'étude de Gaume et al. (2001) [16]. Ce coefficient est nécessaire car, dans SHYREG Pluie, la période de retour est identique sur l'ensemble des pixels du bassin versant, alors que la répartition spatiale des précipitations est plus hétérogène dans la réalité. La loi d'abattement dépend à la fois de la surface du bassin versant et de la durée des cumuls considérés.

La comparaison des quantiles abattus SHYREG et COMEPHORE montre une bonne cohérence pour la période de retour 10 ans, mais un écart significatif (~20%) pour la période de retour 100 ans, en raison de la durée limitée de la chronique COMEPHORE et des mauvais ajustements de la loi GEV sur la queue de distribution (voir Figure 24). Cet écart sera à prendre en compte dans les analyses statistiques des précipitations.

2.2.1.2 Estimation des temps de concentration

Dans un premier temps, il est intéressant de contextualiser le forçage météorologique de la zone d'études en s'intéressant à la typologie des événements ayant entraîné les événements pluvieux les plus forts sur des durées de cumuls :

- proches du temps de concentration des bassins versants étudiés, qui peuvent amener les débits de pointe les plus forts,
- supérieures à ces temps de concentration, qui peuvent entraîner des volumes d'écoulement importants.

Avant de mener cette analyse, il est nécessaire de **déterminer le temps de concentration des trois bassins versants étudiés**. De manière théorique, le temps de concentration représente le temps

nécessaire à une goutte d'eau tombée sur le point le plus éloigné de l'exutoire du bassin versant pour rejoindre cet exutoire.

Ce temps de concentration peut notamment être estimé :

- à partir de l'analyse d'événement historique, ou plus précisément à partir des temps de réponse (lag time) observés sur des événements historiques,
- à partir de formules empiriques.

Le temps de concentration est utilisé dans de nombreuses méthodes pour déterminer des quantiles de débit, et bien que sa définition semble univoque, sa valeur dépend fortement de la méthode utilisée pour le définir. De plus, il convient de souligner que le temps de concentration d'un bassin versant n'est pas constant mais dépend de l'intensité de la pluie nette⁷.

Il existe dans la littérature plusieurs formules pour estimer le temps de concentration (Passini, Ventura, Kirpich, etc.). Ces formules présentent des domaines de validité, cependant ces domaines ne sont pas définis de manière précise et reposent généralement sur les conditions dans lesquelles elles ont été développées (tailles, pentes des bassins versants de l'échantillon testé). Une synthèse bibliographique (Savary, 2018) [17] consacrée aux différentes formulations du temps de concentration préconisées pour des bassins-versants ruraux ou naturels a permis de dégager trois formules notamment celle de Simas-Hawkins, dont la validité semble acceptable dans des contextes à la fois géographiques et pluviométriques suffisamment larges :

$$t_c = 4.081 \times \left(\frac{A}{L}\right)^{0.594} \times I^{-0.1505} \times \left(\frac{1000}{CN} - 10\right)^{0.3131}, \text{ avec :}$$

- A : Superficie du bassin versant (ha) ;
- L : Longueur du plus long parcours de l'eau (m) ;
- I : Pente équivalente du bassin versant (m/m)
- CN : Coefficient d'aptitude des sols au ruissellement, lié à la nature du sol et à sa végétalisation ("curve number" de la méthode SCS)

La non-prise en compte de paramètres liés à la période de retour des événements pluviométriques peut s'expliquer par le fait que cette formule a été calée pour les plus fortes précipitations des régions pour lesquelles elle a été établie (Etats-Unis, précipitations de période de retour probablement au moins décennale). Son emploi ne doit s'accompagner que de valeurs de CN inférieures à 95. Cette formule fait intervenir la largeur du bassin versant avec une puissance positive (alors que c'est généralement la longueur qui intervient de cette façon). Cette apparente anomalie s'explique probablement par le fait que les bassins versants utilisés pour le calage de cette formule avaient des pentes transversales beaucoup plus fortes que leurs pentes longitudinales, ce qui est souvent le cas dans les zones de montagne.

L'application de la formule de Simas & Hawkins (avec une valeur min et max du Curve Number) est réalisée sur les trois bassins étudiés afin d'estimer le temps de concentration. En complément, d'autres formules issues de la littérature sont également testées, permettant ainsi une comparaison des résultats et une évaluation de la variabilité des estimations obtenues en fonction des différentes approches empiriques (voir Tableau 8).

L'analyse des différentes formules empiriques montre une certaine variabilité des estimations du temps de concentration selon la méthode utilisée. La formule de Carter fournit systématiquement les valeurs les plus faibles, ce qui peut conduire à une surestimation des débits de pointe, tandis que la formule de Turazza donne des valeurs très élevées, suggérant un ruissellement beaucoup plus lent que ce qui est observé sur le terrain. Les formules intermédiaires, telles que Giandotti, Kirpich, Passini, Ventura et Simas-Hawkins, offrent des estimations plus cohérentes et adaptées aux caractéristiques morphologiques des bassins étudiés. Compte tenu des écarts extrêmes observés, les résultats obtenus

⁷ La pluie nette correspond à la part des précipitations totales qui contribue effectivement au ruissellement, une fois déduites les pertes par interception, infiltration et rétention temporaire dans le sol ou la végétation.

avec Carter et Turazza sont écartés, afin de privilégier une approche plus équilibrée et représentative des processus hydrologiques réels.

IDBNBV	Carter (h)	Giandotti (h)	Kirpich (h)	Passini (h)	Turazza (h)	Ventura (h)	Simas Hawkins (h) CNmin/CNmax
Domaine d'applica- bilité	<i>Petits bassins versants avec des pentes modérées à fortes, résultats proches de la méthode NRCS</i>	<i>Bassins versants naturels de taille modérée (quelques dizaines à centaines de km²), Europe</i>	<i>Petits bassins versants à forte pente (souvent < 50 km²)</i>	<i>Bassins de taille moyenn e avec pente faible à modérée</i>	<i>Bassins de grande taille, souvent utilisés pour des contextes italiens</i>	<i>Bassins de taille moyenne à grande avec des conditions de ruissellement spécifiques</i>	<i>Méthode intégrant le Curve Number (CN), sensible aux conditions d'humidité du sol</i>
Rancure Amont	0,5	1,9	1,6	4,8	7,5	4,6	5,9 / 3,1
Puimichel	0,4	1,6	1,3	3,7	6,2	3,6	5,4 / 2,8
Rancure_ Entree_Or aison	0,6	2,7	2,4	7,5	10,3	7,1	7,1 / 3,7

Tableau 8 Temps de Concentration (heure) à partir des formules empiriques

Outre l'application de formules empiriques, le temps de concentration peut être estimé à partir des temps de réponse (lag time) observés sur des événements historiques. Cependant, le bassin versant du Rancure ne disposant pas de stations hydrométriques, cette analyse ne peut être conduite sur des données observées.

Dans le cadre de cette étude, une modélisation hydraulique bidimensionnelle (2D) est mise en œuvre à l'échelle du bassin versant, avec une prise en compte directe de la pluie comme condition de forçage (Cartino2D_Pons et al., 2021) [18] – cf. paragraphe 4. Cette modélisation s'appuie sur une sectorisation des zones « pluie » et « débit » réalisée à partir de premières simulations conduites sur une grille de calcul de 25 m.

Trois types d'hyétogrammes sont injectés dans les mailles de calcul (voir Figure 25) :

- une « pluie déluge », correspondant aux records historiques observés sur l'arc Méditerranéen pour chaque durée de cumul considérée,
- une pluie SHYREG de période de retour 10 ans (T10),
- une pluie SHYREG de période de retour 100 ans (T100).

L'objectif de cette approche est d'encadrer la valeur des temps de réaction, ces derniers étant fortement dépendants des caractéristiques du forçage hydrométéorologique et des conditions d'infiltration adoptées. Pour cette étude, une humidité initiale des sols de type AMC2 est retenue (AMC = 2, cf. paragraphe 4).

Par ailleurs, les paramètres hydrologiques (Curve Number) et hydrauliques (coefficient de Strickler) sont échantillonnés à une résolution de 25 m à partir de l'occupation des sols, afin de spatialiser de manière plus réaliste les processus de ruissellement et de propagation.

Les temps de réaction sont analysés à partir de l'écart temporel entre le « pic de pluie » (sommet de l'hyétogramme injecté dans la maille considérée) et le « pic de crue » (sommet de l'hydrogramme modélisé pour la même maille). Le résultat obtenu sur l'ensemble du bassin pour le cas « pluie déluge » est présenté à la Figure 25. Les temps de réaction obtenus, au niveau des secteurs considérés

(Puimichel, Rancure Amont et Rancure Entrée Oraison), pour chacun des trois scénarios de pluies modélisés, sont présentés au Tableau 9.

Les temps de réaction obtenus varient de 0,5 h à 10 h selon le scénario de pluie. Comme attendu, les temps de réaction sont plus courts pour le scénario « pluie déluge » (entre 0,5 h et 1 h), traduisant une réponse rapide du bassin face à un événement extrême. Les temps de réaction augmentent significativement pour les scénarios SHYREG, atteignant jusqu'à 10 h en entrée d'Oraison pour un événement de période de retour 10 ans. Ces résultats illustrent l'influence déterminante du type de forçage hydrométéorologique sur la dynamique de réponse du bassin.

A partir du temps réponse (ou lag time), le temps de concentration peut être déduit suivant la formule issue de la méthode du Soil Conservation Service (SCS) :

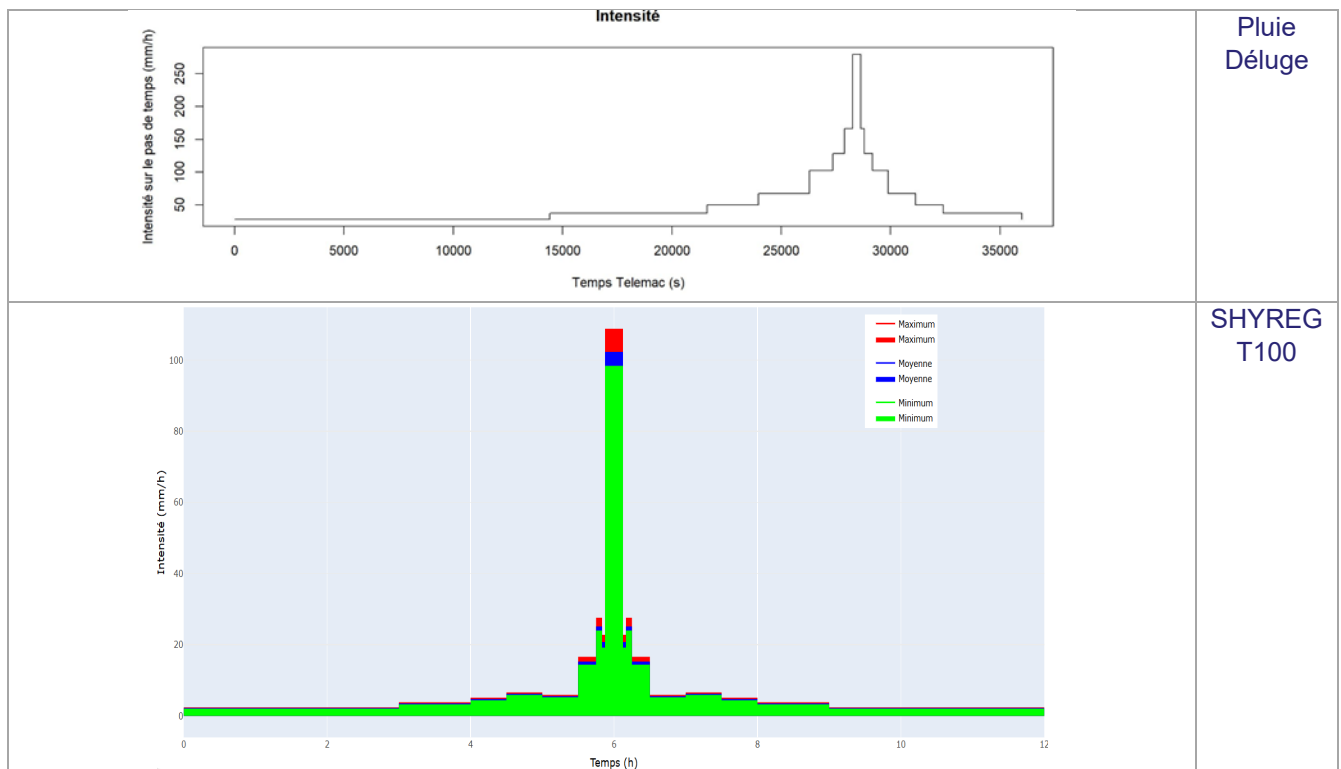
$$Tl_{ag} = 0.6 * T_c$$

Avec :

- T_{lag} : temps de réponse en heure,
- T_c : Temps de concentration en heure.

Les temps de concentration obtenus à partir de la modélisation hydraulique préliminaire pour la pluie « déluge » sont donc autour de 1h30 pour le Puimichel et le Rancure Amont, et de l'ordre de 1h45 pour le Rancure à l'entrée d'Oraison. Au regard des conditions de forçage hydrométéorologiques particulièrement extrêmes associées à ce scénario, ces valeurs peuvent être considérées comme une borne minimale des temps de concentration du bassin versant.

Par ailleurs, les temps de réaction obtenus pour le scénario SHYREG T100 permettent d'approcher des valeurs plus représentatives d'un comportement typique du bassin face à des événements significatifs. Les temps de concentration estimés sont de l'ordre de 5h00 pour le Puimichel et le Rancure Amont, et de 7h00 pour le Rancure à l'entrée d'Oraison. Ces valeurs peuvent être considérées comme des temps de concentration « moyens » du bassin, traduisant une réponse hydrologique caractéristique dans des conditions de pluie intense.



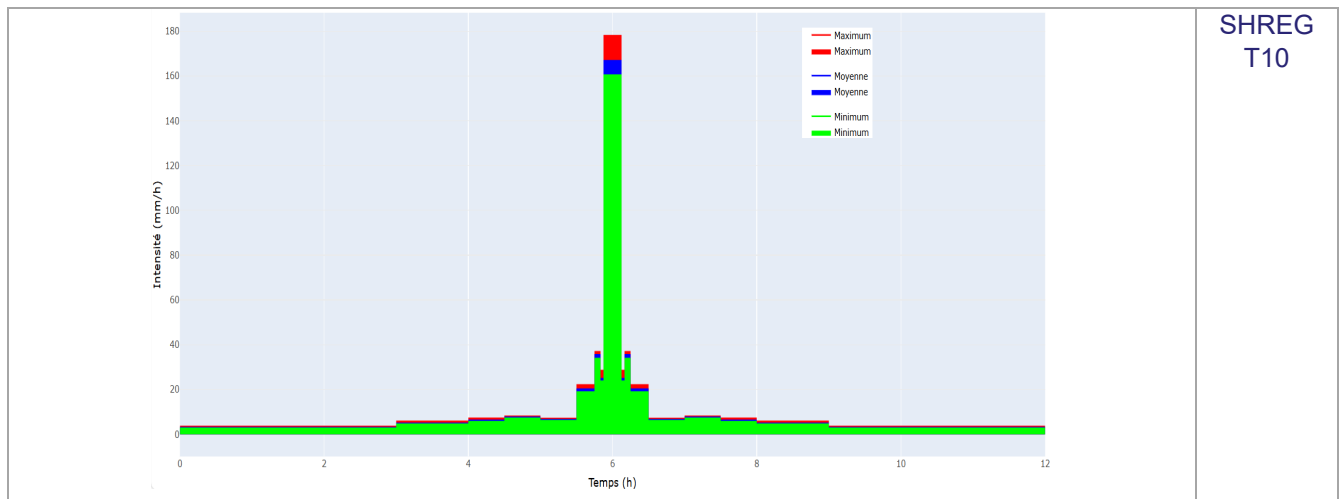


Figure 25 Hyétogrammes injectés sur chaque maille de la grille de calcul (pas de 25m) : pluie « déluge » et SHYREG T100/T10 (les courbes représentent respectivement les valeurs minimales, moyennes et maximales des hyétogrammes SHYREG spatialisés sur le bassin)

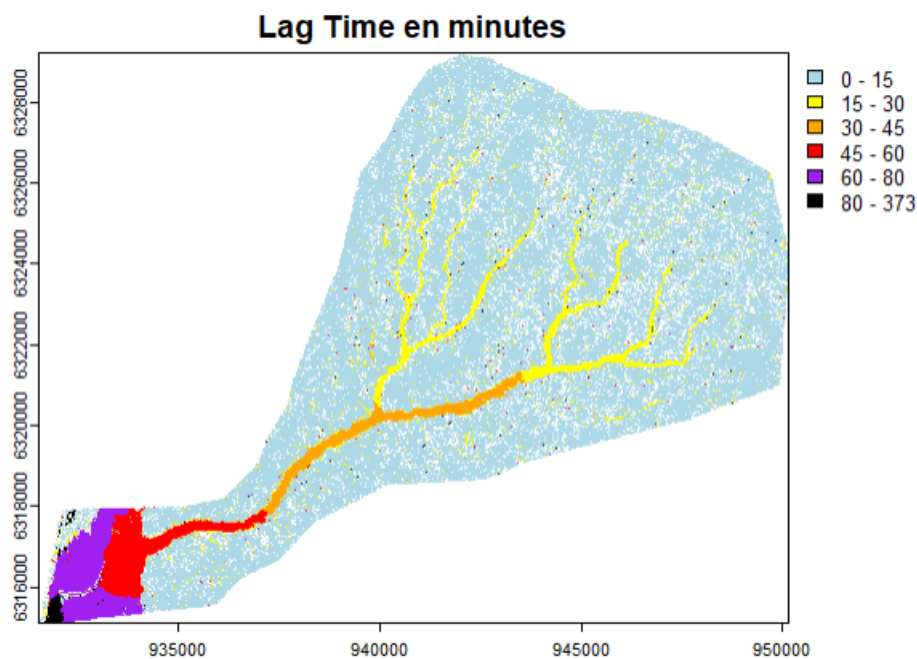


Figure 26 Résultats de la modélisation préliminaire sur une grille de calcul au pas de 25 m avec une pluie « déluge » : temps de réaction

IDBNBV	Temps de réaction (h)		
	SHYREG T10	SHYREG T100	Pluie Déluge
Rancure Amont	8	3	0.5
Puimichel	8	3	0.75
Rancure_Entree_Oraison	10	4	1

Tableau 9 Temps de réaction (heure) pour chaque scénario de pluie modélisé

Les temps de concentration des bassins versants étudiés ont été estimés à partir de deux approches complémentaires : d'une part, par l'application de formules empiriques (Giandotti, Kirpich, Passini, Ventura et Simas-Hawkins) et, d'autre part, par une modélisation hydrologique prenant en compte la pluie comme condition de forçage. **Les formules empiriques fournissent des estimations comprises entre 2 et 7 heures**, illustrant la variabilité des méthodes.

La modélisation réalisée avec un hyétogramme SHYREG de période de retour 100 ans (T100) fournit des temps de réponse qui, appliqués à la relation du Soil Conservation Service, permettent d'estimer des temps de concentration de l'ordre de 5 heures pour Puimichel et Rancure Amont, et d'environ 7 heures pour le Rancure à l'entrée d'Oraison. Ces valeurs peuvent être considérées comme des temps de concentration moyens, reflétant la réponse typique du bassin face à des événements significatifs.

Au regard de l'ensemble des résultats, il apparaît cohérent de retenir une gamme de durées de cumul comprises entre 3 et 6 heures pour représenter la dynamique de réponse hydrologique des bassins versants étudiés.

2.2.1.3 Contexte hydrométéorologique

L'analyse porte sur trois bassins versants sélectionnés : « BV_Pui_Amont_Confl », « BV_Rancure_Amont_Confl » et « BV_Rancure_Entree_Oraison ». Pour chaque durée de cumul, les quinze événements les plus intenses sont identifiés à partir des données COMEPHORE. Ce nombre limité d'événements a été retenu afin de focaliser l'analyse sur les épisodes les plus extrêmes et représentatifs, tout en garantissant leur indépendance (aucun événement sélectionné ne provient d'une même séquence pluvieuse). Les événements ainsi retenus sont ensuite regroupés selon la saison de leur occurrence, et une analyse statistique est menée pour déterminer la répartition des cumuls maximaux entre les différentes saisons et pour chaque durée de cumul considérée (voir Figure 27).

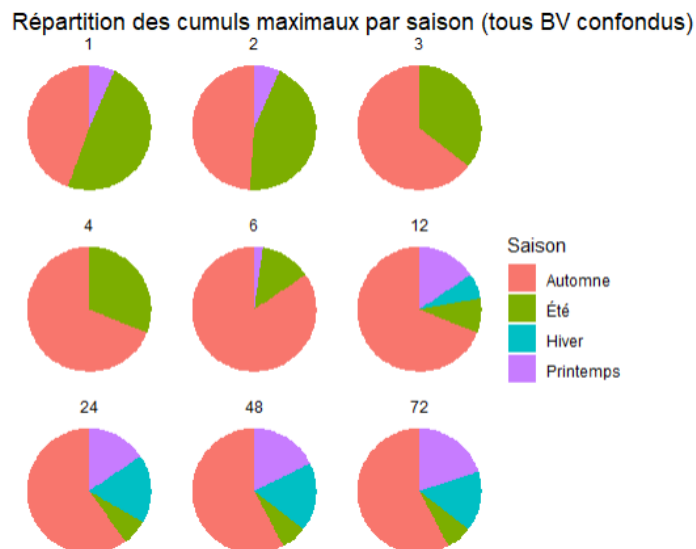


Figure 27 Répartition, en fonction des saisons, des 15 événements pluvieux les plus importants pour différentes durées de cumuls (de 1h à 72h).

L'analyse de la répartition des cumuls maximaux par saison, réalisée pour différentes durées de cumul et en regroupant l'ensemble des bassins versants étudiés, met en évidence une nette dominance des événements pluvieux en automne. Quel que soit l'intervalle de cumul considéré, cette saison apparaît comme la plus propice aux précipitations maximales, suggérant une influence majeure des systèmes météorologiques automnaux sur l'intensité des précipitations.

L'été, bien que moins représenté, contribue également aux cumuls maximaux, en particulier pour les durées les plus courtes. Cette présence estivale est vraisemblablement associée à des épisodes orageux convectifs, souvent localisés mais caractérisés par des intensités horaires élevées. En revanche, **l'hiver et le printemps** sont plus faiblement représentés, bien que leur **influence semble plus marquée lorsque la durée de cumul augmente**. Ce phénomène pourrait traduire une

prépondérance des **systèmes perturbés d'origine océanique ou méditerranéenne, capables de générer des précipitations continues sur plusieurs heures ou jours, mais généralement moins intenses que celles observées en automne.**

L'analyse met en évidence une nette dominance des événements pluvieux en automne, indépendamment de la durée de cumul considérée. **En première intention, cette homogénéité saisonnière ne permet pas d'identifier distinctement une typologie d'événements pluvieux propre à l'automne** qui différencierait les précipitations intenses mais brèves, caractérisées par des cumuls importants sur de courtes durées, de celles associées à des épisodes plus longs et plus étendus, où les cumuls horaires sont plus modérés mais les cumuls totaux élevés. L'automne semble ainsi être une période où la variabilité des précipitations extrêmes est importante, rendant difficile une classification simple des événements selon leur dynamique temporelle.

Afin de mieux caractériser la typologie des événements pluvieux susceptibles d'influencer la réponse hydrologique des bassins étudiés, **une analyse complémentaire est nécessaire. Celle-ci doit s'attacher à évaluer la dépendance des cumuls sur des courtes durées, proches du temps de concentration des bassins versants du Rancure, qui conditionnent les débits de pointe, et sur des durées plus longues, susceptibles d'entraîner des volumes d'écoulement plus importants.** Une telle approche permettrait de préciser le type de forçage hydrométéorologique à prendre en compte dans les études de gestion des risques hydrologiques et d'anticipation des crues.

2.2.1.4 Analyse bivariée des pluies

◊ Contexte méthodologique

L'objectif de cette **analyse bivariée sur les pluies** est de caractériser la typologie des bassins versants d'étude au regard de leur régime potentiel de crues. En l'absence de données hydrométriques sur le Rancure et le Puimichel, **la méthode établie par (Evin et Piton, 2020) [19] pour des cours d'eau torrentiels des Alpes et des Pyrénées est adaptée pour être menée sur les pluies.**

Les travaux d'(Evin et Piton, 2020) [19] ont consisté à développer et implémenter une méthode statistique permettant l'estimation de niveaux de retour dans un contexte bivarié pour caractériser les crues torrentielles avec le débit de pointe et la durée équivalente (voir Figure 28). La durée équivalente (en heures) est la durée correspondant au volume et débit maximum de la crue pour un hydrogramme triangulaire.

Différentes étapes sont nécessaires pour établir ces niveaux de retour :

- Ajustement statistique des marginales⁸ « classiques » à partir d'une sélection automatique sup-seuil des principales crues des cours d'eau concernés : débit maximum (Q_{max}) avec une loi de Pareto généralisée et durée équivalente ($deqv$) avec une loi Gamma.
- Ajustement statistique des copules Archimédiennes (Gumbel ou Clayton) qui permettent de modéliser la dépendance entre les deux marginales.
- Choix et détermination des périodes de retour dans un contexte bivarié à partir de la définition de période de retour de survie de Kendall ([20], [21]) qui permet d'estimer dans un graphique de valeurs (pic de crue, durée) un contour le long duquel le temps de retour t du couple de valeurs (pic de crue, durée) est connu. En effet dans les contextes multivariés (plus d'une variable est nécessaire pour caractériser l'évènement), la notion de période de retour n'a plus de définition mathématique unique, il est alors nécessaire d'en définir une. La période de retour de survie de Kendall peut s'interpréter comme une fonction de dépassement d'un niveau de probabilité. Elle est définie comme le temps moyen séparant deux évènements critiques correspondant à un niveau de probabilité t .

⁸ En statistique multivariée, une « marginale » désigne la loi de probabilité d'une seule variable considérée isolément, obtenue en « marginalisant » (c'est-à-dire en intégrant ou en ignorant) les autres variables. Dans le cas présent, il s'agit des distributions univariées ajustées respectivement sur le cumul de pluie (CMDtc) ou le cumul total précipité, indépendamment de leur dépendance mutuelle.

A partir de l'application de cette méthode sur les données hydrométriques disponibles pour le contexte montagneux alpin et pyrénéen, trois régimes de comportements ont été identifiés : un régime de crues éclair, un régime de crues longues et un régime intermédiaire (voir Figure 29).

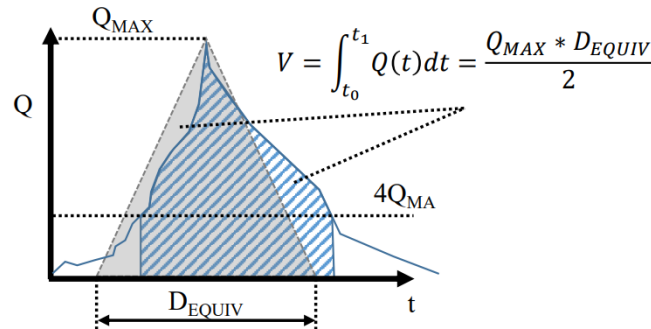


Figure 28 Schéma d'une crue réelle (courbe bleue) avec la détermination d'une durée de crues équivalente (deqv) [19]

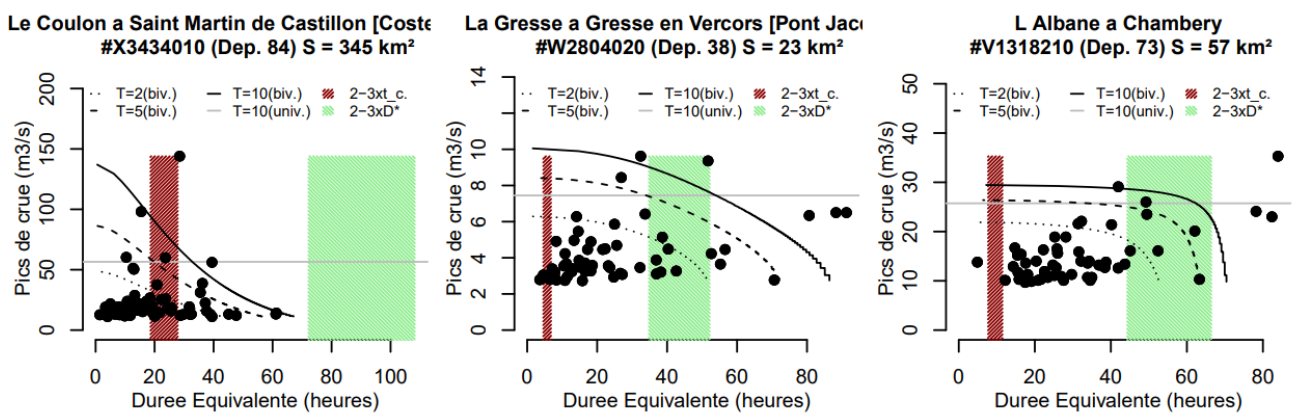


Figure 29 Graphiques « pics de crues vs. durée équivalente » pour trois stations représentatives des trois régimes observés : Le Coulon à Saint-Martin-de-Castillon, crues majeures courtes et peu de crues fortes et longues, régime de crues éclair et contour décennal concave (panneau de gauche) ; La Gresse à Gresse-en-Vercors, échantillons plus homogènes avec quelques crues plus fortes qui sont aussi légèrement plus courtes, régime intermédiaire et contour concave régulier (panneau central) et l'Albane à Chambéry, les crues majeures en débit sont aussi les plus longues, régime de crues longues et contour "cassé" [19]

◇ Régimes de crues identifiés dans la littérature

Les caractéristiques des grandes classes de comportement peuvent être synthétisées de la manière suivante :

- Régime de crues éclair : les crues de plus forte magnitude en débit sont courtes. Dans ce régime, les crues plus longues ont systématiquement des débits inférieurs. Ces stations présentent des contours à la forme partiellement ou totalement concave (Figure 29, panneau de gauche) représentatifs d'une dépendance inverse entre le débit maximal et la durée équivalente.
- Régime de crues longues : les crues de plus forte magnitude sont aussi les plus longues (Figure 29, panneau de droite). La dépendance entre pic de crue et durée équivalente est alors très forte et le contour prend une forme "cassée".
- Régime intermédiaire : régime entre les deux extrêmes présentés plus haut. Dans ce régime intermédiaire seulement une faible décroissance des débits de pointe est observée avec l'augmentation de la durée équivalente. Ces stations ont un contour de forme homogène (Figure 29, panneau central).

◇ Application aux données COMEPHORE

Cette méthode est appliquée aux données de pluies COMEPHORE (pluies de bassin) en considérant les deux marginales suivantes :

- Cumuls de pluie sur une durée « Dtc » proche du temps de concentration des bassins versants étudiés, qui peuvent amener les débits de pointe les plus forts.
- Cumul total précipité sur l'évènement.

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

Les temps de concentration des bassins versants étudiés ont été estimés par différentes méthodes, mettant en évidence une variabilité des valeurs obtenues, comprises entre 1h30 (borne minimale issue de la modélisation hydraulique) et 5h (formules empiriques intermédiaires). Afin de garantir une cohérence avec ces estimations et de capter les événements pluvieux les plus représentatifs en termes d'impact hydrologique, une durée de cumul **Dtc = 3h** a été retenue pour l'analyse. Cette valeur permet d'intégrer les précipitations susceptibles de générer les débits de pointe les plus forts tout en restant dans l'échelle des temps de réponse des bassins.

La sélection automatique des événements pluvieux est effectuée par une détection sup-seuil sur le cumul de pluies de bassin sur Dtc = 3h, en veillant à conserver, pour chacun des trois bassins versants, un nombre d'événements équivalent au nombre d'années de la chronique de pluie COMEPHORE (27 années) utilisée dans cette analyse. Cette approche permet d'obtenir une taille d'échantillon comparable à celle d'une méthode MAXAN (Maximum Annuel).

Le début et la fin de chaque événement sont définis en fonction d'un cumul de pluie sur 24 heures inférieur à 4 mm autour du pic de précipitation (cumul max sur Dtc = 3h). Cette condition est ensuite affinée par une analyse en blocs de 6 heures, correspondant à une durée comprise entre une et deux fois le temps de concentration des bassins étudiés. Deux événements pluvieux sont considérés comme indépendants si aucun cumul de pluie n'est détecté dans l'intervalle de ce bloc.

Pour chaque événement, le cumul maximal de pluie sur Dtc = 3h et le volume total précipité sont déterminés. Le graphique « **Cumul max Dtc vs. Cumul total précipité** » est tracé pour les trois bassins versants (Figure 30).

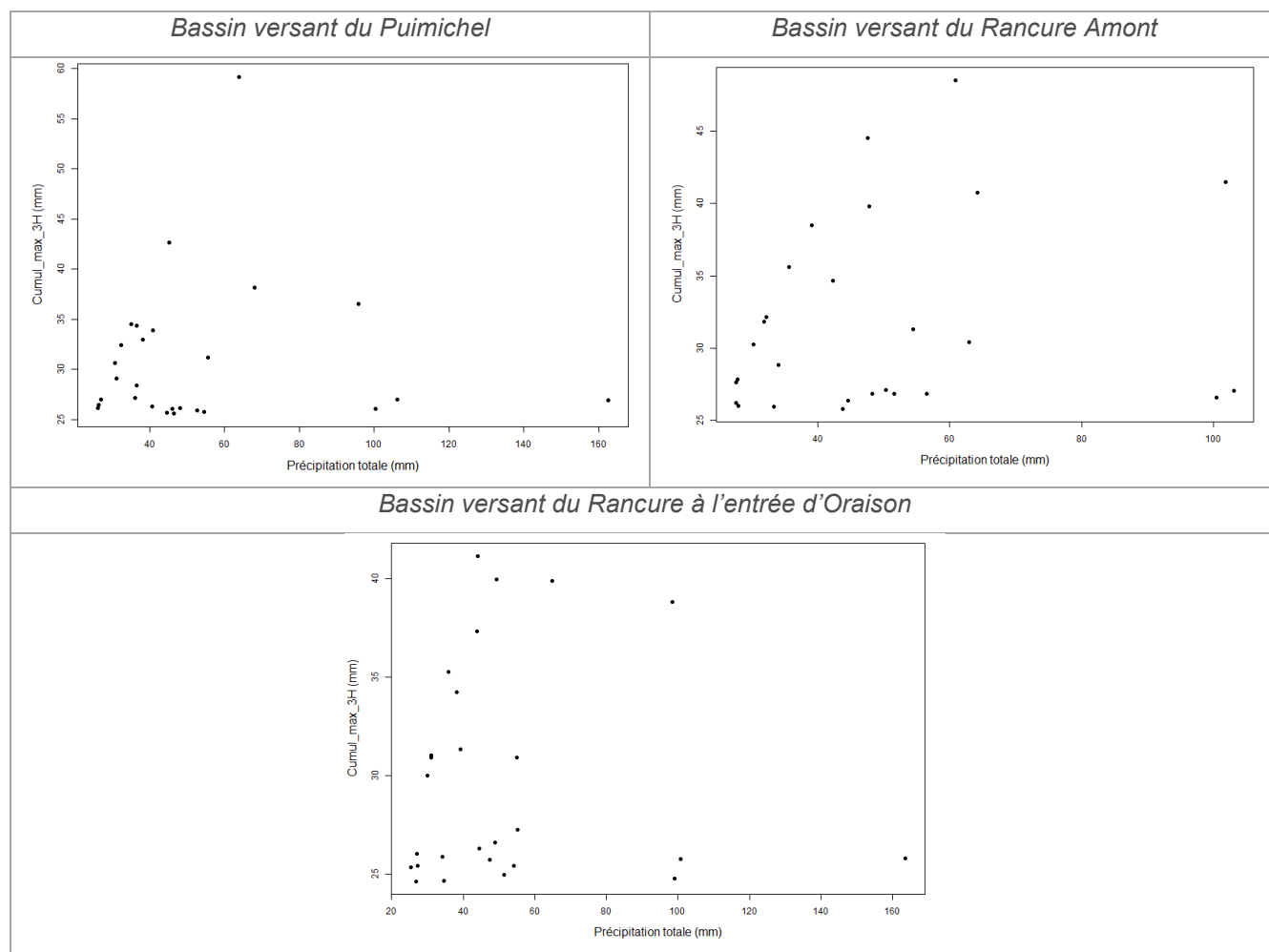


Figure 30 Lien entre cumul max de pluies sur Dtc = 3h et cumul total précipité pour les trois bassins versants étudiés

En complément de l'analyse bivariée menée sur le couple « Cumul maximal sur Dtc = 3h / Cumul total précipité », une analyse parallèle a été réalisée en mobilisant une autre marginale fondée sur le concept de durée équivalente (Deq), à l'image de celle introduite par (Evin et Piton, 2020) [19]. Cette approche

permet d'appréhender la dynamique temporelle des événements pluvieux en construisant, pour chaque bassin versant, un hyétogramme moyen équivalent à partir des événements sélectionnés.

Bien que cette démarche offre un regard complémentaire sur la structuration temporelle des événements pluvieux, les résultats issus de cette approche ne sont pas utilisés pour la suite des analyses, notamment pour la construction des hyétogrammes de forçage retenus pour la modélisation hydrologique. L'analyse bivariable complémentaire menée sur le couple « Cumul maximal sur Dtc = 3h / Durée équivalente » est toutefois présentée en Annexe 1 Analyse bivariable des pluies basée sur la durée équivalente afin d'illustrer l'intérêt et la cohérence de cette approche, sans qu'elle n'ait d'incidence sur les hypothèses hydrologiques retenues dans le cadre de cette étude.

◇ Ajustement des distributions marginales

La Figure 31 montre les ajustements des distributions marginales des « Cumuls Max sur Dtc » et du « Cumul Total précipité » pour le bassin du Rancure à l'entrée d'Oraison. Concernant les ajustements, les lois suivantes ont été privilégiées :

- « Cumuls Max sur Dtc » : loi Pareto généralisée au regard de la sélection des événements via une détection sup-seuil.
- « Cumul Total précipité » : loi GEV après comparaison de différents ajustements notamment via une loi de Gumbel et GPD.

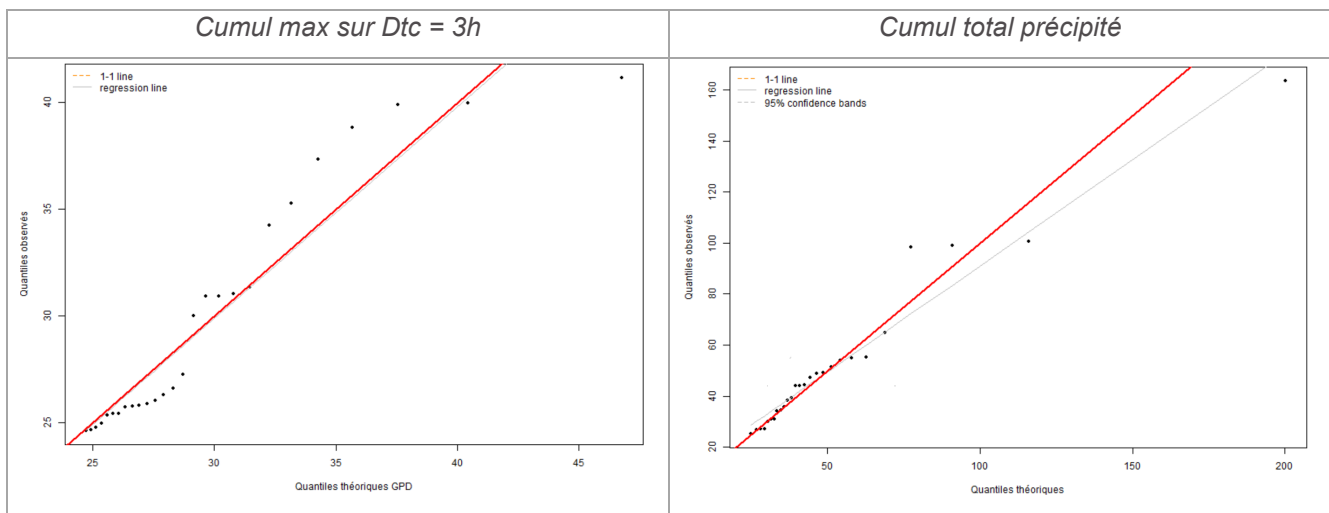


Figure 31 Ajustement des marginales retenues pour l'analyse bivariable : cumul max sur Dtc et cumul total précipité (bassin versant du Rancure à l'entrée d'Oraison)

Les ajustements semblent raisonnables, même si on peut suspecter, pour les quantiles moyens/rares, une sur-estimation des cumuls totaux précipités.

◇ Dépendance entre variables et simulation bivariable

La Figure 32 permet de comparer les couples « Cumul Max Dtc / Cumul total précipité » et « Cumul Max Dtc / Durée équivalente » observés et simulés à partir de la distribution ajustée des marginales (Cumul Max Dtc ; Cumul total précipité ; Durée équivalente) et des copules qui permettent de modéliser la dépendance entre les deux marginales (ici la copule de Clayton est la plus performante), pour le bassin versant du Rancure à l'entrée d'Oraison. 500 années sont simulées, qui correspondent à 1000 couples « Cumul Max Dtc / Cumul total précipité » et « Cumul Max Dtc / Durée équivalente ». Les nuages simulés (points gris) recouvrent bien les nuages observés (points noirs).

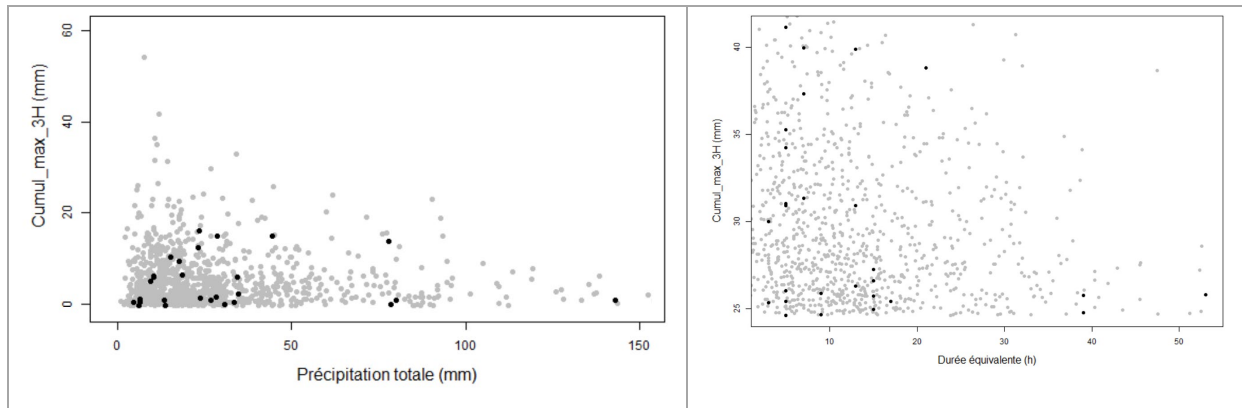


Figure 32 « Cumul Max Dtc / Cumul total précipité » (à gauche) et « Cumul Max Dtc / Durée équivalente » (à droite) pour le bassin versant du Rancure à l'entrée d'Oraison. 1000 valeurs simulées de la distribution bivariable ajustée (gris) et observations (noirs).

◇ Typologie hydrométéorologique des bassins versants

La Figure 33 présente, pour les trois bassins versants, les contours constitués par tous les couples « Cumul Max Dtc / Cumul total précipité » correspondant aux temps de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans selon la définition de la période de retour de Kendall. Les cumuls max Dtc décrivant ces contours sont des fonctions décroissantes du cumul total précipité, puisque les cumuls totaux sont de moins en moins probables lorsqu'ils augmentent (la densité de probabilité des cumuls totaux est une fonction décroissante).

En appliquant une logique similaire à l'analyse bivariable des crues basée sur les débits [19], on peut identifier trois régimes hydrométéorologiques potentiels :

1. Régime de crues éclair

- Les événements pluvieux avec un cumul total plus élevé tendent à avoir des valeurs de Cumul_max_3H plus faibles.
- Les contours des périodes de retour (courbes noires) montrent une relation partiellement concave, ce qui suggère une dépendance inverse entre l'intensité maximale de précipitation et le cumul total précipité.
- Ce comportement est caractéristique d'un régime de crues éclair, où les précipitations les plus intenses sont très courtes et concentrées dans le temps, et où les événements plus longs sont moins intenses.
- Cela peut refléter une forte dynamique de ruissellement rapide, favorisant des crues torrentielles brèves mais intenses.

2. Régime intermédiaire

- La relation entre Cumul_max_3H et le cumul total précipité semble plus homogène que dans le premier cas.
- La courbe décennale (bleue) est positionnée de manière plus équilibrée, suggérant une faible décroissance du Cumul_max_3H avec l'augmentation du cumul total.
- Les contours des périodes de retour restent réguliers et conservent une forme concave plus modérée, ce qui indique un compromis entre des précipitations brèves mais intenses et des événements plus longs avec une intensité plus modérée.
- Ce comportement correspond à un régime intermédiaire, où l'intensité des précipitations ne décroît que faiblement avec la durée de l'événement.

3. Régime de crues longues

- Contrairement aux deux autres cas, les précipitations les plus intenses correspondent également aux événements où le cumul total est élevé.
- La courbe décennale se situe à un niveau plus élevé, indiquant que les précipitations les plus intenses coïncident avec des événements prolongés.
- Les contours des périodes de retour montrent une forte dépendance entre l'intensité maximale des précipitations et le cumul total, ce qui suggère un régime où les précipitations les plus longues sont aussi les plus intenses.
- Ce comportement est typique d'un régime de crues longues, où les événements extrêmes combinent intensité et durée, augmentant le potentiel de crues majeures avec des périodes de montée prolongées.

D'après la Figure 33, les isocourbes représentées suggèrent que **le bassin versant du Rancure présente un régime de crues éclair**. Néanmoins, il convient de noter que pour cumul maximal décennal sur 3 heures (ajusté par une approche univariée), la durée équivalente d'un épisode pluvieux est de l'ordre d'une quinzaine d'heures (cf. Annexe).

◇ Comparaison avec SHYREG et quantiles univariés

Le cumul Dtc décennal issu de l'analyse univariée est représenté par une droite horizontale bleue. Pour chaque bassin versant, les valeurs correspondant aux périodes de retour de 10 et 100 ans sont comparées à celles obtenues avec SHYREG Pluies, en appliquant le coefficient d'abattement décrit au paragraphe 2.2.1.1 : voir Tableau 10. Les valeurs sont globalement cohérentes à l'exception du quantile 100 ans pour le bassin du Puimichel avec une surestimation de l'ordre de 30% du cumul de pluies sur 3 heures.

Bassin Versant	Pluies 3h (mm) T10ans		Pluies 3h (mm) T100ans	
	COMEPHORE	SHYREG avec Abattement	COMEPHORE	SHYREG avec Abattement
Puimichel	39	42	84	62
Rancure_Amont	40	42	60	62
Rancure_Entrée Oraison	37	41	51	60

Tableau 10 Quantile 10ans et 100 ans des de pluies 3h selon un ajustement statistique univarié (Loi GPD) issu des pluies COMEPHORE et selon les pluies SHYREG avec abattement spatial.

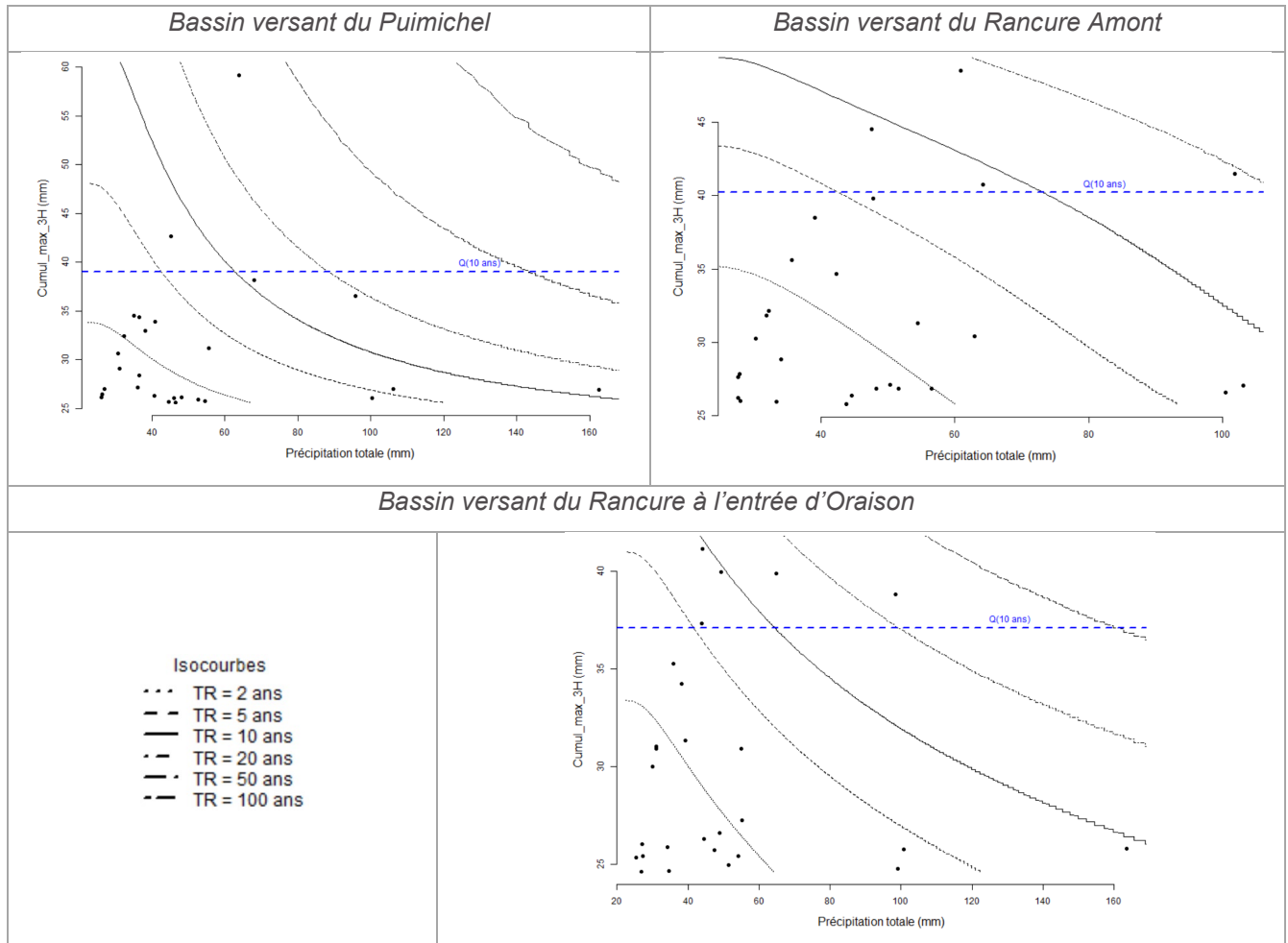


Figure 33 Illustration des contours pour différentes périodes de retour, dans l'espace « Cumul Max Dtc / Cumul total précipité » pour les trois bassins versants

◇ Perspectives pour le transport solide

Pour chaque période de retour, il est possible de choisir un couple **Ce choix peut être réalisé en appliquant l'analyse proposée par (Evin et Piton, 2020) [19] pour déterminer la crue dimensionnante vis-à-vis du transport solide et du volume transporté.**

A titre d'exemple (Evin et Piton, 2020) ont réalisé cette approche pour la station de l'Arac à Soulan en estimant le transport solide pour toutes les crues de l'échantillon et pour des crues du contour décennal (voir Figure 34) sur la base des hypothèses suivantes :

- Hydrogramme triangulaire de caractéristique (QMAX, Deqv)
- Capacité de charriage instantané estimée par la formule de (Recking, 2013) [22]
- Volume total charrié calculé par intégration de la capacité de charriage instantané sur l'ensemble de la crue
- Largeur du cours d'eau W m et pente à déterminer selon la configuration au niveau de la station hydrométrique
- Granulométrie à renseigner (D84 et D50).

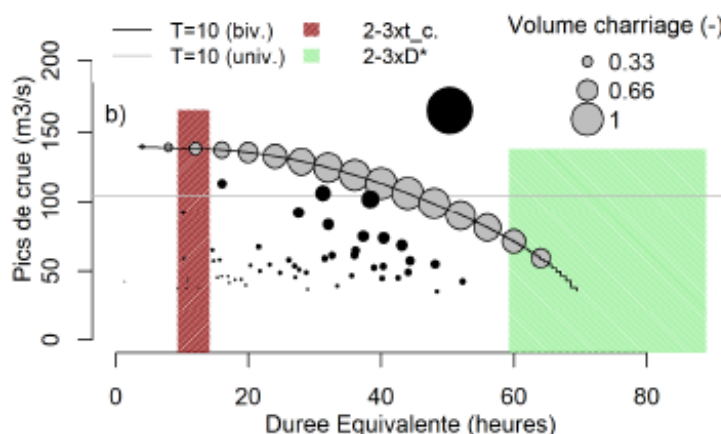


Figure 34 Analyse bivariable des crues décennales de l'Arac à Soulan et du transport solide par charriage : diagramme pics de crues / durées équivalente, la taille des points étant proportionnelle au volume de charriage

Le choix du débit de pointe associé à une magnitude « durée de crue » de période de retour donné est ainsi effectué en maximisant le volume de transport solide évalué par la méthode décrite ci-dessus.

Dans la présente étude, l'analyse est menée sur les pluies. Il est donc nécessaire de mener deux étapes successives pour choisir le couple « Cumul Max Dtc / Cumul total précipité » :

- Déterminer, pour chaque couple considéré, un hyétogramme permettant de reprendre les caractéristiques d'un couple « Cumul Max Dtc / Cumul total précipité » donné.
- Utiliser ce hyétogramme comme conditions de forçage à une modèle hydrologique (pluie/débit) pour établir l'hydrogramme correspondant et mener les calculs de transport solides.

Concernant la construction du hyétogramme, il est possible d'utiliser le hyétogramme « équivalent » moyen en ajustant chaque hyétogramme reconstruit afin de préserver le cumul total de pluie et le cumul maximal sur Dtc = 3h. Pour chaque bassin versant, un hyétogramme « équivalent » est donc construit à partir des 27 hyétogrammes sélectionnés. Les hyétogrammes sont centrés et réduits, en ramenant chaque événement pluvieux à une échelle où le pic est égal à 1 et en définissant une échelle temporelle relative centrée sur le moment du pic de pluie. Ensuite, une grille temporelle commune est créée pour aligner tous les événements. A partir de ces hyétogrammes centrés-réduits, il est possible de déterminer un hyétogramme moyen.

Un exemple de hyétogrammes, pour chaque bassin versant, est donné à la Figure 35, en considérant comme facteurs d'entrée, le quantile 10 ans (CMDtc_{10ans-uni}) et 100 ans (CMDtc_{100ans-uni}) du cumul max sur Dtc obtenus à partir d'une analyse univariée (voir Tableau 11).

Les hyétogrammes obtenus présentent un pic central très marqué d'intensité de pluie horaire, traduisant une concentration des précipitations sur une courte durée.

Ces hyétogrammes peuvent être générés pour d'autres valeurs des couples « CMDtc – Cumul Total », puis intégrés comme conditions de forçage dans un modèle hydrologique. Cela permet, à travers un calcul de transport solide, d'identifier le couple le plus dimensionnant.

Bassin versant	CMDtc (mm) 10ans-uni / 100ans-uni	Cumul Total correspondant (mm)
Puimichel	39 / 84	63 / 90
Rancure_Amont	40 / 60	73 / 122
Rancure_Entrée Oraison	37 / 51	65 / 91

Tableau 11 Valeurs des couples « Cumul Max Dtc / Cumul total précipité » pour CMDtc_{10ans-uni} et CMDtc_{100ans-uni}

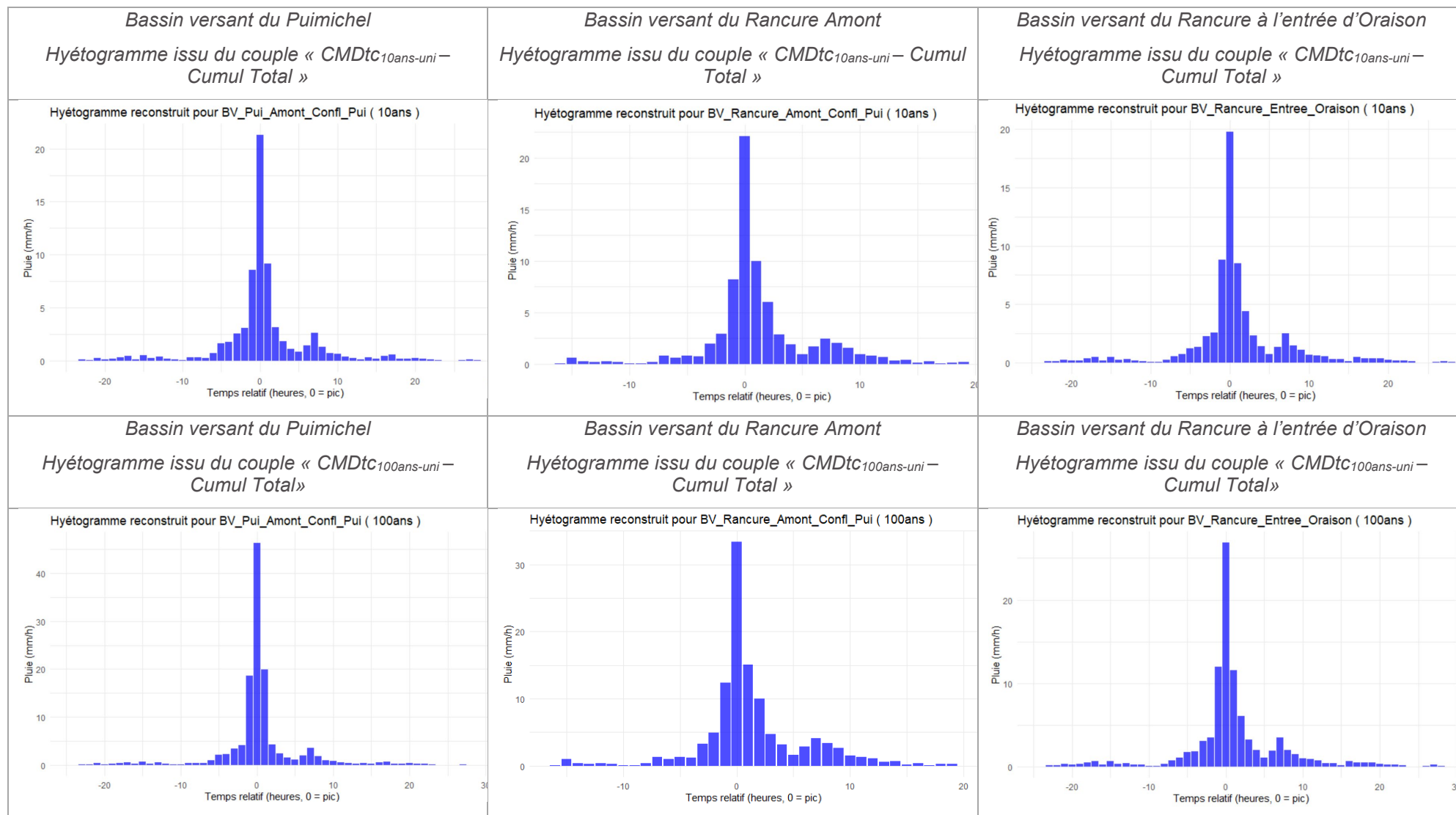


Figure 35 Hyétoqrammes reconstruits selon le couple de variables analysé en considérant comme facteurs d'entrée CMDtc_{10ans-uni} et CMDtc_{100ans-uni}

L'analyse bivariée des couples « Cumul Max Dtc – Cumul Total » suggère que le bassin versant du Rancure est dominé par un régime de crues dits rapides. Pour affiner la caractérisation de l'aléa inondation, les hyétogrammes issus de cette analyse doivent être intégrés dans un modèle hydrologique pluie-débit. Cette modélisation permettra de générer des hydrogrammes correspondant à différentes périodes de retour, facilitant ainsi l'analyse des dynamiques de crues et du transport solide.

2.2.2 Analyse hydrologique

Les études hydrologiques précédemment réalisées sur le secteur ont permis d'acquérir une première connaissance sur l'hydrologie fréquentielle du bassin versant du Rancure. Toutefois, ces travaux se heurtent à une absence de données hydrométriques, ce qui empêche l'analyse directe des débits. L'approche retenue ici s'appuie sur les résultats de l'analyse bivariée des précipitations, offrant ainsi une nouvelle perspective sur la réponse hydrologique du secteur au regard notamment de la problématique du transport solide.

Dans un premier temps, les études hydrologiques précédentes sont donc rappelées et mises en perspective avec les données disponibles. Ensuite, nous détaillerons l'apport de la modélisation hydrologique et hydraulique, notamment à travers l'application des résultats de l'analyse bivariée, afin de mieux caractériser l'aléa hydrologique, en particulier en lien avec le transport solide.

2.2.2.1 Hydrologie fréquentielle : approche par analogie

Etudes existantes :

Deux études hydrologiques ont été menées sur le bassin versant du Rancure :

- Etude de la SCP en 1994 [1] en lien avec le « Schéma d'aménagement hydraulique du Rancure » (cf paragraphe 1.1.1).
- Etude SOGREAH en 2007 [6] pour l'établissement de la carte d'aléa inondation « débordement de cours d'eau » sur la commune du Castellet.

L'étude de la SCP 1994 a estimé les débits de pointe décennaux du Rancure au Castellet et Oraison à partir de deux méthodes (voir Tableau 12) :

- une approche comparative avec les débits spécifiques au regard des données du bassin de l'Asse à Chabrières ;
- la méthode CRUPEDIX du Cemagref.

Pour les périodes de retour supérieures (au-delà de 10 ans), l'étude de la SCP a appliqué la méthode du GRADEX en exploitant le poste pluviométrique du Castellet (GRADEX des pluies : 10,5 mm/j et GRADEX des débits estimé à 23m³/s au droit du Castellet avec une durée caractéristique de 6h).

L'étude de SOGREAH 2007 a estimé les débits centennaux du Rancure et du Puimichel au niveau du Castellet par une approche régionale sur les débits pseudo-spécifique d'une part et par l'application de la méthode rationnelle d'autre part (voir Tableau 12).

L'approche régionale s'est appuyée sur les travaux menés dans le cadre d'une intercomparaison d'études sur La Bléone au niveau du Grand Pont de Digne [23]. Dans ce cadre-là, les résultats des études disponibles sur les bassins voisins (jugés comparables) ont été sélectionnés en privilégiant les bassins analysés par la méthode SPEED de SOGREAH, pour éviter les différences liées au choix de la méthode. Les débits pseudo-spécifiques $Q_{sp} = Q / S^{0.75}$ ont été comparés pour les périodes de retour décennale et centennale : voir Tableau 13 et Figure 36.

Les pluies journalières centennales des bassins versants étudiés sont supérieures à celle du Rancure mais les écarts sont jugés non significatifs. Les débits pseudo-spécifiques obtenus pour une occurrence centennale sont compris entre 4.85 et 5.78 (le résultat sur La Bléone a été considéré comme trop élevé

et non représentatif), ce qui entraîne un débit centennal du Rancure au Castellet ($S_{\text{drainée}} = 80 \text{ km}^2$) entre 130 et $155 \text{ m}^3/\text{s}$.

La méthode rationnelle a été appliquée à partir de la pluie journalière centennale disponible sur le poste pluviométrique du Castellet (PJ100 = 112 mm) en supposant que l'ensemble de cette pluie tombe entre 6h (temps de concentration du bassin versant estimé dans l'étude) et 12h. Le coefficient de ruissellement est pris égal à 0.35. Le débit de pointe centennal est alors compris entre 70 et $145 \text{ m}^3/\text{s}$.

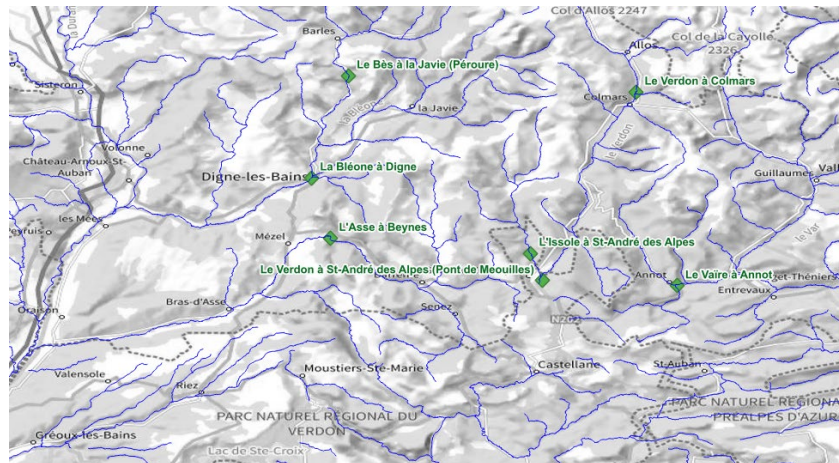


Figure 36 Stations considérées pour la comparaison régionale pour l'étude de la Bléone à Digne [23]

Cours d'eau / Lieu	Surface drainée (km ²)	Débit (m ³ /s) ou Débit pseudo-spécifique (m ³ /s/km ²)	Période de retour	Désignation	Etude SCP 1994	Etude SOGREAH 2007	SHYREG 2019	SHYREG 2019 Intervalle de confiance 80% Borne Sup
Rancure / Castellet	79	Débit	10	Q10	32	-	23	40
		Débit pseudo-spécifique		Qsp10	1.20	-	0.87	1.51
Rancure / Oraison	92	Débit		Q10	37	-	24	41
		Débit pseudo-spécifique		Qsp10	1.25	-	0.81	1.38
Rancure / Castellet	79	Débit	100	Q100	90	145	56	110
		Débit pseudo-spécifique		Qsp100	3.36	5.42	2.11	4.15
Rancure / Oraison	92	Débit		Q100	100	-	59	115
		Débit pseudo-spécifique		Qsp100	3.37	-	1.99	3.87

Tableau 12 Débits de pointe estimés pour les période de retour 10 et 100 ans lors des études de la SCP 1994 [1] et SOGREAH 2007 [6]

Cours d'eau / Lieu	Surfacer Drainée (km ²)	PJ10 2006 (mm)	PJ100 2006 (mm)	SPEED					SHYREG 2019				Commentaire
				Q10 (m3/s)	Qsp10	Q100 (m3/s)	Qsp100	P24h T = 100 Abattue Loi Neppel	Q100	Qsp100	Q100 Intervalle de confiance 80%	Qsp100 Intervalle de confiance 80%	
Rancure / Le Castellet	79		112	-	-	-	-	116	56	2.11	110	4.15	
Bléone / Amont Digne	546	92	130	351	3.11	709	6.28	105	442	3.91	1020	9.03	
Bès / Pérouré	165	92	131	95	2.06	266	5.78	127	200	4.34	385	8.36	
Asse / Beynes	375	84	115	161	1.89	485	5.69	119	402	4.72	509	5.97	
Issole / St André	137	97	140	50	1.25	194	4.85	138	142	3.55	184	4.59	Zone karstique
Verdon / Colmars	158	93		80	1.80	235	5.27	132	181	4.06	233	5.23	Apport neigeux
Verdon / Pont Méouilles	569	100	134	252	2.18	650	5.59	134	480	4.12	640	5.49	Zone karstique
Vaïre / Annot	156	102	145	81	1.84	233	5.28	131	214	4.85	268	6.07	Zone karstique

Tableau 13 Comparaison régionale pour l'étude de la Bléone à Digne synthèse des Pluies, Débits de pointe et Débits pseudo-spécifiques estimés pour les période de retour 10 et 100 ans [23]

Données disponibles complémentaires :

Outre les études hydrologiques existantes, il est possible d'analyser les données issues de la base SHYREG de l'INRAE (régionalisation de la méthode SHYPRE) [24].

Les débits de pointe décennaux et centennaux estimés par SHYREG Débit sur le Rancure au Castellet et à Oraison sont indiqués au Tableau 12. Les valeurs de la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 80% sont également indiquées. Il convient de noter que l'indice de confiance sur les résultats de SHYREG Débit est bon sur le bassin versant du Rancure puisqu'il n'y pas de zone influencée par des ouvrages hydro-électriques ou autres, avec une absence de zone karstique identifiée sur le bassin, et un apport neigeux potentiel faible.

En termes de débits pseudo-spécifiques d'occurrence centennale, les valeurs de SHYREG sont en-dessous des résultats des deux études existantes. La borne supérieure de l'intervalle de confiance à 80% donne des valeurs comprises entre celles de SCP 1994 et SOGREAH 2007.

Afin d'objectiver cette comparaison, le même exercice est mené pour les bassins versants ayant servi à l'analyse régionale dans l'étude de SOGREAH : voir Tableau 13. L'ensemble des débits pseudo-spécifiques d'occurrence décennale et centennale sont analysés sur un même graphique en les reliant respectivement à la pluie SHYREG 24h décennale et centennale abattue avec une loi de Neppel (voir Figure 37). Cette mise en relation entre les quantiles de débit pseudo-spécifique et les quantiles de pluies 24h est fortement simplificatrice mais elle permet, en première approche, d'appréhender les grandes tendances attendues.

La tendance de SHYREG et SHYREG-80% semble encadrer celle obtenue à partir des résultats de la méthode SPEED. Les valeurs de débit pseudo-spécifiques issues de SHYREG pour le Rancure au Castellet sont en-dessous des tendances générales des autres bassins versants. A contrario la valeur retenue dans l'étude de SOGREAH 2007 pour le Rancure au Castellet est bien au-dessus de l'ensemble des tendances.

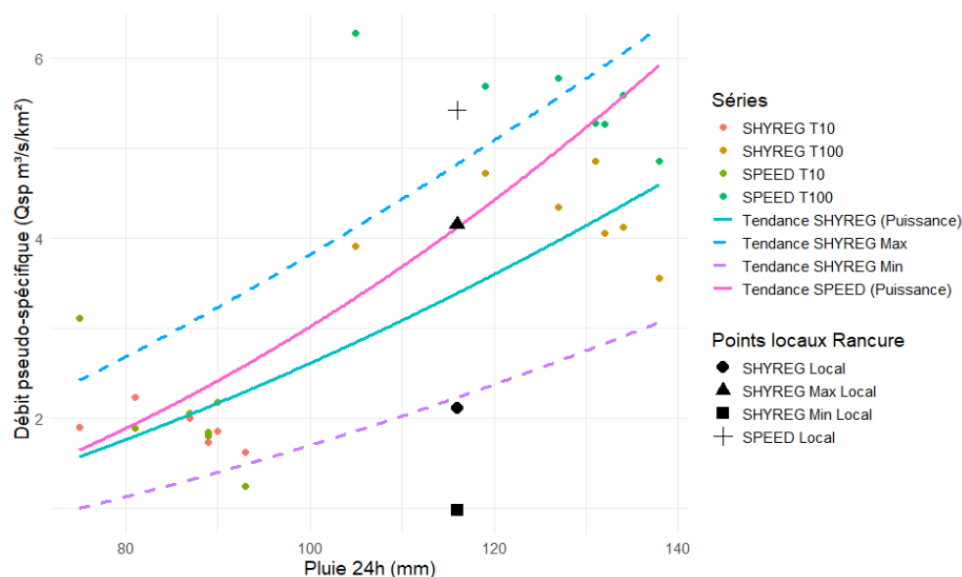


Figure 37 Débits pseudo-spécifiques obtenus avec SHYREG, SHYREG-80% et SPEED en fonction des pluies SHYREG 24h (avec abattement : loi de Neppel) sur les bassins versants ayant servi à la comparaison régionale dans l'étude de SOGREAH 2007 (Points Locaux Rancure SHYREG et SPEED : période de retour centennale)

Approche bayésienne – Construction d'un spectre d'estimation probabiliste :

Afin de compléter l'analyse régionale par analogie, une approche bayésienne a été mise en place pour renforcer l'estimation des débits pseudo-spécifiques décennaux et centennaux sur le Rancure. Cette démarche s'appuie sur les relations « pluie-débit pseudo-spécifique (Qsp) » observées sur des bassins voisins ainsi que sur les incertitudes fournies par la base SHYREG.

L'objectif est de croiser plusieurs sources d'information pour proposer une estimation probabiliste resserrée et cohérente des débits pseudo-spécifiques décennaux et centennaux sur le bassin versant du Rancure.

L'approche mise en œuvre intègre successivement :

- L'information régionale SHYREG : dérivée d'une régression pluie-débit pseudo-spécifique (Q_{sp}) sur les bassins voisins, modélisée par une loi puissance log-log.
- La connaissance locale SHYREG : représentée par les quantiles SHYREG disponibles sur le Rancure (estimation centrale et intervalle de confiance à 80 %).
- L'information régionale SPEED : estimée à partir de la régression pluie-débit SPEED calée sur les bassins voisins, en intégrant une incertitude issue de la dispersion des résidus de la régression régionale.

La valeur locale SPEED initialement estimée sur le Rancure a été jugée trop éloignée des tendances régionales et n'a pas été retenue. L'analyse pour SPEED s'appuie uniquement sur la tendance régionale (régression régionale) et l'incertitude calculée à partir des résidus, ce qui permet de construire une densité probabiliste cohérente pour cette méthode.

La méthode suivie s'appuie sur les principes suivants :

- La relation pluie-débit SHYREG a été modélisée par une loi puissance log-log.
- Une incertitude régionale dynamique a été définie en calant une loi puissance sur les bornes minimales et maximales des intervalles de confiance à 80 % des bassins voisins. Cela permet de faire varier l'écart-type régional SHYREG en fonction de la pluie locale.
- La distribution a priori SHYREG a été simulée par une loi normale centrée sur la tendance régionale, avec un écart-type calculé dynamiquement selon la pluie locale du Rancure.
- La vraisemblance locale SHYREG a été définie comme une distribution uniforme comprise entre les bornes locale minimale et maximale (IC 80 % SHYREG local).
- Une distribution a posteriori SHYREG a été générée par une simulation Monte Carlo combinant l'a priori régional et la vraisemblance locale.
- Une densité de probabilité SPEED a été simulée indépendamment à partir de la régression régionale et de l'incertitude fournie par la dispersion des résidus.
- Enfin, une distribution combinée a été construite en croisant la densité a posteriori SHYREG et la densité SPEED régionalisée. Ce croisement permet de tenir compte conjointement des deux approches dans une estimation probabiliste commune.

Pour les périodes de retour 10 et 100 ans, la distribution a posteriori SHYREG obtenue par cette approche probabiliste présente une incertitude significativement réduite par rapport à la distribution a priori régionale. Cette réduction est directement liée à l'intégration de l'information locale spécifique au Rancure.

La distribution SPEED régionalisée, quant à elle, complète utilement l'analyse en fournissant une estimation indépendante fondée uniquement sur les bassins voisins et sur la dispersion observée dans la régression régionale.

La distribution combinée issue du croisement des deux approches permet de proposer une estimation intégrée du débit pseudo-spécifique centennal, prenant en compte à la fois l'incertitude régionale SHYREG, l'information locale, et l'estimation SPEED régionalisée.

La Figure 38 et la Figure 39 illustrent les différentes distributions simulées respectivement pour une période de retour 10 et 100 ans :

- Distribution a priori SHYREG : large, traduisant la variabilité régionale observée.
- Vraisemblance locale SHYREG : distribution uniforme centrée sur l'intervalle local.
- Distribution a posteriori SHYREG : issue de la combinaison des deux informations précédentes.
- Distribution SPEED régionalisée : construite à partir de la régression régionale et de l'incertitude associée.
- Distribution combinée SHYREG + SPEED : estimation probabiliste finale résultant du croisement des deux méthodes.

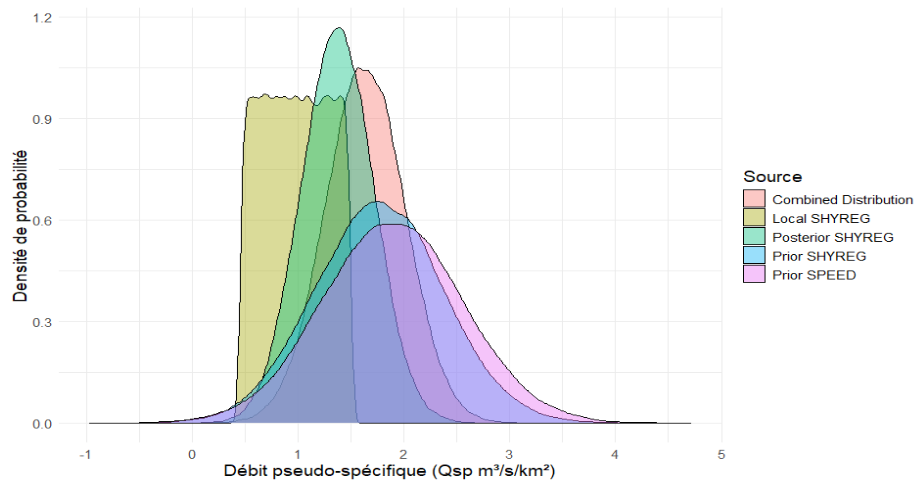


Figure 38 Distribution probabiliste des débits pseudo-spécifiques décennaux sur le Rancure – Approche bayésienne SHYREG (a priori régional, information locale et a posteriori) et approche combinée SHYREG-SPEED

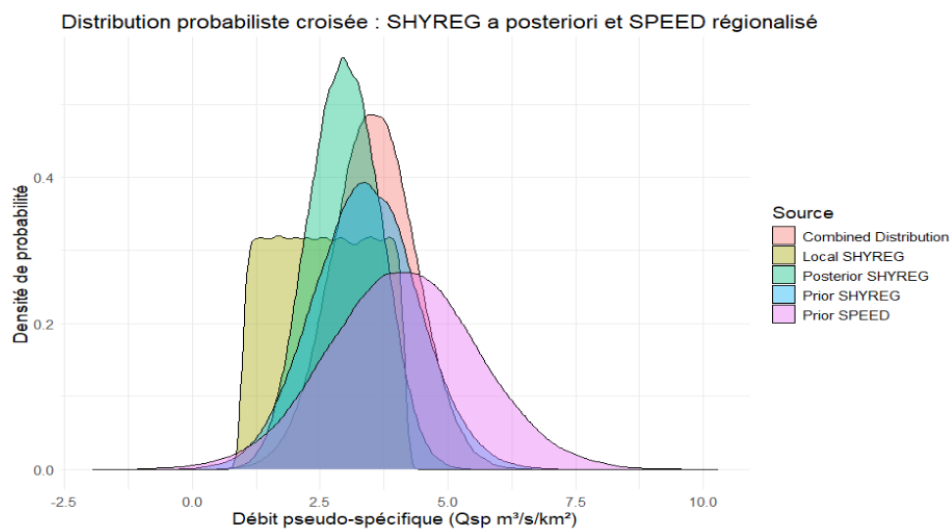


Figure 39 Distribution probabiliste des débits pseudo-spécifiques centennaux sur le Rancure – Approche bayésienne SHYREG (a priori régional, information locale et a posteriori) et approche combinée SHYREG-SPEED

Synthèse de l'approche par analogie :

Sur la base de la chaîne bayésienne mise en œuvre, **les débits pseudo-spécifiques décennaux et centennaux du Rancure**, estimés par l'approche combinée croisant la distribution a posteriori SHYREG et la distribution SPEED régionalisée, **se situent respectivement dans un intervalle de confiance à 80 % compris entre 1,3/1,9 m³/s/km² et 2,9/4,2 m³/s/km²**. Le Tableau 14 présente les valeurs correspondantes calculées pour différents points du bassin versant pour les deux périodes de retour.

Bassin versant	Approche combinée SHYREG (a posteriori) / SPEED régionalisé Débit T10 (m ³ /s)			Approche combinée SHYREG (a posteriori) / SPEED régionalisé Débit T100 (m ³ /s)		
	Intervalle de confiance 80%	Estimation centrale	Intervalle de confiance 80%	Intervalle de confiance 80%	Estimation centrale	Intervalle de confiance 80%
	Borne inf		Borne sup	Borne inf		Borne sup
Puimichel	18	22	27	40	49	58
Rancure amont	24	29	35	52	64	75
Rancure entrée d'Oraison	40	50	59	88	108	128

Tableau 14 Débits centennaux issus de l'approche combinée : « SHYREG a posteriori » et « SPEED régionalisé »

2.2.2.2 Apport des modélisations hydrologiques/hydrauliques

Objectifs de la modélisation hydrologique

Les travaux hydrologiques présentés au paragraphe précédent (2.2.2.1) apportent une première approximation des débits de pointe, basée sur une approche régionale par analogie. Toutefois, cette démarche peut être consolidée par des simulations hydrologiques distribuées, capables de prendre en compte les spécificités morphologiques et hydrologiques du bassin versant du Rancure.

L'objectif de cette modélisation hydrologique est donc double :

- Fournir des éléments complémentaires d'estimation des quantiles de débits de pointe sur le bassin versant du Rancure, en cohérence avec l'approche régionale par analogie développée dans la partie 2.2.2.1. La modélisation permet ainsi de vérifier et d'affiner les valeurs de débits de crue caractéristiques associées aux périodes de retour cibles.
- Déterminer des hydrogrammes de référence réalistes à partir des hyétogrammes construits via l'analyse bivariée des pluies. Ces hydrogrammes serviront de forçage pour les simulations hydrauliques et permettront d'évaluer, de manière cohérente, les dynamiques de crue et les volumes écoulés nécessaires à l'analyse du transport solide.

Modélisation hydrologique : structure et hypothèses

La modélisation hydrologique a été conduite à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) rééchantillonné au pas de 25 m, permettant une représentation adaptée de la topographie et des écoulements de surface à l'échelle du bassin versant.

Le modèle repose sur une structure en plusieurs modules complémentaires :

1. Production et infiltration – Méthode SCS-CN

La transformation de la pluie brute en pluie nette est assurée via la méthode SCS-CN (Soil Conservation Service - Curve Number), intégrée dans le module d'infiltration distribué ([25]) de TELEMAC 2D, au sein de la chaîne Cartino 2D.

Le Curve Number (CN) est un paramètre central de ce modèle, caractérisant la capacité d'un sol à générer du ruissellement. Sa valeur dépend des propriétés du sol et de la couverture végétale :

- CN bas (30-50) : correspond à des sols très perméables ou des surfaces à couvert végétal dense (faible ruissellement).
- CN élevé (70-100) : correspond à des sols peu perméables, des surfaces imperméables ou des zones urbaines (fort ruissellement).

La pluie nette est ainsi déterminée via la formule suivante :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{si } P > I_a$$

$$P_e = 0 \quad , \text{ si } P < I_a$$

- P est pluie brute
- P_e est la pluie nette qui va ruisseler
- I_a est la perte initiale : $I_a = \alpha * S$
- S est le potentiel maximum d'infiltration après la perte initiale, qui dépend du CN et se calcule par :

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

La Figure 40 présente l'évolution de la pluie nette en fonction de la pluie brute pour différentes valeurs du Curve Number (CN).

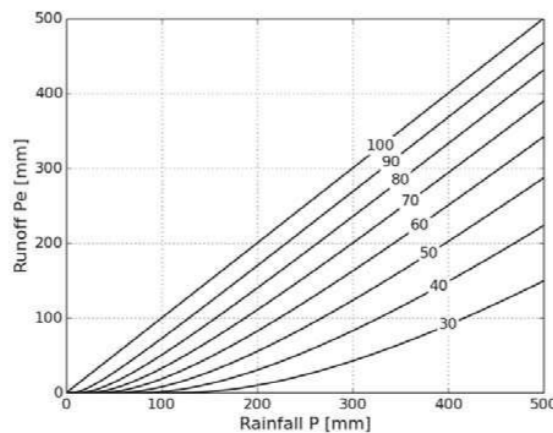


Figure 40 : Variation de la pluie nette en fonction de la pluie brute pour différentes valeurs de CN ($I_a = 0.2 * S$)

2. Prise en compte de l'état d'humidité initial (AMC)

Outre la capacité intrinsèque d'infiltration du sol, le modèle prend également en compte le taux d'humidité des sols (Antecedent Moisture Condition : AMC) avec trois classes possibles (AMC I, II et III). Selon la classe de l'AMC le Curve Number est modifié selon sa valeur de référence (voir Figure 41).

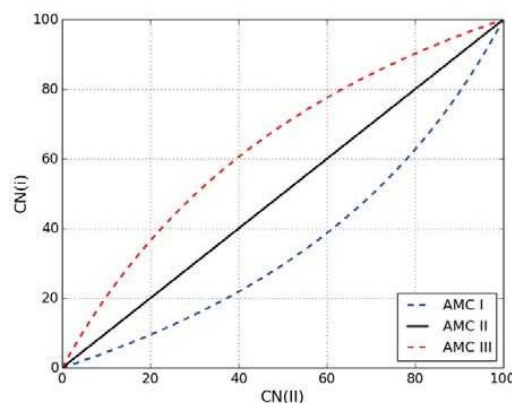


Figure 41 : Valeurs de CN en fonction de la classe d'AMC

Pour simuler l'état d'humidité le plus réaliste possible, une modélisation probabiliste a été développée pour relier l'AMC à l'indice SWI (Soil Water Index)⁹, issu de la chaîne SIM de Météo-France ([26]). La calibration de cette relation a été réalisée à partir de la comparaison des simulations hydrologiques avec

⁹ Le SWI (Soil Wetness Index) est un indicateur d'humidité du sol. Il traduit la proportion d'eau présente dans le sol par rapport à sa capacité maximale de rétention, variant de 0 (sol sec, stress hydrique marqué) à 1 (sol saturé, absence de stress).

les chroniques de débit observées sur le bassin de l'Asse (station Asse Chabrières : voir paragraphe suivant), permettant d'obtenir une correspondance entre les classes AMC optimales et les valeurs de SWI observées.

Une régression logistique multinomiale¹⁰ a permis d'estimer la probabilité d'appartenance à chaque classe AMC (AMC I, AMC II ou AMC III) en fonction du SWI simulé sur le bassin. Cette modélisation dynamique permet d'ajuster l'état initial de l'humidité des sols pour chaque événement pluvieux simulé, en fonction de l'humidité réelle ou simulée au moment de l'événement (voir Figure 42).

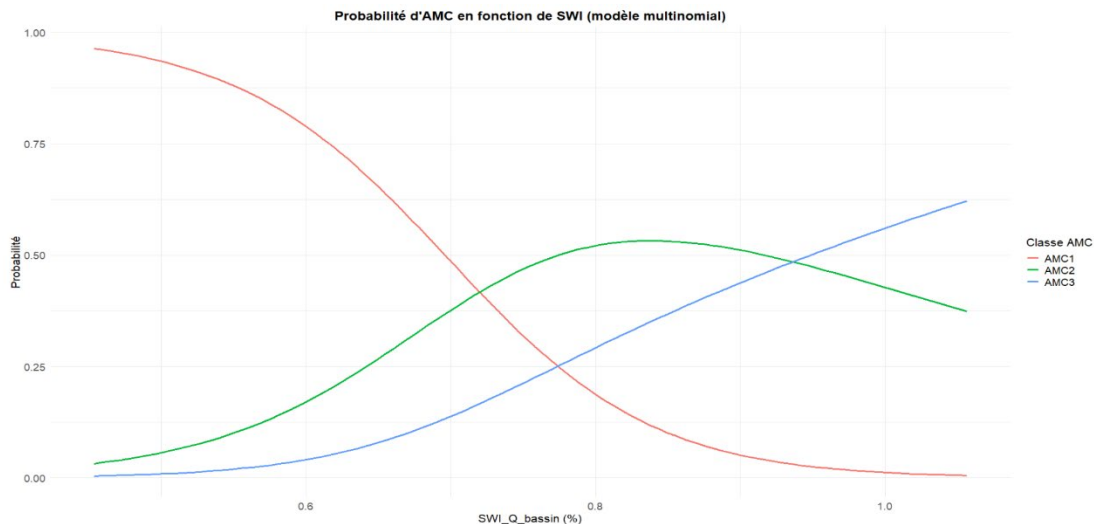


Figure 42 : Relation probabiliste entre l'indice SWI et les conditions AMC optimales (modèle multinomial)

3. Transfert des écoulements

Une fois la pluie nette déterminée, la propagation des écoulements de surface est simulée via une modélisation hydraulique bidimensionnelle (2D) classique, réalisée avec TELEMAC 2D.

Les coefficients de rugosité de Strickler ont été spatialement distribués en fonction de l'occupation des sols (zones naturelles, agricoles, urbaines, lits mineurs, etc.) afin de représenter au mieux la dynamique des écoulements.

Calibration sur le bassin de l'Asse

En l'absence de données hydrométriques sur le Rancure, la calibration a été réalisée sur la station hydrométrique de l'Asse à Chabrières, disposant de chroniques de débit observées fiables. L'objectif était de vérifier la capacité du modèle à reproduire les hydrogrammes mesurés et d'ajuster la prise en compte de l'état initial d'humidité des sols :

- Données utilisées :
 - Pluies horaires issues d'Antilope J+1, désagrégées à un pas de temps de 15 minutes à l'aide des données Panthère.
 - Chroniques de débits mesurées à la station de Chabrières.
 - Calculs réalisés avec les paramètres hydrologiques prédéfinis (CN et Strickler) sans modification.
- Démarche de calibration :
 - Rejeu d'une douzaine d'événements hydrologiques significatifs (débits de pointe supérieurs au quantile associé à une période de retour de 2 ans : cf. tableau des crues observées), en faisant varier la condition d'humidité initiale (AMC I, AMC II, AMC III) pour chaque événement.

¹⁰ La régression logistique multinomiale est un modèle statistique permettant de prédire la probabilité d'appartenance d'une observation à plusieurs catégories possibles d'une variable qualitative (ici les classes d'humidité AMC I, II et III) à partir d'une variable explicative continue (ici le SWI).

- Pour chaque événement, sélection de l'AMC offrant la meilleure concordance avec l'hydrogramme observé en termes de débit de pointe, temps de montée et volume écoulé.
- Croisement de l'AMC optimal sélectionné avec la valeur d'indice SWI simulée (Soil Water Index, issu de la chaîne SIM de Météo-France) calculée au pas horaire pour le bassin.

Cette analyse a permis de calibrer une loi probabiliste reliant l'indice SWI à la probabilité d'occurrence des classes AMC1, AMC2 et AMC3. Une régression logistique multinomiale a été ajustée, fournissant des courbes de probabilité permettant, à partir du SWI connu, de déterminer la probabilité de se trouver dans chaque classe d'humidité initiale (voir Figure 42).

Le tableau des événements testés (Tableau 15) synthétise pour chaque crue la date, le débit observé, la réponse hydrologique du modèle sous différentes conditions AMC, ainsi que le SWI associé.

date_debut	debit_max_obs	AMC1_Qstation	AMC2_Qstation	AMC3_Qstation	SWI_Q_bassin
2019-11-21 15:00:00	244	20	102	285	1.06
2019-12-13 11:00:00	163	0	31	126	0.97
2018-03-09 22:00:00	129	-	41	132	0.86
2019-10-23 22:00:00	126	71	478	732	0.49
2018-10-29 12:00:00	106	59	224	341	0.45
2011-11-03 21:00:00	279	300	488	700	0.58
2016-11-20 23:00:00	199	350	507	568	0.85
2013-05-15 13:00:00	168	31	223	326	0.85
2012-05-26 05:00:00	125	18	157	325	0.91
2014-01-16 06:00:00	124	20	116	195	0.99
2014-11-09 04:00:00	121	0	51	135	0.75
2012-11-10 02:00:00	117	0	62	298	0.72
2013-04-26 17:00:00	107	0	110	194	0.83

Tableau 15 Caractéristiques des événements de crue sélectionnés pour la calibration hydrologique sur le bassin de l'Asse à Chabrières

Application au bassin du Rancure : modélisation des pluies SHYREG

Objectifs et principes de l'approche

Afin de compléter l'approche régionale par analogie et d'apporter une information supplémentaire sur le comportement hydrologique du bassin, des simulations ont été réalisées à partir de précipitations statistiques issues de la base SHYREG-Pluie. L'objectif est de tester la réponse du modèle hydrologique calé face à des épisodes pluvieux théoriques, représentatifs des quantiles de pluie associés à différentes périodes de retour. Cette démarche permet de simuler directement la transformation pluie-débit en utilisant des pluies statistiques, ce qui constitue une approche complémentaire à celle par analogie, qui se limite à des estimations de quantiles de débits sans modélisation explicite du processus hydrologique.

En mobilisant le modèle hydrologique distribué Cartino 2D/Telemac 2D, cette approche offre l'opportunité de vérifier la cohérence des débits de pointe simulés à partir de scénarios de pluie de référence et d'élargir la gamme des scénarios hydrologiques explorés sur le bassin versant du Rancure. Il est essentiel de rappeler que, dans une approche hydrologique fréquentielle, le débit centennal n'est pas le débit généré par une pluie centennale. Ces deux grandeurs résultent de processus statistiques distincts :

- Les débits de crue centennaux correspondent à des quantiles de débits calculés sur des chroniques hydrométriques.
- Les pluies centennales sont des quantiles de précipitations pour des durées de cumul spécifiques.

L'utilisation directe d'une pluie centennale pour simuler un débit ne garantit pas d'atteindre le débit centennal calculé par l'approche SHYREG-Débit. Les deux approches apportent donc des informations complémentaires et non substituables.

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

La comparaison entre les débits de pointe obtenus via cette simulation et les quantiles de débits issus de l'approche régionale (SHYREG-Débit) apporte une validation croisée et un cadre d'incertitude élargi, en tenant compte des incertitudes hydrologiques (pluie, ruissellement, humidité initiale).

Méthodologie de la modélisation SHYREG sur le Rancure

L'approche développée consiste à construire des hyétogrammes de référence directement à partir des quantiles de pluie SHYREG, et à appliquer ces hyétogrammes dans le modèle hydrologique Cartino 2D 25 m pour simuler les débits de crue associés.

Un hyétogramme type de forme Keifer a été reconstruit pour chaque scénario de pluie :

- Les quantiles SHYREG de précipitations sont récupérés pour une gamme de durées de cumul (par exemple : 15 min, 30 min, 1 h, 3 h, 6 h, 12 h).
- Pour chaque durée de cumul, la valeur de précipitation correspondant à la période de retour considérée (T10, T100, etc.) est sélectionnée.
- L'ensemble des valeurs est intégré dans un hyétogramme mono-fréquentiel (c'est-à-dire que chaque cumul de pluie correspond à la même période de retour), de type Keifer avec un pic centré.

Les hyétogrammes SHYREG sont appliqués individuellement sur chaque pixel du champ de pluie SHYREG, en respectant ainsi la spatialisation des intensités.

Pour chaque scénario de pluie (T10 et T100), les simulations hydrologiques sont réalisées en testant les trois conditions d'humidité des sols (AMC1, AMC2 et AMC3) : voir Tableau 16. Cette approche permet d'obtenir une fourchette des débits de pointe possibles, en intégrant l'incertitude liée à l'état initial du sol au moment de l'événement.

Cette démarche permet d'apporter une information complémentaire par rapport à l'approche par analogie régionale :

- L'approche par analogie (cf. partie 2.2.2.1) estime directement des quantiles de débit sur la base d'une comparaison régionale, mais sans passer par la simulation d'un événement pluvieux ni modéliser la transformation pluie-débit.
- L'approche SHYREG appliquée permet de simuler explicitement le fonctionnement hydrologique du bassin à partir de pluies extrêmes spatialement cohérentes en termes de période de retour, en reproduisant les processus de ruissellement et de concentration des écoulements.

Résultats de l'approche SHYREG appliquée au modèle hydrologique

Les simulations hydrologiques distribuées réalisées avec Cartino 2D, forcées par les hyétogrammes SHYREG pour les périodes de retour 10 et 100 ans, permettent d'explorer la sensibilité de la réponse hydrologique du bassin du Rancure selon trois conditions d'humidité initiale des sols (AMC1 = sec, AMC2 = moyen, AMC3 = saturé).

La comparaison entre les débits simulés (Tableau 16) et les quantiles de débits issus de l'approche combinée « SHYREG Débit – SPEED » (Tableau 14) met en évidence plusieurs points :

- Sous AMC1 (sol sec), les débits simulés sont très faibles et nettement inférieurs aux débits attendus : ce scénario n'est pas représentatif des épisodes extrêmes.
- Sous AMC3 (sol saturé), les débits simulés dépassent largement les quantiles SHYREG, traduisant un comportement maximaliste correspondant à une situation exceptionnelle de saturation totale des sols.
- Sous AMC2, les résultats sont globalement cohérents avec les débits statistiques :
 - Pour Q10, les simulations sont inférieures aux valeurs « SHYREG Débit – SPEED ».
 - Pour Q100, les simulations sont proches des estimations statistiques pour le Rancure amont et Puimichel, mais présentent une surestimation modérée à l'exutoire.

Ces résultats confirment que l'hypothèse AMC2 (sols moyennement humides) constitue le scénario le plus représentatif pour les crues de projet.

Bassin versant	Débit de pointe simulé (m³/s) Pluies SHYREG T10			Débit de pointe simulé (m³/s) Pluies SHYREG T100		
	AMC1	AMC2	AMC3	AMC1	AMC2	AMC3
Puimichel	0,5	13	55	7	67	198
Rancure amont	0,5	12	50	6	59	170
Rancure entrée d'Oraison	1	25	115	12	138	386

Tableau 16 Simulation des débits de pointe pour les pluies SHYREG (T10 et T100) en fonction des conditions initiales d'humidité des sols (AMC)

Application au bassin du Rancure : modélisation des hyétogrammes issus de l'analyse bivariée

Afin de dépasser les approches classiques fondées uniquement sur les quantiles univariés, une démarche bivariée a été conduite pour représenter conjointement deux caractéristiques clés des événements pluvieux (cf. partie 2.2.1.4) :

- le cumul maximal sur 3 heures (CM3H), représentatif de l'intensité de la pluie sur le temps de concentration,
- le cumul total de l'épisode (TotP), représentatif du volume global précipité.

Les couples (CM3H ; TotP) sélectionnés sur la frontière de Kendall ont servi à générer une série d'hyétogrammes représentatifs. Ces hyétogrammes sont utilisés comme conditions de forçage dans un modèle hydrologique pluie-débit, identique à celui appliqué aux pluies SHYREG. L'objectif est double :

- Établir les hydrogrammes correspondants à l'exutoire et sur les sous-bassins du Rancure, en confrontant la réponse hydrologique aux différents scénarios de pluie bivariés.
- Identifier, pour une période de retour donnée, les hydrogrammes les plus pénalisants vis-à-vis du transport solide, tout en veillant à rester dans la fourchette réaliste des débits de pointe fournie par l'approche univariée régionale.

Cette démarche permet donc de relier directement l'analyse statistique des pluies à la modélisation hydrologique et sédimentaire, en testant des scénarios représentatifs de la réalité hydrométéorologique du bassin.

Construction des hyétogrammes et intégration dans la modélisation hydrologique

La frontière de Kendall, obtenue à partir de l'ajustement copule, a permis d'identifier les combinaisons plausibles de (CM3H ; TotP) pour une période de retour donnée (cf. partie 2.2.1.4).

Parmi ces couples, un sous-ensemble a été retenu selon des critères de cohérence hydrologique :

- cumul sur 3 h inférieur ou égal au cumul total,
- valeurs inférieures ou égales aux quantiles univariés de référence.

Une interpolation par spline a ensuite été appliquée afin de lisser la frontière et de sélectionner un nombre réduit de couples représentatifs (cinq) couvrant la gamme d'événements possibles.

Les hyétogrammes obtenus ont été transformés au pas de temps du modèle (15 minutes) et formatés pour être injectés directement dans la chaîne de modélisation pluie-débit utilisée pour les pluies SHYREG (Cartino2D : cf partie précédente avec AMC = 2) : voir Figure 43.

Analyse des résultats et choix des hydrogrammes pour chaque sous-bassin versant

L'ensemble des hyétogrammes et des hydrogrammes obtenues via la modélisation hydrologique sont présentées en annexe. Le Tableau 17 récapitule, pour chaque bassin versant de contrôle et pour les périodes de retour 10 ans et 100 ans, les débits de pointe $Q_{\max}$ et les volumes totaux écoulés issus des simulations hydrologiques basées sur les hyétogrammes bivariés.

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

Plusieurs remarques peuvent être formulées :

- Pour la période de retour 10 ans, on constate que les scénarios générant les débits de pointe les plus élevés (en gras dans le tableau) correspondent également à ceux produisant les volumes écoulés les plus importants (également en gras dans le tableau). Cette coexistence traduit probablement une limitation du schéma de pluie testé : le temps de concentration retenu apparaît sans doute trop court pour des intensités pluvieuses décennales, ce qui favorise mécaniquement une concordance entre intensité maximale et volume total.
- Pour la période de retour 100 ans, ce constat ne se vérifie que sur le bassin du Rancure à l'entrée d'Oraison : le scénario le plus intense en termes de cumul sur 3 h est également celui qui engendre le volume total écoulé le plus important. Cette situation traduit probablement une hypothèse de temps de concentration trop courte appliquée à ce bassin versant, de taille bien plus importante que les deux autres sous-bassins de contrôle, et ce quel que soit le niveau d'intensité pluvieuse. Afin de vérifier cette sensibilité, il serait pertinent de tester une hypothèse alternative reposant sur un cumul maximal à 6 h (borne haute du temps de concentration estimé pour ce secteur), permettant ainsi d'évaluer l'influence du choix du temps de concentration sur la cohérence entre intensité, volume et débit de pointe simulé.
- Sur le plan des comparaisons régionales, certains hydrogrammes centennaux conduisent à des débits de pointe supérieurs aux intervalles de confiance obtenus via l'approche univariée régionale (analyse SHYREG/SPEED). Cette divergence s'explique en partie par des quantiles centennaux issus de COMEPHORE (base de l'analyse bivariée) supérieurs aux quantiles centennaux fournis par SHYREG, comme montré dans la partie 2.2.1.1.

Au final, pour l'application à l'évaluation du transport solide, seuls **les hydrogrammes les plus défavorables du point de vue hydrosédimentaire sont retenus, à condition que leurs débits de pointe restent inclus dans l'intervalle de confiance fourni par l'approche régionale (en rouge dans le Tableau 17)**. Cette sélection permet de garantir la cohérence entre l'analyse bivariée et le cadre statistique régional, tout en conservant les scénarios les plus pénalisants pour la mobilisation sédimentaire.

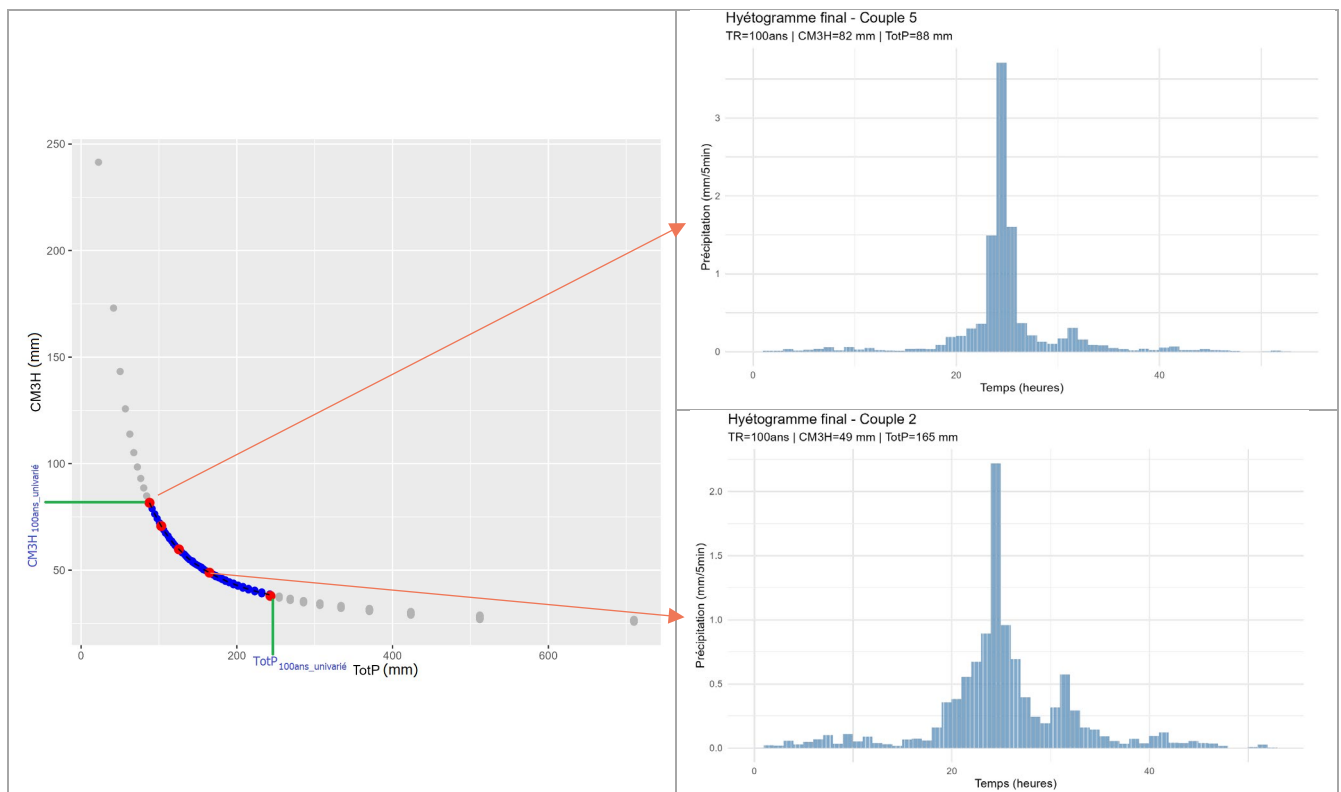


Figure 43 : Frontière de Kendall obtenue pour $T = 100$ ans (CM3H vs TotP) sur le bassin versant du Puimichel, avec sélection de couples représentatifs (points rouges) et exemples d'hyétoigrammes reconstruits associés.

BV	TR	CM3H	TotP	Qmax_m3s	Vol_hm3
Puimichel	TR10	33	87	8	0.42
		34	79	7	0.38
		36	73	6	0.35
		37	67	5	0.33
		39	63	5	0.32
	TR100	38	243	78	2.52
		49	165	58	1.75
		60	126	57	1.53
		71	103	71	1.53
		82	88	94	1.63
Rancure Amont	TR10	39	79	8	0.50
		39	78	8	0.50
		39	76	7	0.49
		40	75	7	0.48
		40	73	7	0.47
	TR100	48	198	66	2.64
		51	191	68	2.62
		55	168	60	2.36
		58	147	53	2.12
		61	122	45	1.82
Rancure Oraison	TR10	34	88	18	1.10
		35	82	16	0.98
		35	76	14	0.89
		36	71	12	0.80
		37	66	10	0.72
	TR100	37	275	220	8.02
		40	208	149	5.65
		44	155	91	3.92
		47	117	60	2.85
		50	89	42	2.15

Tableau 17 Synthèse des hydrogrammes simulés à partir des hyétogrammes issus de l'analyse bivariable, pour les trois bassins versants de contrôle (Puimichel, Rancure Amont, Rancure Oraison) et pour les périodes de retour 10 ans et 100 ans. Les résultats en rouge correspondent aux hydrogrammes retenus : défavorable pour le transport solide et Q_{pointe} dans l'intervalle de confiance

2.2.2.3 Crues historiques

En complément de l'hydrologie fréquentielle, il est important de rassembler les informations disponibles sur les crues historiques (voir Tableau 19 et Figure 44). Au-delà de la simple identification des zones de débordement préférentielles, cela permet de repérer des crues particulièrement morphogènes. Lorsqu'elles sont bien documentées et que leurs conditions pluviométriques sont connues à des pas de temps suffisamment fins, elles peuvent être reconstituées en complément des hydrogrammes théoriques, offrant ainsi une meilleure compréhension des dynamiques de crue et du transport solide.

Cependant, au regard des crues majeures documentées, **le scénario de référence historique n'est pas privilégié**, car les données pluviométriques disponibles ne sont pas suffisamment précises pour permettre une reconstitution fiable de ces événements. L'absence d'informations détaillées à une échelle temporelle fine limite la possibilité de rejouer ces crues et d'en exploiter pleinement le potentiel pour l'analyse hydromorphologique.

En revanche, certaines crues récentes offrent des données exploitables. Les événements de 1998, 2014 et 2019 sont en effet documentés à la fois par des observations de terrain (débordements, dégâts localisés) et par des données pluviométriques distribuées issues de la base COMEPHORE. Ces informations rendent possible leur reconstitution dans une analyse hydraulique, en complément des scénarios théoriques. Le Tableau 18 présente les débits de pointe simulés (Q_{max}) et les volumes d'eau écoulée associés pour ces événements selon différents scénarios d'AMC. Ces résultats, détaillés dans la partie 4.2.3, permettent d'évaluer la représentativité de ces crues. Il ressort notamment que **l'événement de 2019, considéré avec une AMC2, présente des caractéristiques hydrologiques proches d'une crue décennale tant en termes de débit de pointe que de volume écoulé.**

Bassin versant	Scénario / Evenement	$Q_{max} (m^3/s) / Vol (hm^3)$
Puimichel	2014_AMC2	9 / 0.16
	2014_AMC3	22 / 0.77
	2019_AMC2	22 / 0.95
Rancure Amont	2014_AMC2	5 / 0.14
	2014_AMC3	23 / 0.80
	2019_AMC2	25 / 1.24
Rancure Entrée d'Oraison	2014_AMC2	14 / 0.42
	2014_AMC3	50 / 1.94
	2019_AMC2	49 / 2.29

Tableau 18. Débits de pointe simulés (Q_{max}) et volumes écoulés associés pour différents événements et scénarios de pluie (2014_AMC2, 2014_AMC3 et 2019_AMC2)

20 juin 1743

Castellet (source : Registre paroissial du Castellet - 1743 - Côte 1Mi5-0253 page 226 – (<https://www.le-castellet.fr/castellum/1743-une-crue-du-rancure>) (retranscription de Philippe Ligonesche)

« L'an mil sept cent quarante trois et le vingt du mois de juin a trois heures après midy jour de l'octave du St Sacrement la grêle emporta le vin du castelet depuy le village jusqu'à oraison, la plus grande pastre des vignes engravées, les chanvres, les segles et bleds furent coupés par la grele, embourbés ou enterré du gravier. Il plut avec une si grande rapidité que le valon de la fontaine autrement dit la coussièrre inonda les maisons dudit Castelet, remplit du gravier une grande partie des jardins, en renversa les murailles. L'église, la maison curiale et la maison du sieur Joachim Martin, de Barnabel Guillaume et plusieurs autres furent remplies d'eau jusqu'au premier étage ; trois autres du quartier dit les Bernards furent renversées par le torrent de l'eau, savoir la maison de Barnabel Barras de Pascal Itard, de Magdeleine Bachelas, la mère de Barnabel Barras, sa femme et deux de ses filles furent emportée étant dans la maison par ledit torrent, sans que personne ne périt par la grâce de dieu ; tous les troupeaux furent également emportés, sans en pouvoir garantir aucun, au nombre desquels se trouva celui du sieur Marin Boucher, de Gaspard Barbe, dont la femme se conserva sur une poutre de la croix, plusieurs tonneaux de vin renversés au Castellet le huit février de l'an mil sept cent quarante quatre. »

14 ou 15 juin 1866

Castellet : (source : *rapport de présentation du projet de PPRn du Castellet_2014*)

Déluge du 15 juin 1866 qui a passé dans le terroir des MÉES et aux environs de PUIMICHEL, du CASTELLET, d'ENTREVENNES et d'ORAISON... Au CASTELLET, l'eau avait englouti toutes les plaines et le village ». Témoignage retranscrit dans le bulletin officiel municipal, n°2 (1969).

«... considérant que chaque année lors des orages, le Plan du CASTELLET et le village même sont dévastés par le débordement des eaux du torrent (de RANCURE)... considérant surtout qu'en 1866, le 14 juin, les eaux du RANCURE grossirent tellement qu'elles inondèrent non seulement le Plan et le village en renversant et détruisant toutes les digues, mais en détériorant et dévastant toutes les propriétés, emportant le terrain, laissant à sa place les amas considérables de graviers dans les propriétés et dans le village... »

Parallèlement aux crues du RANCURE et du torrent de PUIMICHEL, le ravin de LA FOUENT aurait également connu des apports liquides et solides importants. Le village aurait été touché par des divagations importantes.

29 août 1992

Oraison : (source : *rapport de présentation du PPRn d'Oraison_1999*)

Crue du RANCURE. Le pont du lotissement Sainte-Anne est submergé et abîmé. Le lotissement du Vésier est envahi (source RTM).

Plusieurs passages endommagés (ferme Bondil + St Anne), canalisations arrachées, les 4 buses du pont St Anne bouchées, et « Des tonnes de déblais étaient enlevés par les services municipaux » (source : article de presse 09/1992).

Embâcles par « branchages » du pont des notaires (quartier St Anne), intervention des services techniques de la mairie, sous-sol de l'étude inondé (source « Archives de la mairie d'Oraison »).

Embâcles sur les ponts d'Oraison sur le Rancure et dans le lit, bois mort et branchages retirés par la société SETP, ainsi qu'un rétablissement de l'accès à la ferme Bondil (source « Archives de la mairie d'Oraison »).

06 Janvier 1994

Castellet : *(source : rapport de présentation du projet de PPRn du Castellet_2014)*

Le torrent de PUIMICHEL sort de son lit 200 m environ en amont du franchissement de la RD101 et s'étale sur la RD12 ainsi que dans les terres agricoles contiguës. Les eaux de débordement se propagent en direction du village, concernant en particulier une habitation sise à l'Est de celui-ci, entre l'ancienne et l'actuelle RD12 (sous-sol inondé).

Le torrent de PUIMICHEL déborde également dans les cultures situées sur sa rive gauche, en amont immédiat du gué de la RD101. Les eaux de débordement rejoignent LE RANCURE en passant aux abords immédiats d'une habitation.

Les eaux du RANCURE affleurent légèrement sur la RD12 au niveau notamment des deux gués présents au droit de la commune, sans verser toutefois dans les terres se trouvant à l'arrière de la route.

Oraison : *(source : rapport de présentation du PPRn d'Oraison_1999)*

Crue du RANCURE avec accumulation de matériaux au niveau du pont du Vésier et du pont Sainte-Anne nécessitant l'utilisation de ples mécaniques pour éviter les débordements (source RTM).

Entrevennes : *(source : archives mairie d'Oraison)*

Le gué de la route d'Entrevenens présente des fractures de plus de 2m de profondeur. La distillerie des Blancs est restée quasiment inaccessible. Les terres agricoles ont été inondées par la Rancure, notamment dans les secteurs où le cours d'eau a momentanément changé de lit : aux abords de la distillerie des Blancs et sur les parcelles situées en aval de la ferme du Château (exploitation Aubert).

16 Août 1998

Castellet : *(source : rapport de présentation du projet de PPRn du Castellet_2014)*

Orage important (35 mm en 3h) à l'origine d'écoulements importants provenant du ravin de LA FONTAINE (ravin de LA FOUENT) et empruntant la rue centrale du village avant de s'étaler sur la RD12 et de rejoindre LE RANCURE. L'écoulement atteint une dizaine de centimètres de hauteur et ne crée pas de désordre particulier.

Le torrent de PUIMICHEL déborde en amont du carrefour RD12/RD101 et concerne notamment les terres situées en contrebas de la route en rive droite.

Puimichel *(source : RTM)*

Débordements du ravin Maucues constatés au niveau du Camping des Matherons aujourd'hui fermé Débordements du ravin des Bronzets : affouillements dans les champs et route communale affouillée

19 janvier 2014

Castellet : *(source : RTM et CD04)*

Débordement du Rancure au niveau de la route d'accès à la déchetterie

Obstruction des buses du radier au niveau de la traversée du Puimichel par la RD101

Débordement rive droite du Puimichel sur la RD12 en amont de la confluence avec le ravin de la Lague

Obstruction de la buse du radier de la RD12 au niveau de la traversée du ravin de la Lague (engravement complet de la buse et débordement sur la chaussée)

Oraison : *(archives mairie d'Oraison)*

Débordement du Rancure en rive gauche au niveau de la ferme Bondil

16 juin 2015	Entrevennes : <i>(source : RTM)</i> Le chemin communal d'accès au hameau de Paunilles a été fortement endommagé. Débordement du ravin de Saint-Sauveur. Circulation impossible sur la voie communale pendant l'épisode.
Novembre 2019	Castellet et Puimichel : <i>(source : CD04)</i> Route d'accès à la déchetterie coupée. Zone d'accumulation d'eau en lien avec le débordement (divagation) du Puimichel en amont en rive droite et du débordement du ravin de la Lague au niveau du franchissement de la RD12 (accumulation de matériaux également) Traces d'accumulation d'écoulement sur le champs en rive gauche du Puimichel juste en amont de la RD101 Mise en charge de l'ouvrage de franchissement du Puimichel par la RD101 : garde-corps détruits Mise en charge et engravement du franchissement du ravin du Maucues par la RD12 Entrevennes : <i>(source : CD04)</i> Submersion et engravement du passage à gué de la route d'Entrevennes (RD101)

Tableau 19 Crues historiques documentées sur le bassin versant du Rancure

65/
231

2.2.2.4 Synthèse

L'étude hydrologique du bassin du Rancure fait face à une contrainte majeure : l'absence de station hydrométrique et l'absence de repères de crue recensés sur le site « Référentiel national des repères de crues »¹¹. Pour pallier ce déficit de données, plusieurs approches ont été combinées :

- une **analyse fréquentielle régionale** (SHYREG/SPEED) fournissant des estimations de débits de pointe avec intervalles de confiance,
- une **analyse pluviométrique bivariée** permettant de générer des hyétogrammes réalistes pour différentes périodes de retour,
- une **modélisation pluie-débit** (Cartino 2D), calibrée sur le bassin voisin « jaugé » de l'Asse, afin de simuler les hydrogrammes associés aux pluies bivariées et SHYREG,
- la **simulation d'événements historiques récents** (1998, 2014, 2019), pour lesquels on dispose de pluies distribuées COMEPHORE et de témoignages de débordements.

Le Tableau 20 synthétise les valeurs de débits de pointe et de volumes écoulés pour les différentes approches et périodes de retour, et constitue la base de l'analyse hydraulique. Le Tableau 18 apporte un éclairage complémentaire en montrant la représentativité hydrologique des crues récentes.

Concernant le rôle morphogène et le transport solide, l'événement de 2019 (AMC2) sera privilégié comme crue représentative d'une période de retour de l'ordre de 10 ans, car il combine données pluviométriques distribuées et observations de terrain. Pour les périodes de retour centennales, l'événement issu de l'analyse pluviométrique bivariée P100 est retenu, car il fournit des conditions hydrologiques cohérentes avec l'estimation fréquentielle et permet d'explorer les dynamiques morphologiques associées à un événement rare. Ces deux crues seront considérées, par la suite, comme les « crues de référence ».

Bassin versant	Période de Retour (TR)	Approche Régionale Combinée (SHYREG/SPEED)	Modélisation Pluies Analyse bivariée (scenarios retenus)	Modélisation Pluies SHYREG (AMC2)	Modélisation Evenements récents
		<i>Qmax (m³/s) Intervale de confiance</i>	<i>Qmax (m³/s) / Vol (hm3)</i>	<i>Qmax (m³/s) / Vol (hm3)</i>	<i>Qmax (m³/s) / Vol (hm3)</i>
Puimichel	TR10	18 / 22 / 27	8 / 0.42	13 / 0.52	-
	2019_AMC2	-	-	-	22/0.95
Rancure Amont	TR100	40 / 49 / 58	58 / 1.75	67 / 1.41	-
	TR10	24 / 29 / 35	8 / 0.50	12 / 0.59	-
Rancure Entrée	2019_AMC2	-	-	-	25/1.24
	TR100	52 / 64 / 75	66 / 2.64	59 / 1.75	-
d'Oraison	TR10	40 / 50 / 59	18 / 1.10	25 /	-
	2019_AMC2	-	-	-	49/2.29
	TR100	88 / 108 / 128	91 / 3.92	138 /	-

Tableau 20 Comparaison des débits de pointe et volumes écoulés selon les différentes approches.

¹¹ <https://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr/>

2.3 Contexte géologique et géomorphologique

Le bassin versant du Rancure s'inscrit dans un contexte géologique relativement récent. Il se situe en effet au sein d'un vaste bassin sédimentaire, le bassin de Digne – Valensole, dont le remplissage a eu lieu au cours de la partie terminale du Cénozoïque (Miocène supérieur et Pliocène, soit entre -10 millions d'années et -2 millions d'années).

Ce bassin sédimentaire s'étend vers l'Est depuis La Durance (dont le cours rectiligne depuis Château-Arnoux suit un accident tectonique majeur, dit médio-durancien), sensiblement jusqu'au droit de Digne, où il est recouvert par les chevauchements de la zone subalpine (et dont il peut être considéré comme un « avant-pays »). Le substratum mésozoïque n'est pas présent à l'affleurement sur la zone d'étude.

Deux types de dépôts géologiques se rencontrent ainsi sur le bassin versant du Rancure :

- des dépôts sédimentaires tertiaires ;
- des dépôts quaternaires résultant notamment de l'activité hydraulique et des phénomènes érosifs.

2.3.1 Les dépôts tertiaires

La carte géologique du bassin versant du Rancure (Figure 45) fait apparaître les terrains d'âge miocène, de la formation de Valensole.

La formation de Valensole présente une épaisseur estimée à 800 mètres, incluant localement jusqu'à 100 mètres de marnes rouges d'Ajonc. Le log stratigraphique réalisé lors du sondage profond en 1976 (sondage dit des Mées, de 1750 m de profondeur, réalisé dans le cadre de la recherche pétrolière) – Figure 46, montre que sous la formation de Valensole se trouvent les formations du Miocène caractérisées par des alternances de marnes, de grès et de calcaires gréseux et ensuite viennent les formations du Jurassique et Trias (-1530m) avec les calcaires dolomitiques et dolomies cristallines puis vers – 1600 m les terrains du socle paléozoïque (schistes et quartzites) repris en coupe sur la Figure 47.

Cette formation est le résultat du remplissage sédimentaire d'origine fluviatile, du bassin situé à l'Est de l'accident médio-durancien (faille de la Durance), qui débute à la fin du miocène. Le réseau hydrographique est au début du remplissage, relativement large jusqu'à 100 km vers le nord-est, l'est et le sud-est avec des apports polygéniques, par exemple avec des galets de flysch à Helminthoïdes (région interne des Alpes). Les cours d'eau divaguent dans une plaine alluviale/delta (les auteurs ne s'accordent pas sur ce point) où l'on retrouve deux cours d'eau principaux, la paléo-Durance et la paléo-Asse. Avec l'évolution du remplissage du bassin, la paléo-Asse disparaît, le bassin versant rétrécit, et de nouveaux cours d'eau drainant les marges sub-alpines en création apparaissent. Ces derniers sont responsables du remplissage de la 2ème période, avec des galets provenant uniquement de l'érosion des marges sub-alpines (galets monogéniques).

La fin du remplissage du bassin est marquée par la fin des déformations alpines mio-pliocène et le changement du jeu de l'accident médiodorancien en décrochement compressif senestre. Ce jeu entraîne à l'est le plissement des formations qui se localise pour partie sur les structures préexistantes anté-oligocène. Ces déformations affectent différemment les conglomérats avec les déformations marquées au nord qui s'amenuisent vers le sud.

Le bassin versant du Rancure vient prendre place au sein de cette formation du Mio-Pliocène.

Des analyses menées sur le chevelu du bassin versant (Collina-Girard et Griboulard, 1990 [27]) ont mis en évidence une série de déformation avec, sur une ligne nord-est-sud-ouest, une forme d'anticlinal au nord du bassin et une synforme au milieu. Les auteurs mettent également en évidence une zone de discontinuité structurale. Cette discontinuité ressort peu dans le paysage.

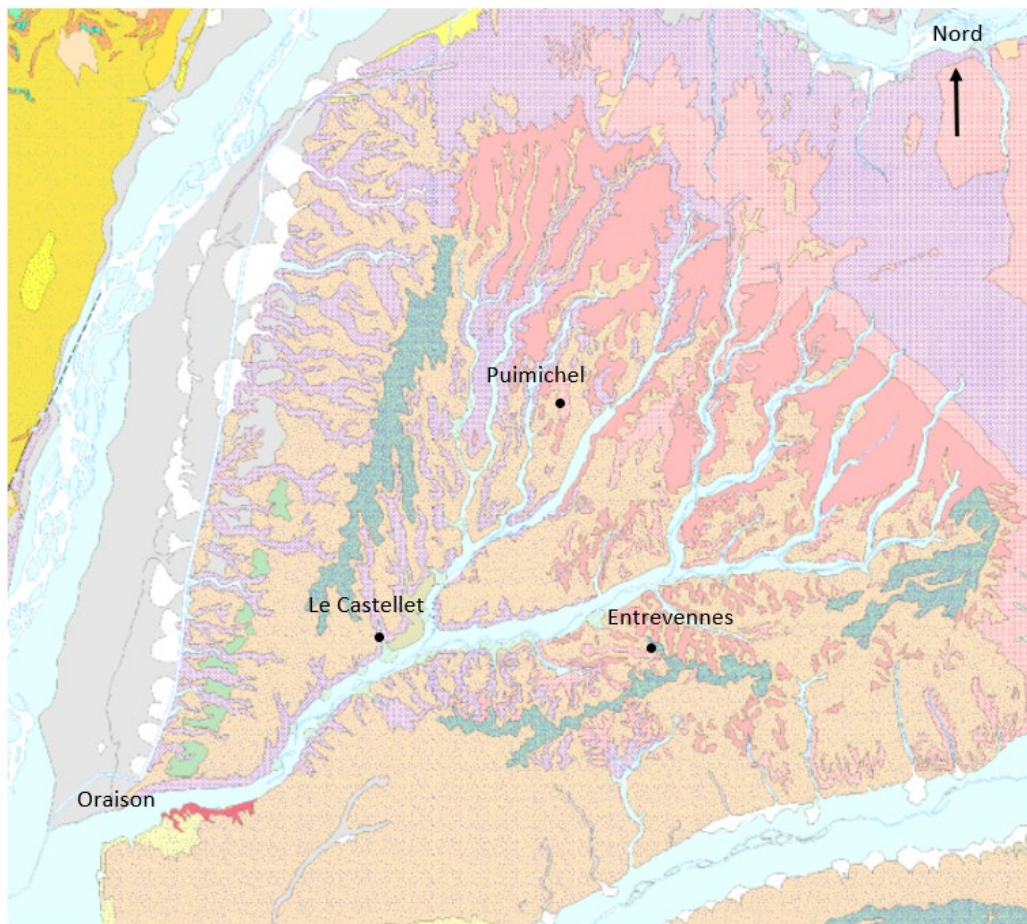


Figure 45 : Extrait carte géologique (vecteur harmonisé) - BRGM 1/50000 – en beige, en violet à point bleu et en rose à point rouge les différentes formations de poudingues, en vert les niveaux dit « sommital du plateau de Valensole », en rose/rouge uniforme les marnes d'Ajonc, en rouge avant Oraison des lentilles de marnes et pour les autres couleurs ou figurés les formations fluviales ou des colluvions.

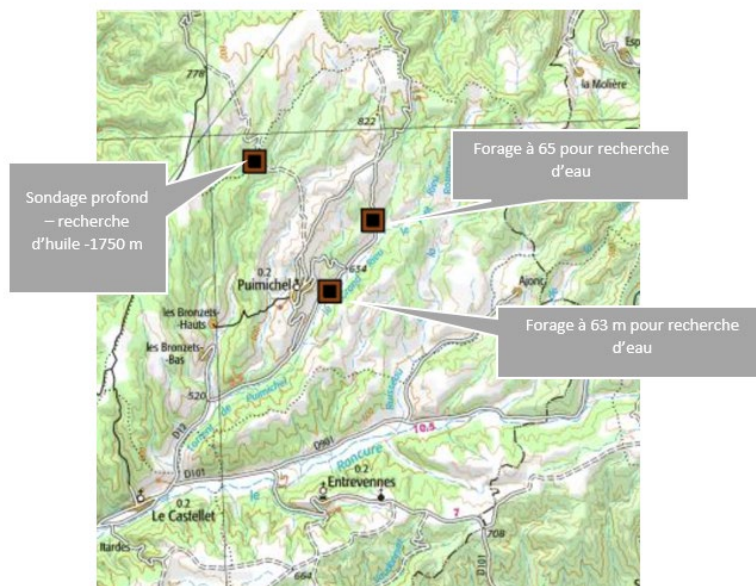


Figure 46 : Extrait BSS – sondages et forages avec géologie sur le secteur d'étude

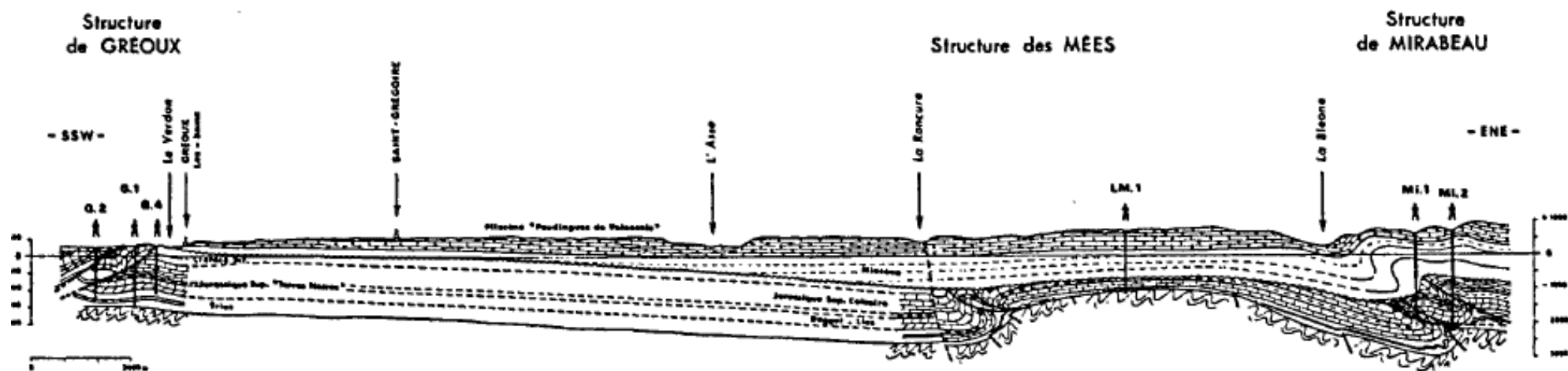


Figure 47 : Coupe géologique schématique du plateau de Valensole, in P. Dubois et R. Curnelle, 1978 ([28])

2.3.2 Les dépôts quaternaires

La morphologie du bassin versant, se traduisant par une érosion au cœur du massif, débute au quaternaire par l'abaissement du niveau de base hydrographique. En termes de dépôts, il est ainsi possible de distinguer :

- les alluvions actuelles ou récentes, principalement du Rancure, et représentées par des éléments résultants directement du remaniement des conglomérats de Valensole ;
- les cônes de déjection, d'édification plus ou moins ancienne, au débouché des principaux ravins entaillant les conglomérats de Valensole ;
- les colluvions, matériaux issus de l'altération des terrains sous-jacents.

Les lithologies rencontrées au niveau du bassin versant du Rancure, traduisent les origines fluviales du dépôt avec des poudingues à ciment gréseux, très indurés (faciès paléodurancien), alternant avec des marnes grises ou rougeâtres, des poudingues (faciès sub-alpin) composés de galets calcaires et des marnes rouges (marnes rouges d'Ajonc).

2.3.3 Géomorphologie

2.3.3.1 Contexte géomorphologique

Le bassin versant du Rancure s'est installé par érosion du plateau sédimentaire Miocène (Figure 48), érosion par de nombreux ravins (vallons) selon un axe NE-SO. Les vallons ont plus ou moins entaillé les formations conglomératiques et/ou marneuses présentes. Les reliefs sont plutôt peu raides (Figure 49), avec cependant des zones plus abruptes (notamment limite du bassin versant au sud), les pentes sont fonction du niveau d'induration des conglomérats et/ou des niveaux d'érosion active des marnes. Les pentes peu raides ont permis l'installation d'activité agricole de type culture, ayant ainsi remanié pour partie les fonds de vallon (Figure 50).



Figure 48 : Vue panoramique depuis la source du vallon de St Firmin (amont du Puimichel).



Figure 49 : Reliefs caractéristiques du bassin versant – succession de crête et vallons, tous altimétriquement plus bas que le Plateau.



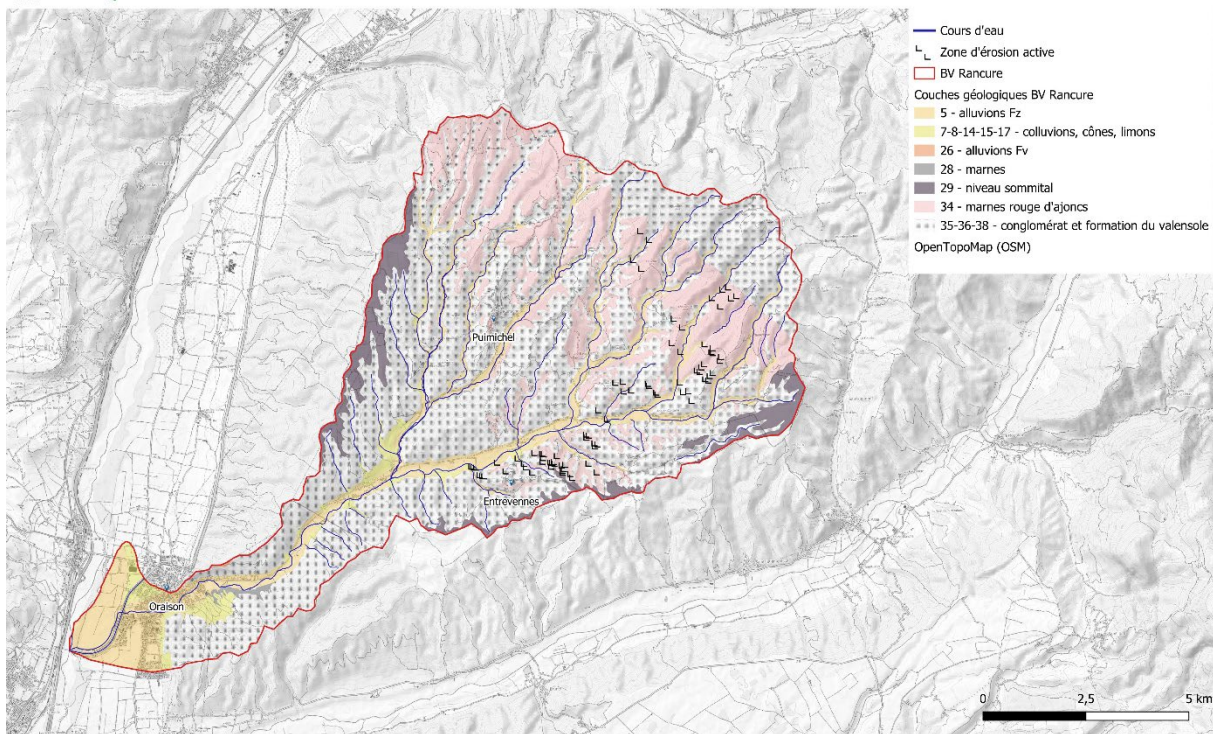
Figure 50 : Champ cultivé en fond de vallon (Les Plaines)

Les points hauts du bassin versant sont composés en partie nord des anciennes terrasses de la Durance et au Sud par les niveaux sommitaux du Plateau de Valensole (Figure 51 – gris foncé sur la carte).

Compte tenu du fonctionnement des cours d'eau du versant, il convient de mettre en évidence les zones potentielles d'apport / de réserves en matériaux, présents au niveau du bassin versant. L'ensemble des observations et analyse de terrain sont reportés sur la carte géomorphologiques de la Figure 51.

Cette carte met en évidence les zones d'érosion active identifiées à partir des observations de terrain (Figure 52, Figure 53 et Figure 54) et de l'analyse des photographies aériennes, en lien avec la géologie observable. Ces zones correspondent à des secteurs où les matériaux sont disponibles pour alimenter les cours d'eau en charge solide. **Cependant, les zones d'érosion identifiées se situent majoritairement dans des formations marneuses, qui contribuent principalement à l'apport de matériaux fins. Les apports en matériaux plus grossiers, comme les galets, ne sont possibles que localement, en fond de rivière ou au niveau des zones d'éboulis et de colluvions situées en pied de versant** (formations de couleur jaune-orangé sur la Figure 54).

La formation des marnes d'Ajonc (en rouge sur la Figure 51) est, elle aussi, un « réservoir » de matériaux, facilement érodables, cependant elle ne fournit que des matériaux fins et peu de matériaux grossiers.



Cerema Méditerranée
www.cerema.fr

Figure 51 : Carte géomorphologique du BV du Rancure, mettant en évidence sur fond de carte géologique, les zones d'érosion active ainsi que les formations géologiques sensibles à l'érosion (formations en couleurs sur la carte).



Figure 52 : Zone d'érosion localisée au niveau du lieu-dit Ajonc.



Figure 53 : Au premier plan, zone d'érosion active située en bordure du plateau au-dessus d'Entrevennes.



Figure 54 : Zone d'érosion active en bordure du Rancure au niveau du gué d'Entrevennes

2.3.3.2 Impact morphologique

Caractéristiques des profils en long du Rancure et du Puimichel :

Le bassin versant étudié est structuré autour de deux cours d'eau principaux : le Rancure et son affluent, le Puimichel. Les profils en long de ces deux cours d'eau présentent une géométrie relativement régulière, en particulier sans rupture de pente significative, comme l'illustre la Figure 55. On observe toutefois que le Puimichel se distingue par une pente plus marquée, tandis que le Rancure affiche une pente plus douce et une légère courbure sur l'ensemble de son développement.

Le calcul de l'indice de concavité IC, tel que défini par Langbein (1964), met en évidence des valeurs faibles pour les deux cours d'eau étudiés : 0,24 pour le Rancure et 0,08 pour le Puimichel. Ces résultats traduisent des profils en long faiblement concaves, proches de la linéarité, en particulier pour le Puimichel dont l'indice est proche de zéro.

Cette faible concavité se retrouve également lorsque l'on considère les profils anciens des cours d'eau, reconstruits à partir des terrasses alluviales encore visibles aujourd'hui (voir paragraphe 3.2.4.2). Ces formations montrent que la géométrie du profil longitudinal n'a que peu évolué depuis cette période, confirmant la stabilité morphologique relative des tronçons étudiés.

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

Les variations locales observées, notamment sur le Puimichel, s'expliquent principalement par des interventions anthropiques telles que des passages à gué ou des ouvrages de franchissement.

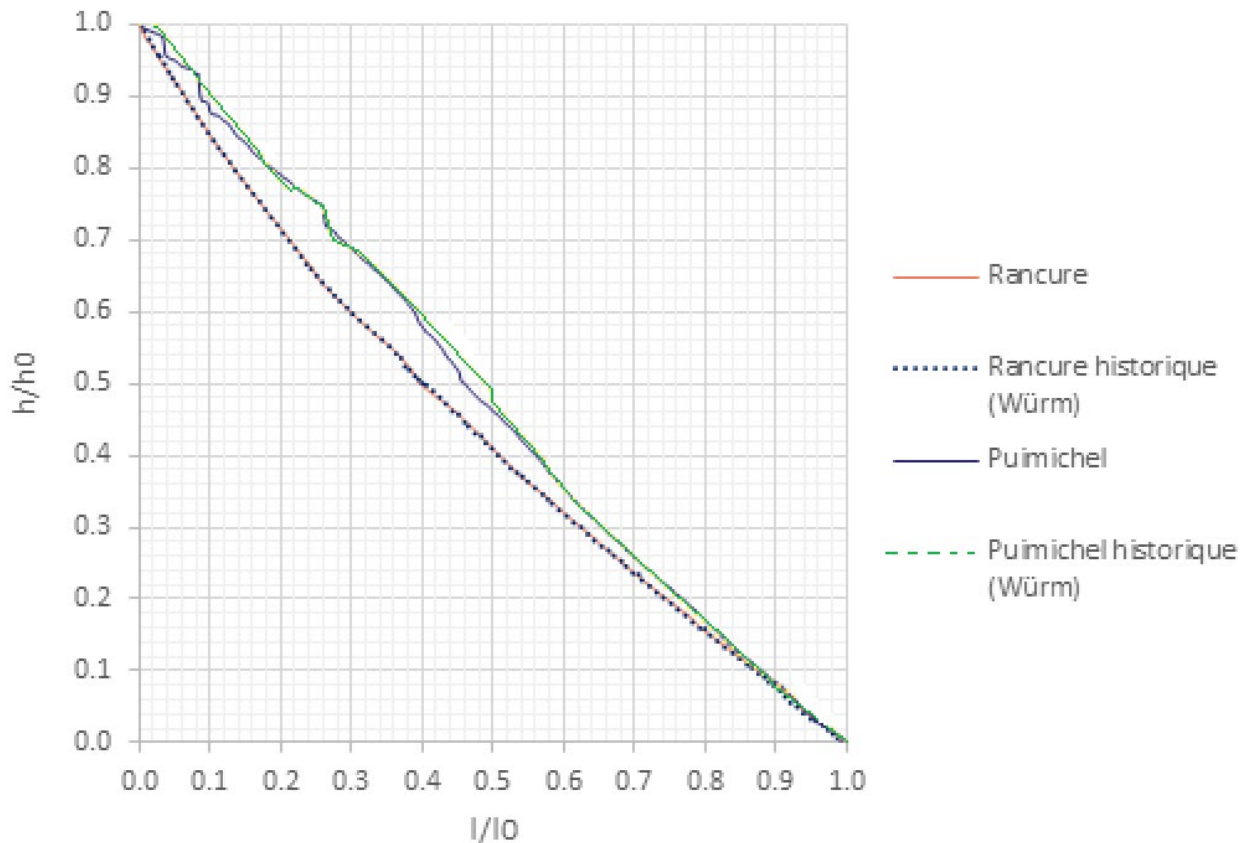


Figure 55 : Profils en long adimensionnés du Rancure et du Puimichel.

Impact de la lithologie sur les profils en long du Rancure et du Puimichel :

La lithologie et la tectonique sont responsables à la fois des orientations du cours d'eau mais aussi des profils des cours d'eau.

L'analyse du profil en long en échelle semi-logarithmique permet de voir apparaître différents tronçons dans le profil en long d'un cours d'eau. D'après différents auteurs, les ruptures de pentes peuvent se rattacher à la tectonique ou à la lithologie, mais également à la capacité érosive du cours d'eau sous l'apport hydrologique d'un affluent. Ce dernier point n'est pas pris en compte dans un premier temps.

C'est ainsi que sur les deux principaux cours d'eau du bassin versant du Rancure, le Puimichel et le Rancure (Figure 56 et Figure 57), les profils en long font ressortir trois tronçons, plus marqués pour le Puimichel. Une analyse de la lithologie a permis de reporter la lithologie sur ces différents tronçons.

Les tronçons 1 se situent dans des marnes rouges d'Ajonc, matériaux meuble facilement érodable pour chacun des deux cours d'eau. Ensuite, les tronçons 2 pourraient marquer une transition vers une lithologie uniquement constituée de Poudingue, cette interprétation semble convenir pour le Puimichel, cependant pour le Rancure cette hypothèse n'est pas aussi pertinente.

Les tronçons 3 se situent uniquement dans les poudingues pour chacun des deux cours d'eau.

Le tronçon 1 est à prendre avec prudence en raison des deux cassures de pentes attribuées au passage à gué, qui ne sont pas représentatifs de la pente naturelle du cours d'eau.

L'influence tectonique n'est pas pertinente dans le cas des deux cours d'eau compte tenu de l'histoire géologique du bassin versant.

Synthèse sur l'impact morphologique du Rancure et du Puimichel :

Concernant la fourniture de matériaux disponibles, les zones d'érosion active sont localisées dans les formations marneuses, qui alimentent majoritairement les cours d'eau en matériaux fins. **Les apports en matériaux grossiers, comme les galets, sont localisés en fond de rivière ou en pied de versant.**

La structuration des profils en long du Rancure et en particulier du Puimichel est liée à la lithologie traversée, notamment aux marnes rouges d'Ajonc et aux poudingues. Les ruptures de pente observées correspondent globalement aux transitions lithologiques.

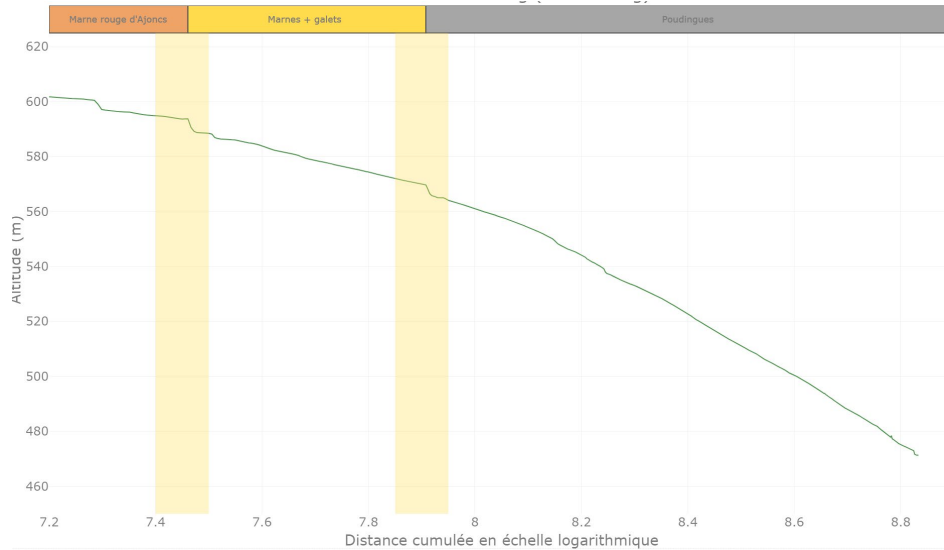


Figure 56 : Profil en long du Puimichel en échelle semi-logarithmique interprété avec la lithologie.

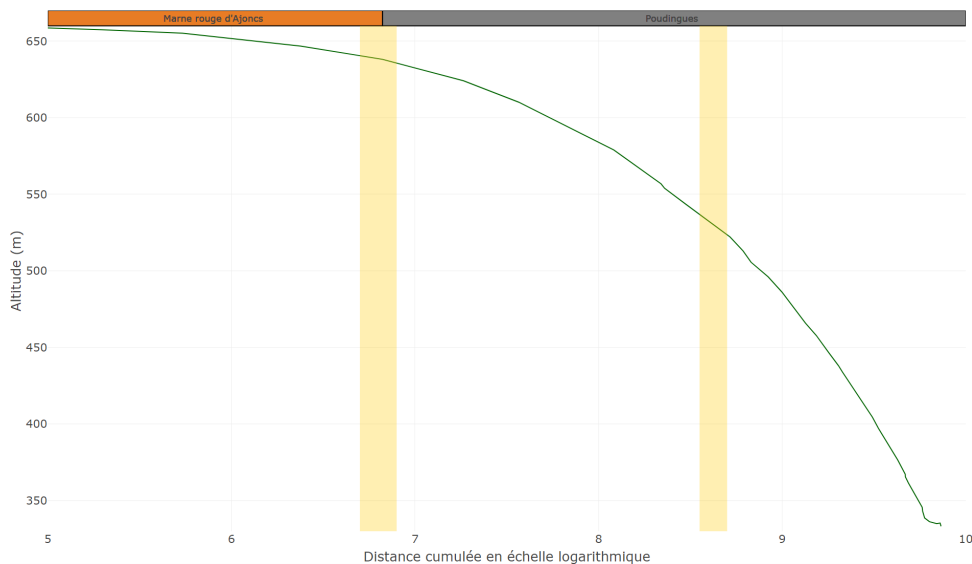


Figure 57 : Profil en long du Rancure en échelle semi-logarithmique interprété avec la lithologie.

2.4 Contexte hydrogéologique

La formation des poudingues de Valensole se caractérise par une épaisseur de poudingues d'environ 800 m (sondage des Mées) avec des intercalations de marnes (cf. paragraphe 2.3). Les poudingues peuvent être plus ou moins cimentés, présentant ainsi des caractéristiques de perméabilité hétérogènes. La géométrie de ces formations est complexe, avec des variations latérales et verticales importantes, rendant difficile la modélisation précise des aquifères.

Il est possible, que les formations sous-jacentes (-1530 m), puissent être le siège d'un aquifère important notamment au niveau des calcaires.

De manière globale ce milieu est dit à double porosité : une porosité matricielle et une porosité de fissures. D'un point de vue hydrologique, il s'agit d'une entité à nappe libre (extrait BDLisa – Figure 58), avec potentiellement des zones de nappes captives liées à la présence de niveaux plus imperméables. La présence de nappes perchées, liées à la présence d'horizons plus imperméables, est à l'origine de petites sources – Figure 59.

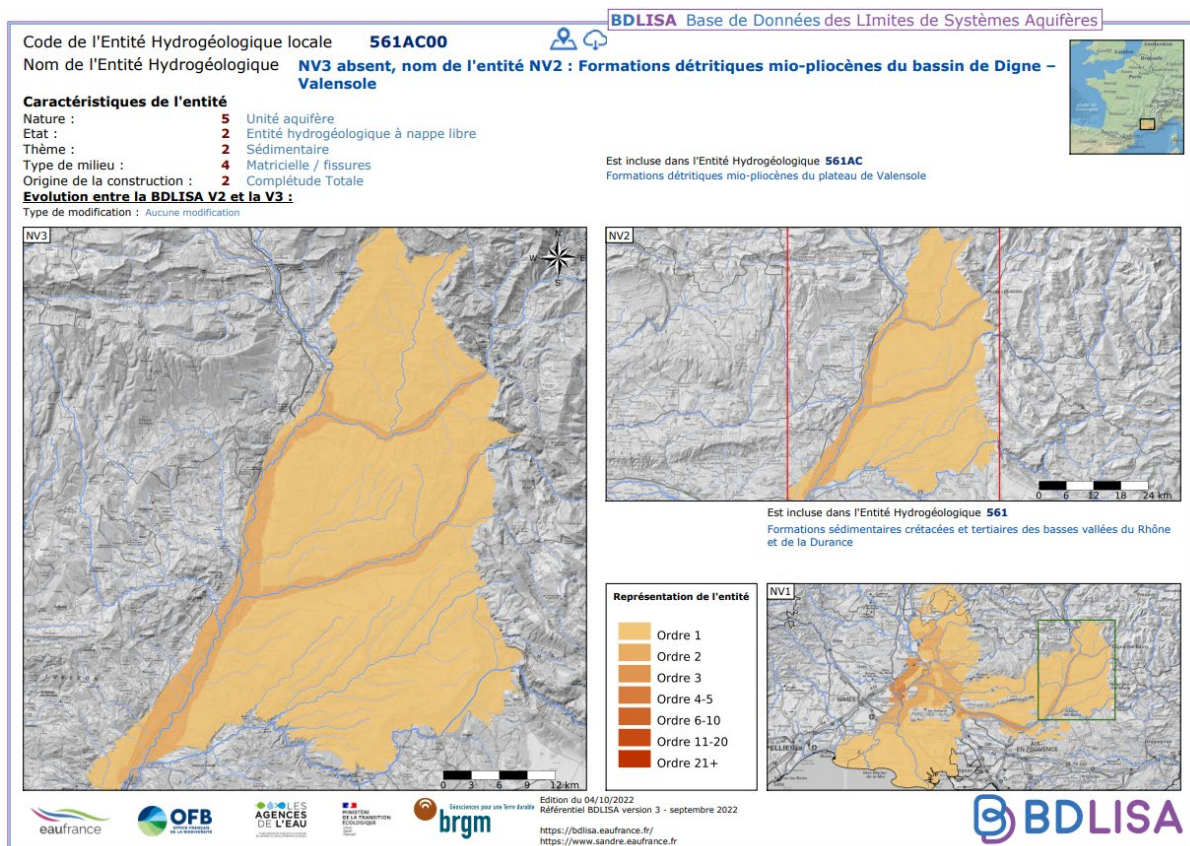


Figure 58 : Extrait BDLisa - sur l'entité hydrogéologique au sein de laquelle se situe le BV du Rancure

La ressource en eau, liée au poudingue, est donc hétérogène. Quelques sources sont documentées dans la BSS (banque des données du sous-sol), ainsi que de nombreux forages, traduisant le besoin en eau du secteur d'étude – Figure 59. Une grande majorité des forages en eau est installée en fond de vallée pour essayer d'intercepter les nappes des cours d'eau présent ou en pied de pente des vallons, pour prendre en considération les petites nappes des colluvions de pentes.

De manière générale les émergences (sources) sont situées au niveau des talwegs, sur les flancs des ravins ou au niveau du plateau, au niveau des contacts marneux. Par exemple dans deux des forages (documentés) d'eau du vallon du Puimichel réalisés à des profondeurs de 63 et 65 m, la présence d'eau se trouve dans les poudingues, situés sous des niveaux marneux. C'est ainsi que sur celui le plus en amont, l'eau se trouve à 22 m de profondeur et celui plus en aval à 45 m de profondeur.

Dans une étude du BRGM réalisée dans le cadre d'analyse de la pollution en nitrates au niveau du plateau de Valensole datant de 1999, il est mentionné le fait que l'organisation des conglomerats et leur hétérogénéité induit des débits des diverses sources majoritairement faibles et fortement dépendants des variations saisonnières.

De même, les forages réalisés ne font pas ressortir la présence de réservoir aquifère important. Les débits obtenus sont de l'ordre de quelques mètres cubes/heure, et exceptionnellement quelques dizaines de m³/h.

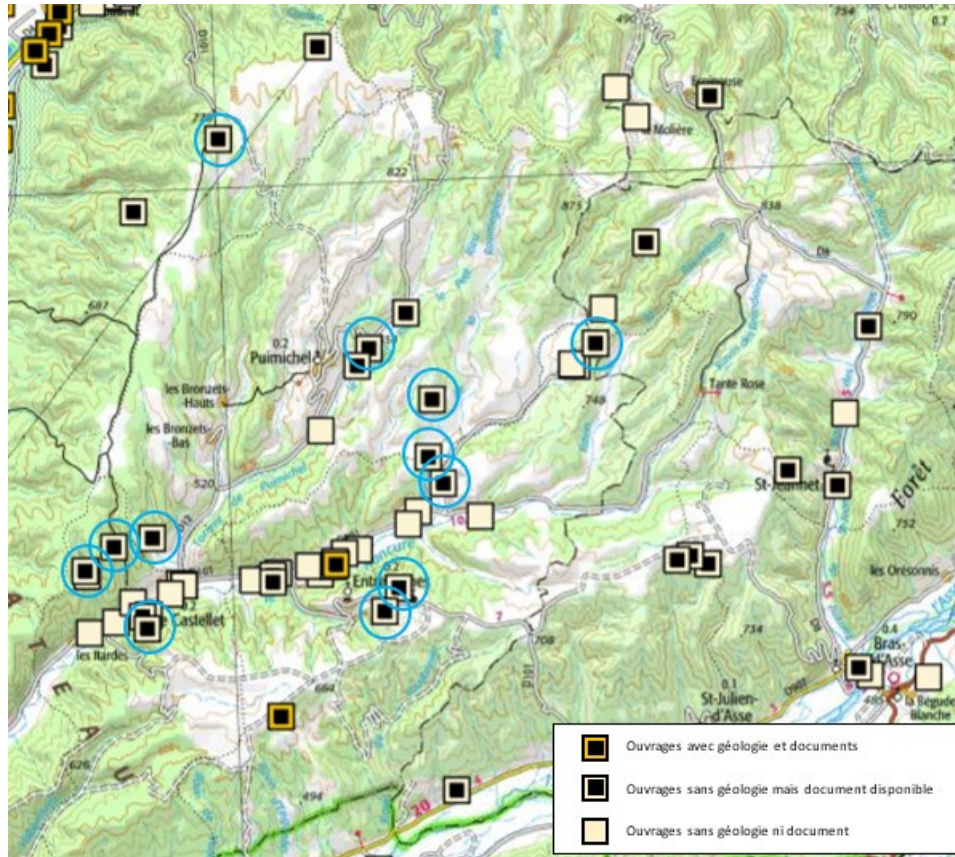


Figure 59 : extrait BSS montrant l'ensemble des données disponibles concernant les forages, puits et sources sur le BV du Rancure, entouré en bleu les points marquant une source.

Des données de suivi piézométrique ont été transmises par DLVAgglo pour deux forages suivis au droit de la nappe alluviale ou de fond de vallée du Rancure : le forage d'Entrevennes et le forage du Castellet. Les chroniques disponibles couvrent les années hydrologiques 2022-2023 à 2025-2026, cette dernière étant encore partielle à la date de transmission des données (voir Figure 65 et Figure 66).

Les niveaux ont été analysés en profondeur de nappe sous le terrain naturel. À Entrevennes, la nappe apparaît globalement peu profonde, avec des niveaux généralement compris entre environ 0,5 et 1,5 m sous le terrain naturel depuis 2023-2024. L'année hydrologique 2022-2023 se distingue par des niveaux plus bas en automne et début d'hiver, la profondeur maximale atteignant près de 2,9 m. Depuis 2023, les fluctuations interannuelles sont plus limitées, avec une amplitude inférieure ou proche de 1 m, traduisant une nappe de fond de vallée relativement réactive mais globalement proche du terrain naturel.

Le forage du Castellet présente une variabilité beaucoup plus marquée. L'année 2022-2023 montre un niveau de nappe particulièrement bas, avec une profondeur maximale supérieure à 7 m sous le terrain naturel. Les années suivantes indiquent des remontées saisonnières rapides, avec des niveaux pouvant revenir autour de 0,6 à 0,8 m sous le sol en période de recharge. Ce comportement traduit une nappe plus fluctuante, vraisemblablement plus sensible aux conditions de recharge saisonnière, aux conditions locales de drainage et, potentiellement, aux prélèvements.

Ces suivis confirment le caractère hétérogène et réactif des réservoirs de fond de vallée du Rancure. Ils sont cohérents avec le contexte hydrogéologique général des poudingues de Valensole, marqué par une perméabilité variable, des circulations localement compartimentées et des interactions possibles entre nappes de versant, colluvions et formations alluviales de fond de vallée. Ils montrent également que la nappe peut être très proche du terrain naturel sur certains secteurs et à certaines périodes, ce qui constitue un élément important pour l'analyse des interactions entre incision du lit, fonctionnement de la ripisylve, humidité résiduelle du fond de vallée et usages liés à l'alimentation en eau potable.

Ces données doivent toutefois être interprétées avec prudence. Elles caractérisent la dynamique locale des deux forages suivis, mais ne permettent pas à elles seules de reconstituer précisément la géométrie de la nappe, les gradients hydrauliques ou les échanges nappe-rivière à l'échelle du bassin. Elles apportent néanmoins un indicateur complémentaire utile sur la dynamique saisonnière et interannuelle de la ressource souterraine associée au Rancure.

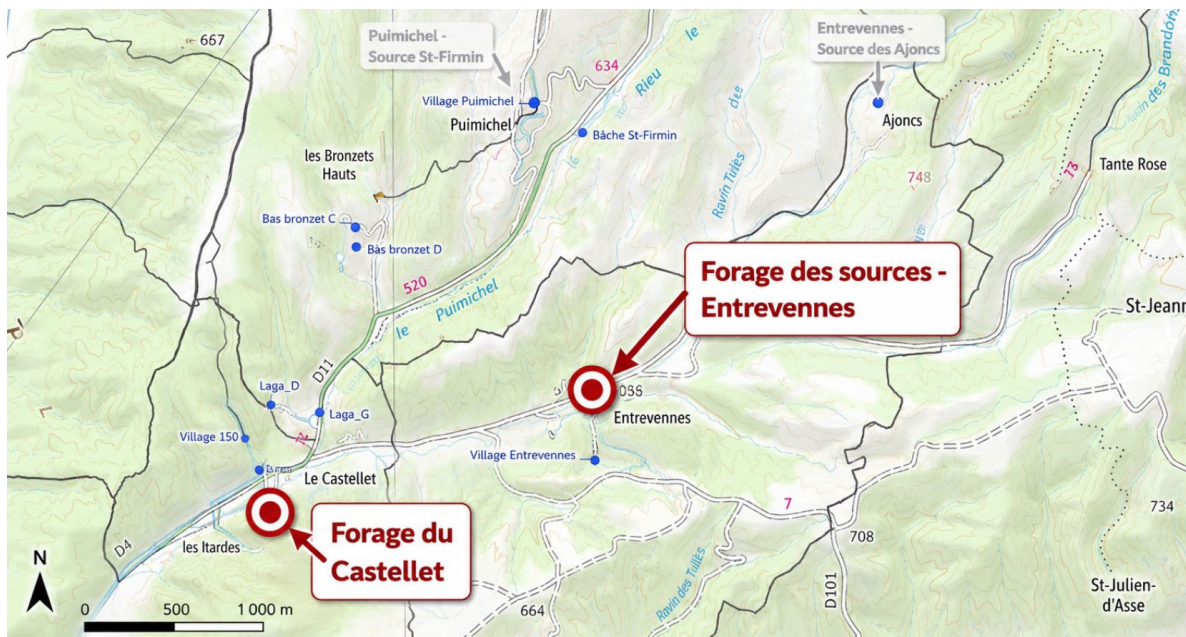


Figure 60 : Localisation des deux forages suivis au droit de la nappe de fond de vallée du Rancure : forage du Castellet à l'aval et forage des Sources à Entrevennes plus en amont.

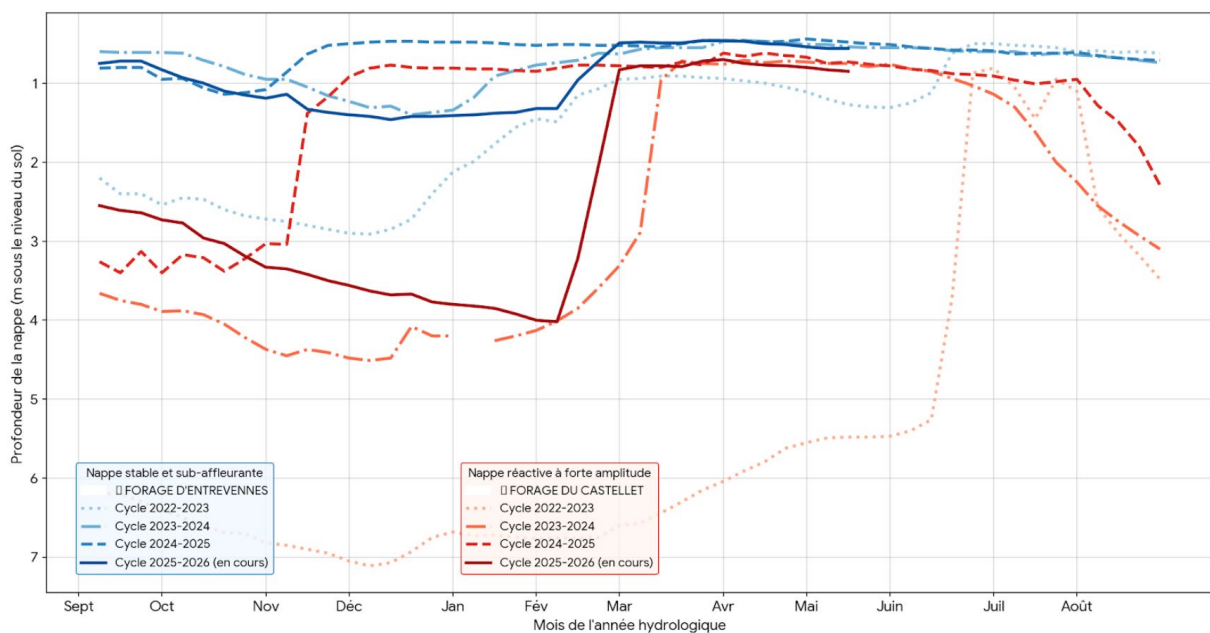


Figure 61 : Suivi piézométrique des forages suivis d'Entrevennes et du Castellet, exprimé en profondeur de nappe sous le terrain naturel, par année hydrologique de 2022 à 2026. Les faibles valeurs correspondent à une nappe haute, proche du terrain naturel.

2.5 Contexte humain

Le bassin versant du Rancure est marqué par une faible densité de population et une urbanisation limitée, concentrée principalement dans la partie aval autour d'Oraison. Le territoire se caractérise par une organisation spatiale où les zones habitées, les infrastructures routières et les usages liés à l'eau s'inscrivent dans un contexte rural dominé par les activités agricoles.

La compréhension de ces dynamiques humaines est importante pour identifier les enjeux associés aux inondations, aux infrastructures et à la gestion de la ressource en eau.

2.5.1 Population et environnement socio-économique

Le bassin versant du Rancure présente une densité de population moyenne de 24 habitants par km². La majorité de cette population est concentrée dans la partie aval du bassin, notamment sur la commune d'Oraison. En dehors d'Oraison, l'urbanisation est faible, et la densité de population descend à 10 habitants par km². Les données démographiques spécifiques pour les communes du bassin versant sont détaillées dans le Tableau 21 issu de l'étude du SMAB en 2021 [4].

	Population des communes			Proratisation au bassin versant du Rancure		
	2007	2012	2017	Surface totale de la commune	Surface dans BV	Population proratisée
Oraison	5 092	5 732	5 955	38,4	8,7	1 349
Le Castellet	249	292	299	18,9	8,5	134
Entrevennes	163	168	171	29,8	19,8	114
Puimichel	254	223	248	36,8	36,8	248
Les Mées	3 451	3 598	3 778	65,4	5,3	306
Saint-Jeannet	55	58	55	21,1	8,8	23
Saint-Julien-d'Asse	156	190	214	25,6	5,9	49
Bras-d'Asse	490	569	578	26,1	2,2	49

Tableau 21 Démographie sur le bassin versant du Rancure ([4])

2.5.2 Voies de communication

Le bassin versant du Rancure est traversé par un réseau routier structurant qui relie les principales communes et dessert les zones agricoles et d'habitat dispersé. Parmi les axes principaux, la **RD101** et la **RD12** occupent une place stratégique pour les déplacements locaux et intercommunaux. Ces infrastructures, situées en fond de vallée ou à proximité immédiate du lit du Rancure et de ses affluents, constituent des enjeux majeurs en cas de crue. Plusieurs secteurs ont déjà été identifiés comme vulnérables lors des débordements du Rancure, notamment au droit des traversées du Castellet et d'Oraison.

Le bassin compte également de nombreux ouvrages de franchissement — ponts, passages busés et passages à gué — qui assurent la continuité du réseau routier mais peuvent perturber la dynamique hydrosédimentaire et limiter la continuité écologique. Certains de ces ouvrages présentent des problématiques de sous-dimensionnement, aggravant le risque de débordement localisé. À ce titre, plusieurs projets d'aménagement ont été évoqués ou engagés, notamment la reconstruction du pont du

Puimichel, la réfection des ponts de Sainte-Anne et de Vézier à Oraison, ou encore l'aménagement de passages à gué pour améliorer la transparence hydraulique.

Par ailleurs, sur certains secteurs, le lit du Rancure et de plusieurs de ses affluents est ponctuellement utilisé comme piste d'accès à des parcelles agricoles, ce qui peut accentuer les pressions locales sur les milieux.

2.5.3 Usages liés à l'eau

La gestion de la ressource en eau sur le bassin versant du Rancure repose sur des usages variés, principalement liés à l'alimentation en eau potable, à l'assainissement et à certaines activités agricoles ou privées. Plusieurs usages de l'eau sont ainsi identifiés sur le bassin versant du Rancure :

- **Prélèvements en eau potable (AEP)** : il existe 7 captages de sources ou forages pour l'AEP publique, dont certains sont désormais abandonnés. Des prélèvements privés et pour des besoins agroalimentaires sont également présents (voir Figure 59).
- **Captages prioritaires** : Trois captages à Entrevennes (JANCHIER, LIEBAUDS, Ravin de Reclaux) sont classés comme prioritaires. Ces captages puisent dans la masse d'eau souterraine des conglomérats du plateau de Valensole (FRDG209), laquelle est contaminée par des produits phytosanitaires, notamment le 2,6-dichlorobenzamide, et des nitrates. Une retenue collinaire (lac) est également située en bordure du Rancure, en rive gauche, en amont de la confluence avec le Torrent de Puimichel, sur la commune du Castellet.
- **Rejets d'eaux usées** : Les 8 communes du bassin versant disposent d'installations collectives de traitement des eaux usées (stations d'épuration), mais toutes ne rejettent pas leurs eaux traitées dans le bassin versant du Rancure.
- **Autres usages** : Les autres usages liés à l'eau sont fortement limités par le caractère intermittent des cours d'eau du bassin. Une vigilance particulière est apportée aux réseaux d'assainissement et d'eau implantés dans les ravins en raison des risques de pollution ou de prélèvements.

Les usages actuels de l'eau s'inscrivent dans une histoire plus ancienne de mobilisation de la ressource du Rancure et de ses affluents. Les témoignages recueillis localement par le SMAB mettent en évidence plusieurs usages aujourd'hui abandonnés ou très fortement transformés.

Ainsi, d'après les témoignages, l'eau du Rancure était autrefois prélevée par des canaux pour des usages d'artisanat ou de petites usines.

Il y a au moins un siècle, au gué en aval de la Bastide des Castel, en rive droite proche de la limite communale du Castellet, **une prise d'eau alimentait un canal qui desservait une scierie hydraulique** (voir Figure 62). Cette scierie (aujourd'hui une ruine) n'est plus utilisée depuis au moins 1960. Le tracé du canal abandonné en aval de l'ancienne scierie n'est plus visible.



Figure 62 : Emplacement de l'ancien canal alimentant la scierie hydraulique – aujourd'hui abandonné

Dans les années 60 ou 70, un lac pour l'irrigation a été creusé en rive gauche du Rancure au Castellet. Une conduite distribue les eaux de ce lac vers les canaux du Castellet (grand canal et petit canal) : voir Figure 63. Le grand canal servait autrefois à une petite usine visible sur la photo ancienne ci-dessous. Le petit canal s'écoulait à travers le village, jusqu'au moulin de Bicaïl, aujourd'hui transformé en habitations (voir Figure 64).

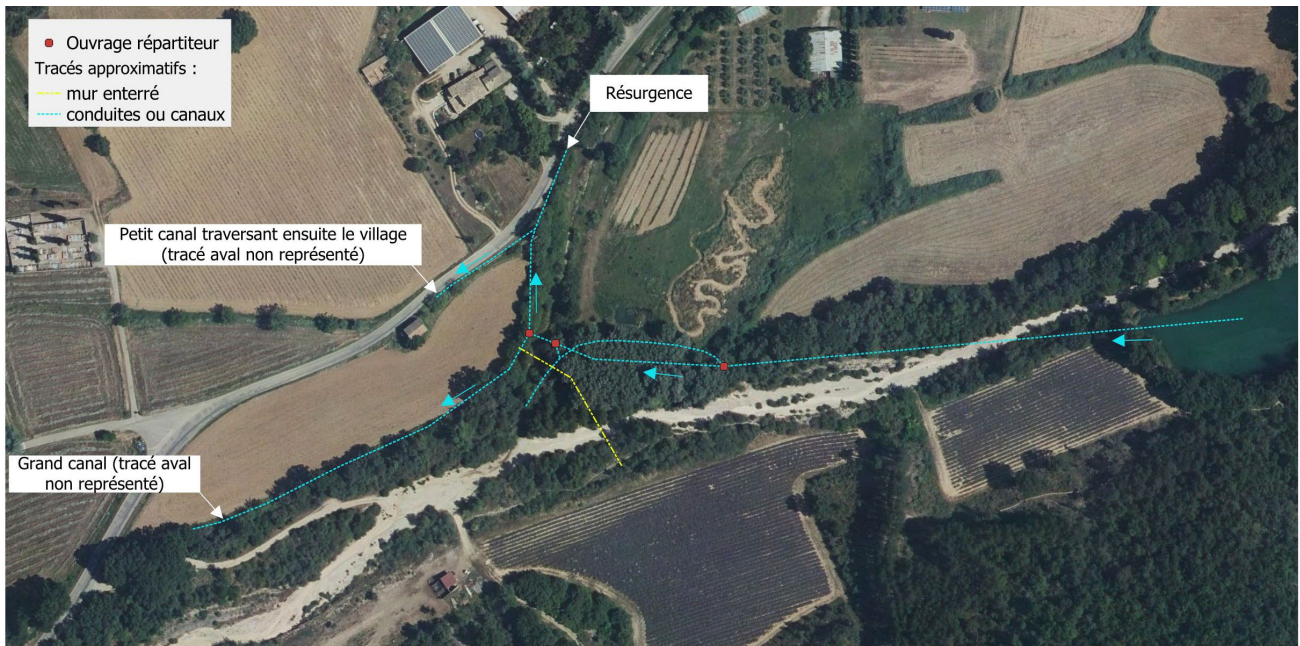


Figure 63 : Tracé indicatif des conduites ou canaux, à noter que le 1er ouvrage répartiteur reçoit également les eaux d'un adous visible sur la photo aérienne

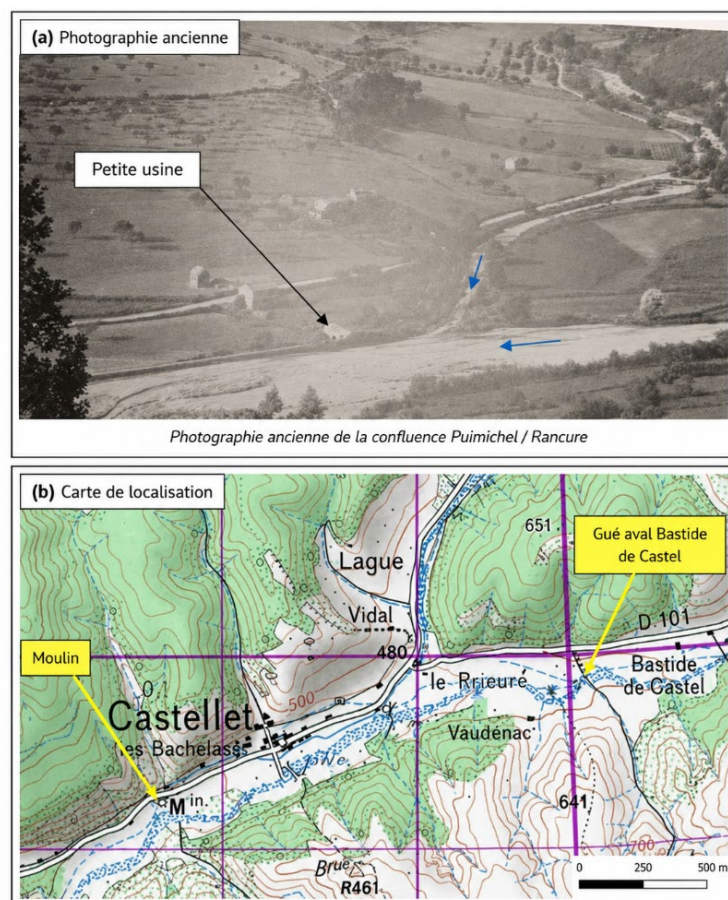


Figure 64 : Témoignages relatifs aux anciens usages de l'eau au droit du Castellet : photographie ancienne de la confluence Puimichel/Rancure avec localisation d'une petite usine, et carte de repérage du moulin du Castellet et du gué aval de la Bastide de Castet.

Enfin, d'après l'ouvrage « Les insurgés républicains d'Oraison et du val de Rancure » ([29]), des moulins à blé utilisaient les eaux du Rancure :

- à Entrevennes en 1826, quartier de la Palud,
- à Puimichel en 1826, quartier du Grand pré,
- au Castellet en 1838 (3 moulins).

Le bassin versant du Rancure présente un **caractère rural** marqué, avec une **faible densité de population** (24 hab./km² en moyenne), concentrée principalement sur **Oraison**, tandis que les autres communes restent peu urbanisées. Le réseau routier repose sur quelques **axes structurants (RD101, RD12)** et plusieurs **ouvrages de franchissement** exposés aux débordements lors des crues. Par ailleurs, le lit du Rancure et de certains affluents est parfois utilisé comme **piste d'accès agricole**, ce qui peut accentuer localement les pressions sur les milieux.

La **gestion de l'eau** constitue un enjeu majeur : le bassin compte plusieurs **captages d'alimentation** (dont trois prioritaires), **une retenue collinaire** au Castellet, ainsi que des **stations d'épuration et réseaux d'assainissement** susceptibles d'impacter la qualité des eaux. Enfin, le **caractère intermittent** des cours d'eau limite les autres usages tout en renforçant la nécessité de préserver la ressource et de sécuriser les infrastructures.

2.6 Contexte environnemental

Le bassin versant du Rancure présente un patrimoine environnemental riche et diversifié, marqué par la coexistence d'enjeux écologiques, hydrologiques et réglementaires. Les éléments suivants présentent les principaux zonages de protection, la diversité des habitats et des espèces, ainsi que l'état des ressources en eau.

2.6.1 Lien entre hydromorphologie et biodiversité

La présente étude ne concerne pas spécifiquement la biodiversité associée aux milieux aquatiques et humides. Toutefois, elle concerne la morphologie des cours d'eau, qui est le support physique des habitats aquatiques et humides présents sur le bassin versant. C'est pourquoi, des éléments de ce contexte environnemental sont développés aux chapitres à suivre.

De manière générale, le bon fonctionnement morphologique des cours d'eau, se traduit par une dynamique de dépôt et d'érosion au sein de son espace de lit majeur. De façon simplifiée, l'évolution morphologique des cours d'eau marque la recherche d'un équilibre précaire entre la fourniture sédimentaire issue des versants, du lit et des berges, les événements de pluie suffisamment forts pour provoquer un transport sédimentaire, et les divers perturbateurs présents, souvent anthropiques.

En cas de déséquilibre marqué, il est possible d'observer une incision des lits. Ce phénomène correspond à un déficit de sédiment et à un enfoncement altimétrique des lits. Il peut être particulièrement redoutable vis-à-vis de la biodiversité.

- En effet il entraîne **un abaissement de la ligne d'eau** conduisant à l'abaissement de la nappe d'accompagnement ce qui a un effet direct sur la **forêt alluviale**. Celle-ci se trouve déconnectée du cours d'eau qui pourtant est le moteur de son évolution.
Cette évolution passe par des processus allogéniques de régénération de la forêt alluviale lors des crues, et notamment l'arrachement des arbres sénescents (arbres du passé), laissant les arbres du présent, qui ralentissent ce flux, se développer ([30]).
La crue amène des sédiments, des nutriments et des diaspores d'espèces pionnières qui colonisent les clairières dégagées et constituent le moteur de la régénération et de l'évolution de la forêt alluviale. Les premiers stades arborés de la communauté de bois tendre (saules, peupliers noirs, aulnes...) apparaissent alors (arbres potentiels).
Ainsi, l'incision par l'abaissement du toit de la nappe d'accompagnement et la diminution de la fréquence, voire de la disparition, des inondations dans la forêt alluviale, provoque des réajustements dans les communautés végétales de cette forêt et génère à terme une véritable métamorphose de la couverture végétale ([30]).
- De plus, l'incision peut s'auto-alimenter, en entraînant la **déconnexion des structures alluvionnaires**, à savoir du stock sédimentaire, normalement facilement remobilisables. Ainsi, lorsque le lit n'est pas incisé, les structures alluvionnaires sont régulièrement mobilisées avant qu'elles ne se fixent par végétalisation (strate arborée). L'incision diminue, voire interdit, la remobilisation des structures alluvionnaires ce qui favorise alors leur végétalisation... et donc leur fixation. C'est autant de matériaux qui sont sous-traités au stock alluvial et qui contribuent à favoriser l'incision en n'apportant plus de charge solide localement, c'est un phénomène « d'auto-dérégulation » de l'équilibre sédimentaire (cf. la balance de Lane, 1955).

2.6.2 Les zonages et inventaires environnementaux

Le rapport de diagnostic établi par le SMAB en 2020 ([4]) comprenait, aux chapitres 3.3.1 et 3.2.2, le détail des zonages réglementaires et institutionnels existants ainsi que des statuts réglementaires et inventaire des espaces naturels. Afin de ne pas alourdir le présent rapport, nous proposons au lecteur de se référer à ce document.

Seul le chapitre consacré aux zones humides (chapitre 3.3.1.5.) est amendé grâce aux travaux conduits depuis 2020 par le SMAB sur cette thématique (voir paragraphes ci-dessous).

2.6.3 Les milieux aquatiques

Tous les ravins du bassin sont **intermittents**. Leurs assèchs prolongés ne leur permettent pas d'abriter une vie piscicole pérenne. La déconnexion du Rancure avec la Durance ne permet pas de recolonisation piscicole, même temporaire.

Lorsqu'ils sont en eau, les ravins sont, bien entendu, des habitats pour bon nombre d'espèces : insectes, batraciens, reptiles...

Des recherches sont en cours sur les aspects écologiques ainsi que sur les flux de CO₂ associés aux rivières intermittentes.

Le bassin versant du Rancure est par ailleurs riche en **adous**. Dans le dictionnaire provençal de Simon-Jude Honnorat édité en 1846, l'adous est décrit comme une « *Source d'eau douce qui paraît fraîche en été et chaude en hiver, parce qu'elle est peu soumise aux influences extérieures* ».

En 2025, le Syndicat a conduit un **inventaire des adous** du bassin versant du Rancure.

Sur les 14 cours d'eau susceptibles d'être caractérisés comme adous, 9 présentaient encore un écoulement en période estivale (prospection en juillet). Les résultats de ce recensement sont représentés dans l'atlas accompagnant le présent rapport.

Aucun inventaire faune/flore n'a été conduit sur ces milieux mais il est indéniable qu'ils supportent une biodiversité spécifique dont l'intérêt environnemental est majoré au regard du caractère intermittent des ravins.

Le **lac du Castellet** est un habitat aquatique particulier sur le bassin versant puisque, même s'il subit des marnages importants, il est toujours en eau grâce à l'alimentation d'une source.

Cette retenue collinaire, aménagée à partir de 1975, avait une vocation initiale d'irrigation. Aujourd'hui elle a un usage d'agrément uniquement.

Une donnée de présence d'écrevisse à pattes blanches existe sur le secteur mais l'espèce n'a pas été retrouvée ces dernières années.

Concernant la **vie piscicole**, si l'intermittence du Rancure est aujourd'hui synonyme d'absence de vie piscicole, cela n'a pas toujours été le cas. Le témoignage des habitants et particulièrement de M. le maire du Castellet Benoît Gouin, M. Louis Mistral, ancien élu municipal, et M. Mathieu Weirich, agriculteur à Entrevennes, indique que le Rancure jusqu'aux années 80 environ, coulait fréquemment l'été au droit du village. Les habitants se souviennent de baignades estivales à la faveur de petits barrages.

A cette époque, une vie piscicole était présente. De petits poissons pouvaient ainsi être pêchés à l'aval du seuil du canal d'irrigation sur le Puimichel, ou dans le Rancure en amont de la distillerie. Il se dit qu'au début du XX^{ème} siècle des truites étaient pêchées dans les canaux où elles remontaient. Et en 1980, une truite proche de 30 cm aurait même été attrapée dans le Rancure en amont de la route de la déchèterie.

2.6.4 Les Zones Humides

2.6.4.1 Préambule

On pourra préciser qu'un inventaire départemental, réalisé par le CEN PACA pour l'Etat en 2012 existe. Cet inventaire à grande échelle, identifiait sur le bassin versant une unique zone humide correspondant grossièrement au lit du Rancure. Il a été utilisé dans le Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE) pour définir la trame bleue. Le Rancure et les milieux associés sont donc identifiés comme des réservoirs de biodiversité.

Cet inventaire a été complété en 2023 par le Syndicat, et 13 autres zones humides ont été ajoutées. Les zones humides sont donc au nombre de 14 et représentent aujourd'hui une surface de 168,317 ha soit 1,75% du bassin versant.

2.6.4.2 Différents types de zones humides présentes

Les bordures de cours d'eau

Les habitats naturels associés aux cours d'eau sont en lien avec les ripisylves : du latin ripa "rive", et sylva "forêt".

La ripisylve des cours d'eau du bassin versant est globalement de bonne qualité. Sur de nombreux secteurs, elle se limite toutefois à un simple cordon rivulaire, et sa stabilité se retrouve localement fortement impactée par l'incision des lits.

Il s'agit principalement d'une futaie irrégulière composée de **Chênes pubescents, Peuplier noirs, Saules blancs, Frênes, Erables champêtres, Saules pourpres, Saules drapés, Aubépines, Troènes et de Ronces**. La strate arbustive étant majoritaire sur la plupart des ravins du bassin versant.

Cette ripisylve est à considérer comme :

- **Un habitat pour de nombreuses espèces**. Un certain nombre d'espèces déterminantes qui ont conduit à la reconnaissance de la ZNIEFF « Les pénitents » sont liées à la ripisylve et aux milieux humides associés : la Fléole des sables (*Phleum arenarium*), les insectes *Pterostichus lasserrei*, *Nabis mediterraneus*, *Anthocoris ampicollis*, *Athous frigidus*, *Dibolia veyreti* et, probablement, le Grand Rhinolophe (*Rhinolophus ferrumequinum*), le Minioptère de Schreibers (*Miniopterus schreibersi*), la Barbastelle (*Barbastella barbastellus*) (informations communiquées par M. FRAPA aux services de la DDT).
- **Un corridor écologique essentiel** pour de nombreux groupes faunistiques : avifaune et chiroptères pour les plus connus qui utilisent les ripisylves pour circuler et se repérer dans l'espace.

Le syndicat mène un **programme de travaux de gestion de la ripisylve**, déclaré d'intérêt général et autorisé par l'arrêté préfectoral n°2022-012-001 du 12 janvier 2022.

L'objectif global de ces travaux est de favoriser un état dynamique permettant de maintenir et de redonner aux différentes rivières concernées et à leurs milieux connexes, une richesse écologique et paysagère tout en assurant, dans le même temps, une amélioration ou une pérennisation de leur fonctionnement hydraulique en vue de sécuriser les biens et les personnes.

Les plaines alluviales

Ces zones humides situées au-delà des ripisylves sont souvent occupées par des activités agricoles. Ce sont principalement des prairies et plus occasionnellement des cultures (lavandes, blé, ...) : voir Figure 65.

On retrouve toutefois des habitats naturels que sont **les prairies humides, les roselières, les cariçaies, ...** qui abritent également des espèces patrimoniales comme le Grand Capricorne (*Cerambyx cerdo*) et l'Agrion de Mercure (*Coenagrion mercuriale*).

Ce sont dans ces plaines alluviales que les adous de la vallée prennent leur source.

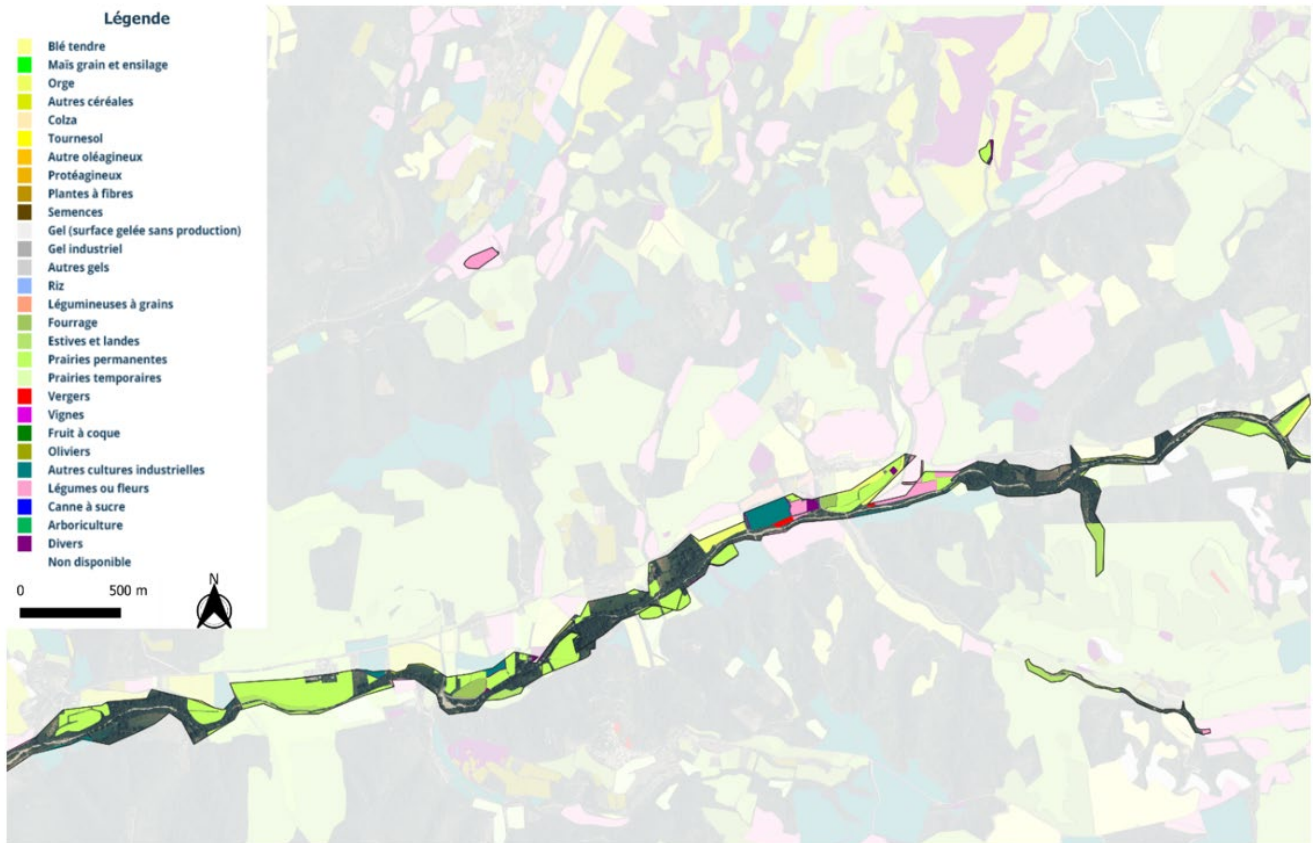


Figure 65 : Données du Régistre Parcellaire Graphique 2023 sur l'emprise de la zone humide du Rancure entre la confluence avec le Puimichel et celle du ravin de la Rougeiroux

Les autres types de zones humides

Bien que les bordures de cours d'eau et les plaines alluviales représentent la majorité de la surface humide du bassin du Rancure, on trouve également quelques zones humides de bas-fond en tête de bassin versant et des zones humides artificielles.

Ces zones humides périphériques à la ripisylve et aux plaines alluviales du Rancure permettent de créer des zones refuges et d'élargir le maillage humide.

La quasi-totalité de ces zones humides sont occupées tout ou partie par un **habitat de roselière de type phragmitaie ou typhaie**. Les roselières étant reconnues pour leur pouvoir filtrant, ces zones humides jouent un rôle dans l'épuration des eaux.

Une source avec **formations de tufs** a été identifiée au sein d'une zone humide de bas-fonds. Cette formation est remarquable à l'échelle du bassin. La présence de tuf revêt une certaine importance écologique car il supporte une biodiversité particulière qui pourrait être assez rare à l'échelle du bassin (mousses, fougères, microorganismes...).

2.6.4.3 Etat des zones humides et plan de gestion

Constat général

Les 13 zones humides ajoutées par l'inventaire de 2023 sont majoritairement **des zones humides de faibles surfaces**. En effet, ces 13 zones humides présentent une surface inférieure à 3 hectares et 9 d'entre elles recouvrent moins d'un hectare. Néanmoins leur importance n'est pas à négliger, bien au contraire.

Pour aller dans ce sens, on peut citer une monographie sur l'Agrion de Mercure, espèce patrimoniale du Rancure, rédigée par Michel Papazian, entomologiste et Président de l'Office Pour les Insectes et leur Environnement Provence-Alpes-du-Sud :

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

« Les milieux fréquentés par *C. mercuriale* sont particulièrement sensibles. Son habitat spécifique, souvent négligé car paraissant insignifiant, est souvent victime d'actes destructeurs tels que les curages, les assèchements, les comblements immodérés, le piétinement du bétail. »

(Papazian M., 2017. – Coenagrion *mercuriale*, in Papazian M., Viricel G., Blanchon Y. & Kabouche B., 2017. - Les libellules de Provence-Alpes-Côtes d'Azur. Biotope, Mèze : 70-73.)

Malgré leur faible superficie, ces zones humides remplissent de nombreuses fonctions comme dans l'exemple ci-dessus le support d'habitat. **L'atteinte ou la destruction des zones humides a donc des répercussions à l'échelle de l'écosystème.**

Diagnostic

Les zones humides sont caractérisées par leurs **fonctions hydrologiques, biologiques et biogéochimiques**. Dans le cadre des inventaires de zones humides, ces fonctions sont appréciées et déterminent l'état de la zone humide. Une fonction globale a été qualifiée pour retranscrire l'état général des trois grandes fonctions : voir Tableau 22.

CODE ZH	CONSTATIONS SUR LE TERRAIN	PRESSIONS	MENACES	FONCTION HYDROLOGIQUE	FONCTION BIOGEOCHIMIQUE	FONCTION BIOLOGIQUE	FONCTION GLOBALE	OBJECTIF DE GESTION
R05	Zone de friche.			ND	ND	ND	ND	Conservation
R06	Cultures de lavande/lavandin en contre-haut.		Intensification de l'agriculture	ND	ND	ND	ND	Conservation
R12	Cultures de lavande/lavandin à proximité.		Intensification de l'agriculture	ND	ND	ND	ND	Conservation
R13	Cultures de lavande/lavandin à proximité.		Intensification de l'agriculture	ND	ND	ND	ND	Conservation
R21	Zone encadrée par un périmètre grillagé.			ND	ND	ND	ND	Conservation
R26	Présence d' <i>Aquilegia vulgaris</i> à proximité.		Arrivée d'Espèces Exotiques Envahissantes	ND	ND	ND	ND	Conservation
R27	Grandes cultures à proximité.		Intensification de l'agriculture	ND	ND	ND	ND	Conservation
R04	Une partie de la zone humide en culture (sauge). Un des propriétaires envisage une culture de blé à l'avenir. <i>Ailanthus altissima</i> à proximité immédiate.	Intensification de l'agriculture	Arrivée d'Espèces Exotiques Envahissantes + Intensification de l'agriculture	PD	PD	PD	PD	Préservation
R15	Zone située au cœur d'un champ cultivé drainé	Intensification de l'agriculture		TD	PD	PD	PD	Préservation
R19	Présence de deux drains situés à moins de 10m l'un de l'autre. Zones de sol nu.	Intensification de l'agriculture		TD	PD	PD	PD	Préservation
R25	Remblai, zones de sol nu au milieu d'espèces rudérales. Zone entourée par des habitations	Développement de l'urbanisation et infrastructures + Intensification de l'agriculture	Développement de l'urbanisation et infrastructures	PD	PD	PD	PD	Préservation
R24	Présence d'un ancien drain.	Intensification de l'agriculture	Intensification de l'agriculture	PD	ND	ND	PD	Préservation
R20	Zone en culture intensive de blé	Intensification de l'agriculture		TD	TD	TD	TD	Restauration
R00 (Zone humide identifiée par le CEN)	⌘	Développement de l'urbanisation et infrastructures + Intensification de l'agriculture + Prélèvement en eau + Aménagement des cours d'eau	⌘	PD	PD	PD	PD	Préservation

Tableau 22 Qualification des fonctions (ND : Non Dégradée – PD : Partiellement Dégradée – TD : Totalelement Dégradée) sur les 14 zones humides du bassin versant

Le facteur de pression le plus récurrent est **l'intensification de l'agriculture** et s'explique par le contexte agricole omniprésent sur le bassin (Figure 66). On distingue les pressions des menaces par leur caractère effectif : les pressions sont constatées là où les menaces pourraient éventuellement survenir.

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

Lien avec le présent Schéma directeur de gestion globale du Rancure et ses affluents (plan de gestion de l'espace alluvial) :

Les pressions et menaces identifiées sont liées à des actions anthropiques, et notamment l'occupation des lits majeurs du bassin versant. Pour les zones humides directement en lien avec les cours d'eau, il y a donc un **enjeu de préservation de l'espace**.

Du point de vue du fonctionnement sédimentaire des cours d'eau, on pourra également évoquer la potentielle menace que représente l'incision des lits, qui déconnecterait à terme la ripisylve de la nappe alluviale.

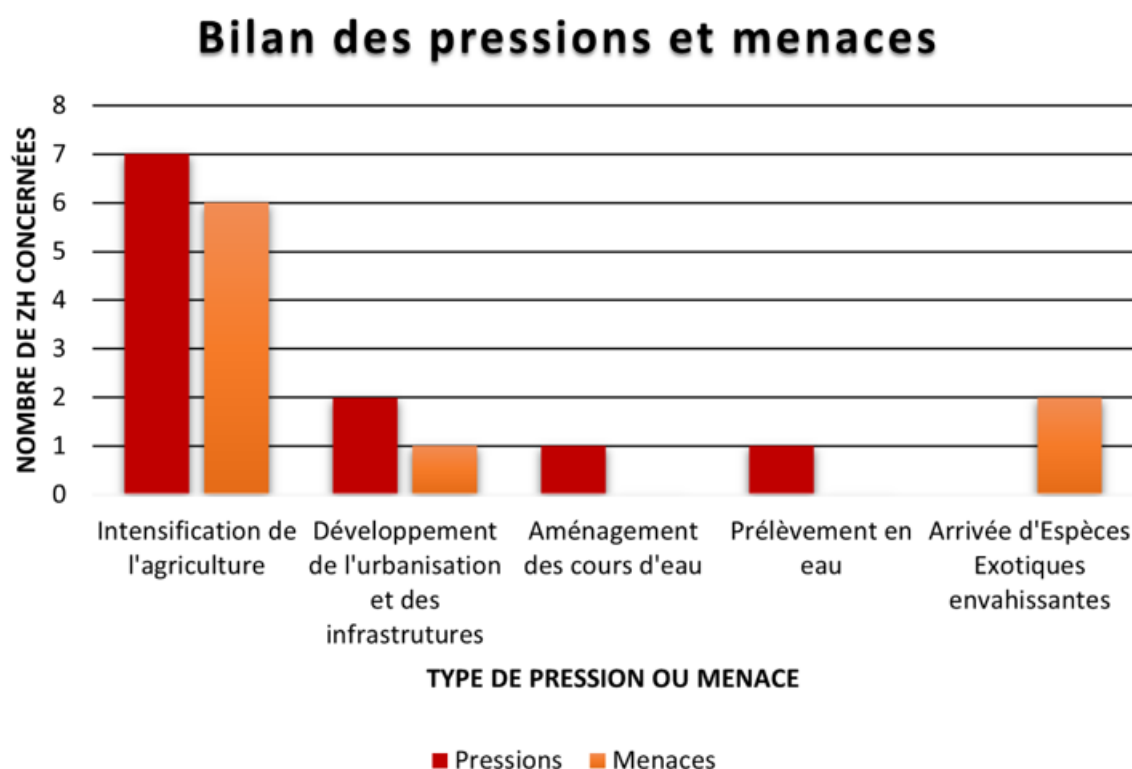


Figure 66 : Bilan des pressions et menaces identifiées sur les zones humides du bassin versant de la Rancure

Constat général

Un plan d'actions sommaire a été établi par le Syndicat Mixte Asse Bléone. Celui-ci prévoit des actions transversales et des actions plus localisées selon les enjeux et pressions identifiées : voir Tableau 23.

Actions transversales	Actions localisées
Intégration des résultats d'inventaire à l'atlas du présent Schéma Directeur (en cours)	Concertation avec les agriculteurs
Recensement des <u>adous</u> (réalisé en 2025)	Sensibilisation-communication
Sectorisation de la zone humide du <u>Rancure</u>	Surveillance et lutte contre les Espèces Exotiques Envahissantes
Suivi des effets du changement climatique	Intégration dans les documents de planification et d'urbanisme
Animation de la stratégie de gestion	Suivis et amélioration de la connaissance

Tableau 23 Synthèse du plan d'actions établi par le Syndicat Mixte Asse-Bléone

3 FONCTIONNEMENT HYDROMORPHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

L'objectif de cette partie est d'analyser le passé récent du Rancure afin d'évaluer les transformations hydromorphologiques et leur impact sur son fonctionnement actuel. Cette compréhension permet de mieux anticiper les stratégies de gestion adaptées aux dynamiques naturelles du bassin versant.

Cette démarche repose sur le concept de trajectoire géomorphologique, qui permet d'examiner les évolutions du cours d'eau à différentes échelles temporelles et spatiales. Ainsi, le diagnostic hydromorphologique, première étape clé pour l'élaboration d'un plan de gestion, s'appuie sur l'analyse des différentes composantes de cette trajectoire géomorphologique afin de caractériser les processus en cours et d'orienter les actions de gestion et d'aménagement du Rancure et de ses affluents.

3.1 Séquençage spatial et temporel

3.1.1 Fonctionnement conceptuel du Rancure

Avant de sectoriser le réseau hydrographique principal du Rancure, il est intéressant de décrire de manière conceptuelle son fonctionnement d'un point de vue hydrosédimentaire. La Figure 67 donne une représentation schématique de ce fonctionnement.

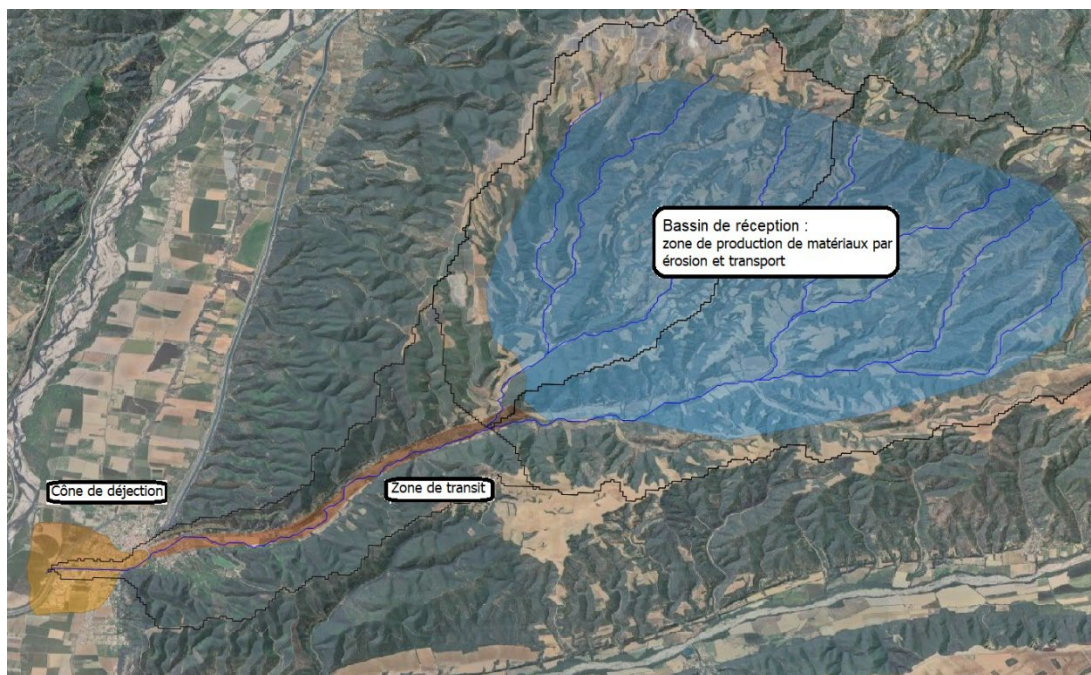


Figure 67 Schéma conceptuel du fonctionnement hydro-sédimentaire du Rancure

Le bassin versant du Rancure se décompose ainsi en trois zones :

- **Bassin de réception** : zone d'alimentation solide qui produit l'essentiel des ruissellements et surtout la majeure partie de l'érosion des versants. Les ravins nombreux sont au contact direct des versants escarpés, fournisseurs de matériaux.
- **Zone de transit ou de transfert** : le réseau hydrographique du bassin de réception converge vers une partie encaissée, où transitent des écoulements déjà formés. Cette zone déconnecte le transport sédimentaire entre la rivière et ses versants. Dans cette zone, la fourniture sédimentaire a pour origine principale le lit et les berges de la rivière, ainsi que les ravins affluents.
- **Cône de déjection** : à l'arrivée dans la vallée, le Rancure se déleste d'une part significative de sa charge en sédiments, à la faveur de la réduction de la pente mais aussi de l'élargissement de l'espace disponible pour ses divagations.

La limite entre le bassin de réception et la zone de transit est matérialisée au niveau de la confluence avec le Puimichel (affluent majeur du Rancure). Néanmoins il convient de noter qu'en amont de cette confluence, le Rancure présente déjà une inflexion de sa pente moyenne ainsi qu'un faciès en tresses plus ou moins marqué. C'est également le cas pour le Puimichel en amont de sa confluence avec le Rancure.

3.1.2 Sectorisation du cours d'eau (séquençage spatial)

La sectorisation géomorphologique des cours d'eau a pour objet de distinguer, au sein d'un cours d'eau entier, des entités spatiales emboîtées présentant un fonctionnement naturel homogène. Ces entités sont utilisées comme unités de gestion, particulièrement pour les travaux de restauration.

La sectorisation géomorphologique repose sur le principe de ces entités emboîtées : voir Figure 68.

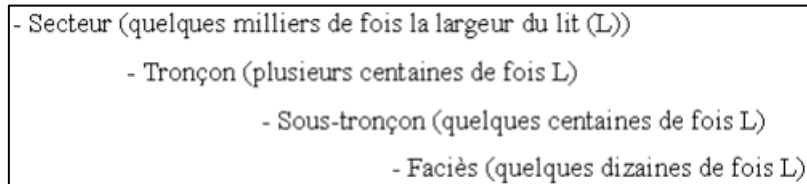


Figure 68 Sectorisation géomorphologique : entités emboîtées [31]

Le tronçon géomorphologiquement homogène est l'entité de référence fondamentale pour toute démarche d'analyse et de gestion des cours d'eau. Un tronçon homogène doit, en théorie, présenter des caractéristiques géomorphologiques homogènes : géométrie du lit, pente, sinuosité, etc. Si un tronçon homogène présente des portions de son linéaire manifestement différentes les unes des autres, une ou plusieurs altérations hydromorphologiques peuvent être suspectées. L'analyse hydromorphologique du Rancure sera donc menée à cette échelle de sectorisation.

Le guide du secrétariat technique de bassin Rhône-Méditerranée de juin 2024 sur l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan de gestion sédimentaire ([32]) recommande de se baser en première approche sur la sectorisation en tronçons géomorphologiquement homogènes (TGH) établie dans le cadre du système SYRAH-CE ([33]) remplacé depuis 2024 par la plateforme PRHYMO ([34]). Ces tronçons ont été discriminés à partir des caractéristiques hydromorphologiques suivantes :

- **Largeur du fond de vallée alluvial** : extension maximale du lit majeur. Cette variable permet d'appréhender l'espace de liberté du cours d'eau, ainsi que la quantité de sédiments potentiellement mobilisable.
- **Pente et forme du fond de vallée** :
 - la pente du fond de vallée renseigne sur l'énergie du cours d'eau et notamment sur sa capacité de mobilisation et de transport des sédiments.
 - La géométrie du fond de vallée permet d'appréhender le degré de contrainte de la dynamique latérale du cours d'eau, ainsi que les processus érosifs de versants, intéressants en termes de recharge sédimentaire.
- **Hydrologie** : taille du cours d'eau en termes de débit liquide. La variable retenue est l'ordination de Strahler (1957).
- **Nature du substratum géologique** : variable utilisée principalement quand le fond de vallée n'est pas alluvial.

3.1.2.1 Sectorisation du Rancure

La sectorisation du Rancure et de ses affluents en tronçons géomorphologiquement homogènes (TGH) établie pour PRHYMO (ex SYRAH-CE) est présentée à la Figure 69. Pour le Rancure, quatre tronçons sont définis de l'amont vers l'aval à partir de la confluence du ravin du Rousseiroux, du ravin de la Roumeguière et la fin de la sinuosité du cours d'eau au niveau d'Oraison (en amont de la traversée du canal EDF).

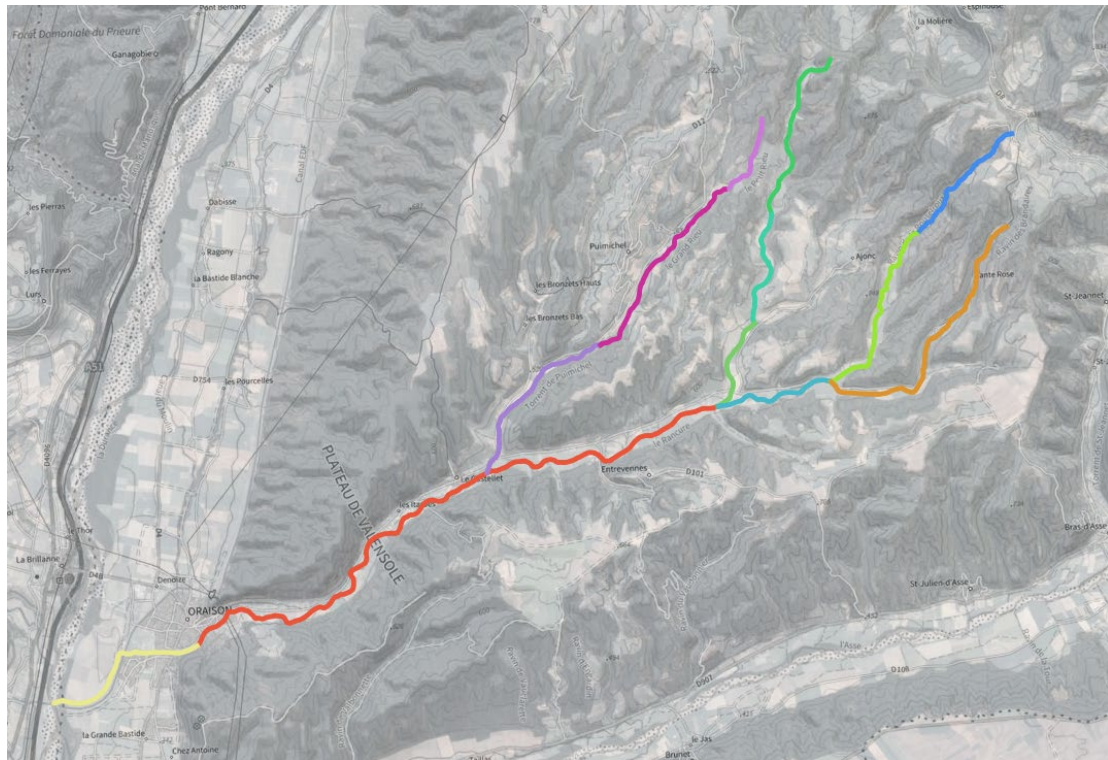


Figure 69 Sectorisation du Rancure et de ses affluents selon le référentiel PRHYMO (ex SYRAH-CE) [34]

Cette sectorisation PRHYMO est reportée sur le profil en long du Rancure afin d'évaluer les gammes de pentes de chaque tronçon considéré : voir Figure 70. Les deux premiers tronçons sont cohérents au regard de l'évolution de la pente. Le tronçon n° 63436 est très long en intégrant les évolutions de pente en amont du seuil de la route d'Entrevennes ainsi que la confluence du Puisichel (principal affluent du Rancure).

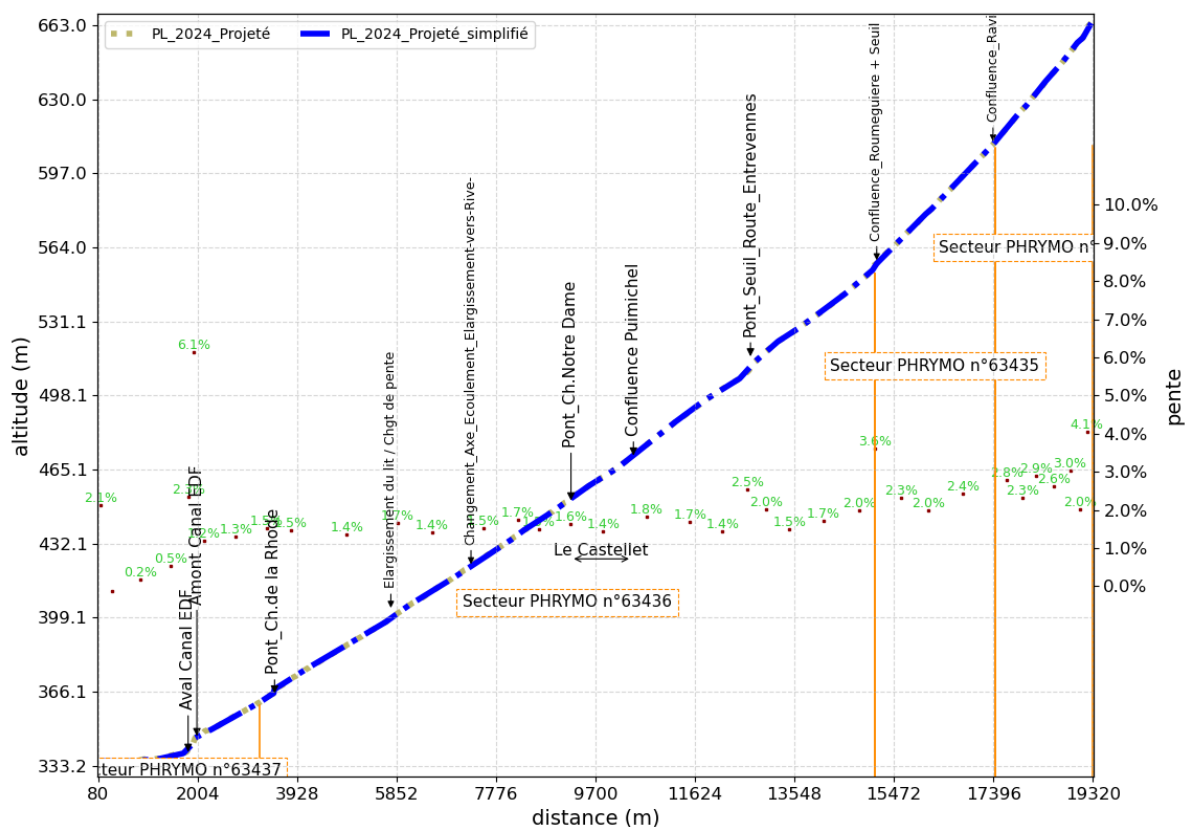


Figure 70 Profil en long 2024 du Rancure avec la sectorisation PHRYMO

Un séquençage spatial plus détaillé est proposé à la Figure 71 et à la Figure 72. Il repose en premier lieu sur l'identification de secteurs intégrant le fonctionnement conceptuel du Rancure, ainsi que les principaux facteurs naturels ou anthropiques influençant l'évolution de la pente le long du cours d'eau. Chaque secteur est ensuite, si nécessaire, subdivisé en tronçons afin de mieux prendre en compte les spécificités locales du cours d'eau, qu'il s'agisse de dynamiques hydromorphologiques, d'interventions humaines ou de processus d'évolution naturelle :

- Secteur n°1 : « Rancure Amont » avec des pentes supérieures à 2% :
 - Tronçon n°1-1 : jusqu'à la confluence du ravin du Rousseiroux avec une pente moyenne de 2.8% et des pentes maximales supérieures à 4%.
 - Tronçon n°1-2 : jusqu'à la confluence du ravin du Roumeguière en rive droite, du ravin Saint-Sauveur en rive gauche et du passage à gué_seuil avec une pente moyenne de 2.4%.
- Secteur n°2 : « Rancure Amont confluence Puimichel » avec une pente moyenne de l'ordre de 1.6% :
 - Tronçon n°2-1 : jusqu'au pont/seuil de la route d'Entrevennes et la zone d'érosion active des berges en rive gauche avec une pente moyenne de 1.6% qui s'affaiblit au niveau de la zone de dépôt en amont du seuil.
 - Tronçon n°2-2 : jusqu'à la confluence avec le Puimichel avec une pente moyenne de l'ordre de 1.6%.
- Secteur n°3 : « Rancure Aval confluence Puimichel » avec une sinuosité assez marquée et une pente relativement stable autour de 1.5% :
 - Tronçon n°3-1 : jusqu'au dalot du chemin Notre-Dame/Route de la déchetterie avec la RD12 (et le village du Castellet) en rive droite (pente moyenne de l'ordre de 1.4 %).
 - Tronçon n°3-2 : jusqu'à l'aval de la station d'épuration en rive droite avec une pente moyenne d'environ 1.6 %.
 - Tronçon n°3-3 : jusqu'à l'Ubac de l'Aval avec un élargissement local du lit et une coupure de méandre (pente moyenne autour de 1.5 %)
 - Tronçon n°3-4 : jusqu'à l'entrée d'Oraison (pont Roman) avec une pente moyenne de l'ordre de 1.4%.
- Secteur n°4 : « Rancure entrée Oraison / Pont Roman » jusqu'à la traversée du canal EDF avec une sinuosité qui se réduit et une pente moyenne de 1.3%.
- Secteur n°5 : en aval de la traversée du canal EDF jusqu'à la confluence avec la Durance avec une pente qui s'affaiblit nettement autour de 0.3%.

Les secteurs 1 et 2 peuvent être considérés comme faisant partie de la zone de production sédimentaire, où les processus d'érosion et de transport dominant. Le secteur 2 constitue une zone de transition avec le secteur de transit situé en aval.

Le secteur 3 correspond à la zone de transit de la vallée du Rancure, s'étendant jusqu'à l'entrée d'Oraison et à la zone historique du cône de déjection.

Les secteurs 4 et 5 appartiennent au cône de déjection historique, avec une forte diminution de la pente du cours d'eau après sa traversée du canal EDF.

Cette sectorisation présente l'intérêt d'être cohérente avec le découpage en tronçons homogènes (voir Figure 73) établi dans le cadre de l'état des lieux du Schéma pluriannuel de gestion et de valorisation de la ripisylve des cours d'eau du département des Alpes de Hautes Provence (cf. partie 1.1.2). L'intégration du diagnostic sur la ripisylve du Rancure sera ainsi facilitée.

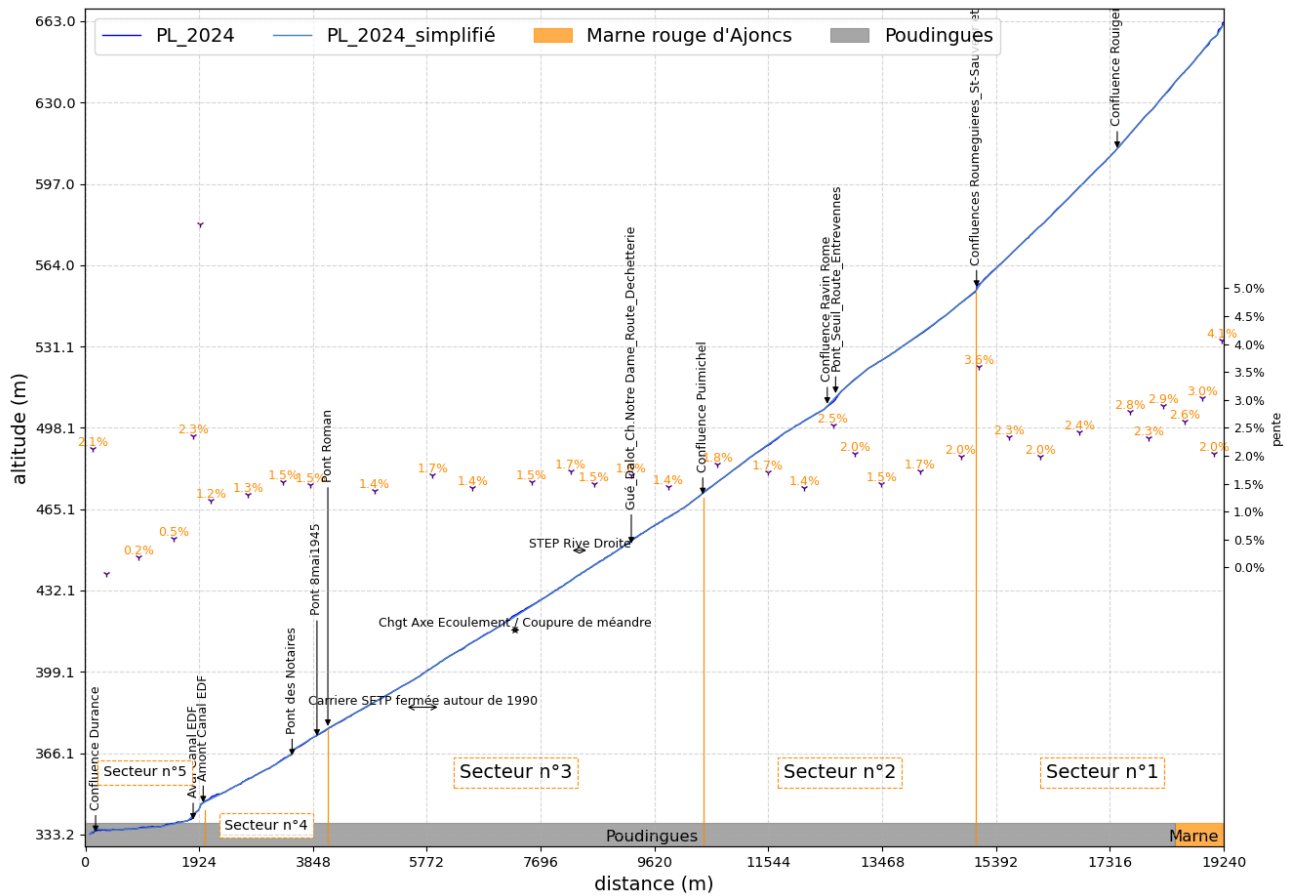


Figure 71 Profil en long 2024 du Rancure avec la sectorisation proposée : secteurs

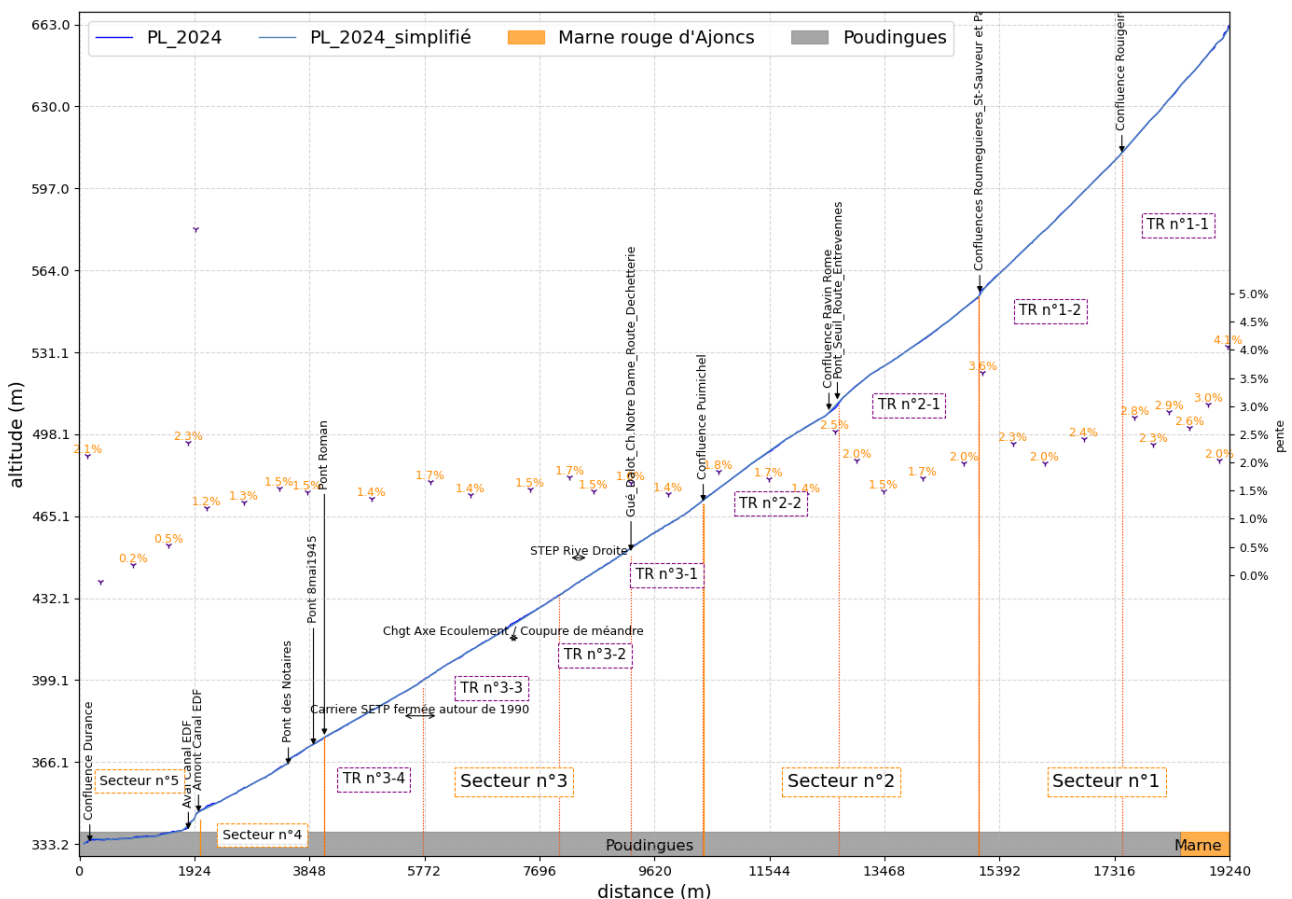


Figure 72 Profil en long 2024 du Rancure avec la sectorisation proposée : tronçons

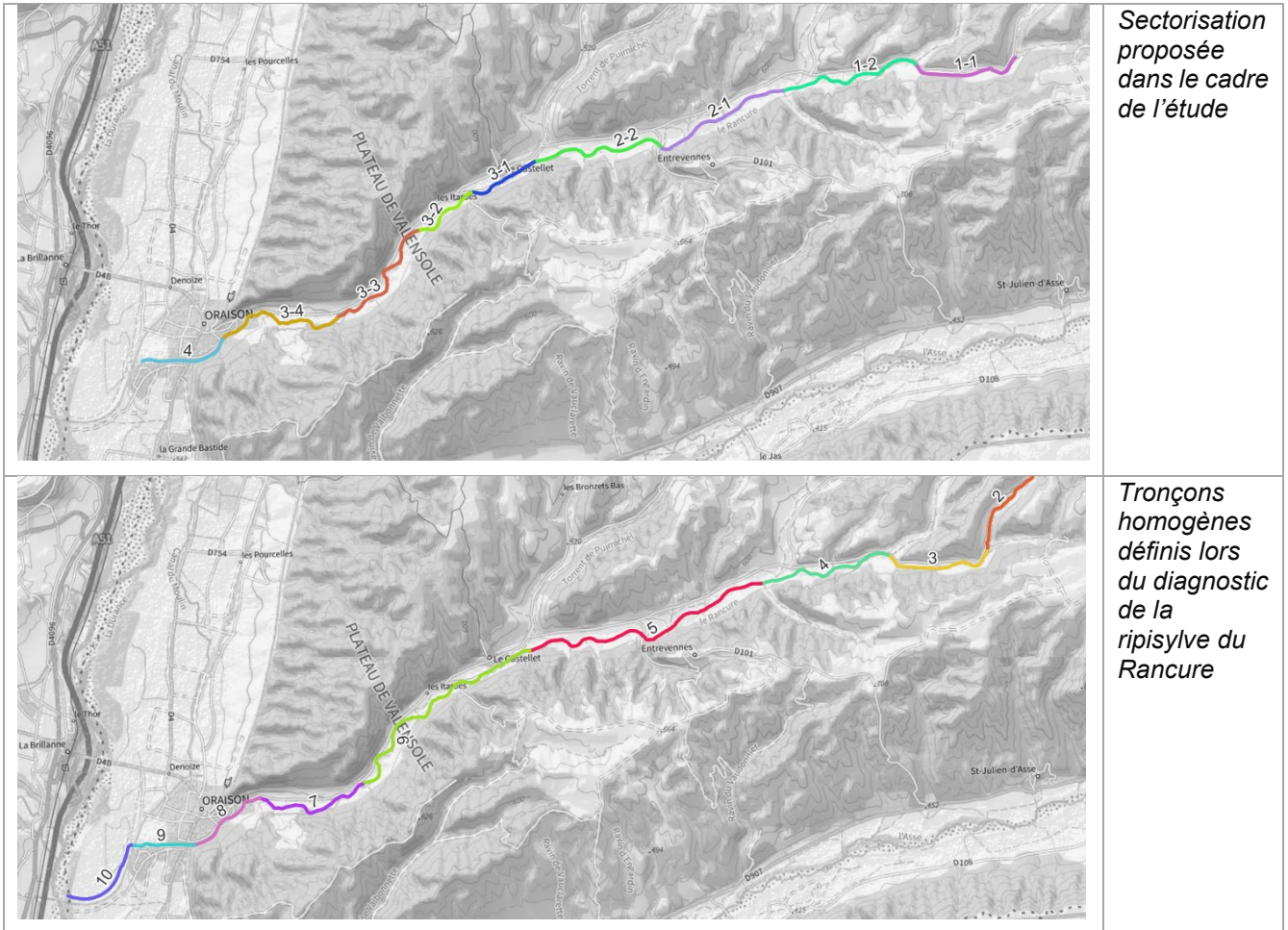


Figure 73 Découpage en tronçons homogènes du Rancure : sectorisation proposée et découpage utilisé dans le cadre du Schéma pluriannuel de gestion et de valorisation de la ripisylve des cours d'eau du département des Alpes de Hautes Provence

Cette structuration en secteurs et tronçons homogènes permet de spatialiser les dynamiques longitudinales du Rancure et d'interpréter les variations de pente en lien avec le contexte géomorphologique et les interventions humaines. Afin d'objectiver cette lecture, une analyse statistique des pentes issues du profil en long « fonds moyens » du Lidar HD 2021 (voir paragraphe 3.2.4.2 pour les détails de construction du profil) a été réalisée pour chaque tronçon défini : voir Figure 74. Elle met en évidence une organisation longitudinale cohérente avec le séquençage proposé : les tronçons amont (secteurs 1 et 2) présentent des pentes plus élevées et plus variables, en lien avec une dynamique sédimentaire plus marquée, tandis que les tronçons aval, en particulier ceux du secteur 3, montrent des pentes plus faibles et plus homogènes, caractéristiques d'une zone de transit. Cette lecture statistique vient ainsi appuyer la segmentation conceptuelle du linéaire, en mettant en lumière les transitions progressives de régime morphodynamique le long du cours d'eau.

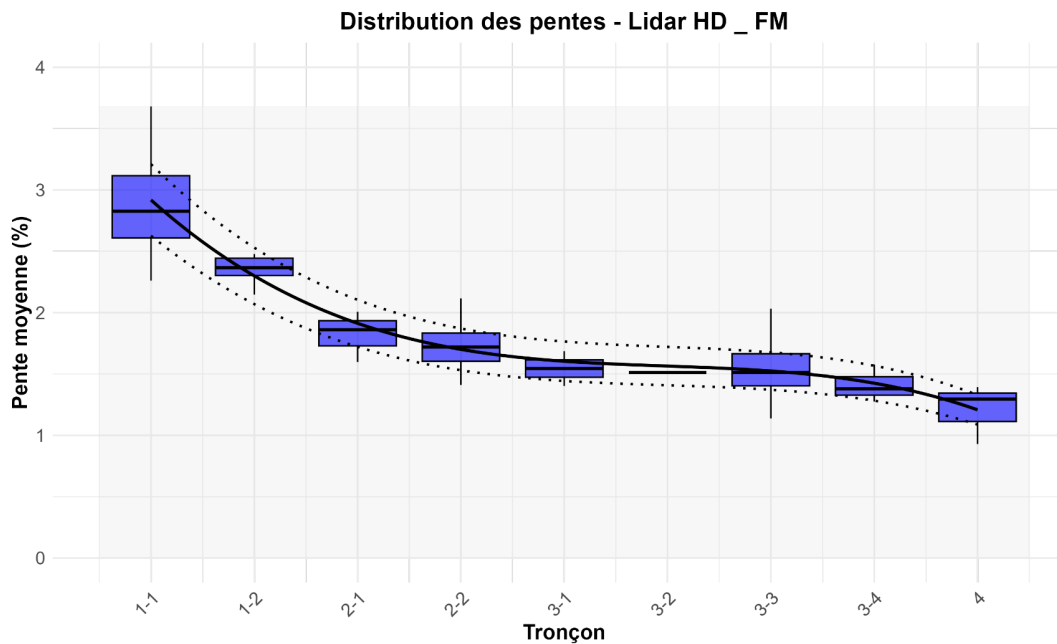


Figure 74 Distribution des pentes par tronçon homogène – Profil en long Lidar HD (fonds moyens)

3.1.2.2 Sectorisation du Puimichel

Un séquençage spatial détaillé du Puimichel est proposé à la Figure 75 et à la Figure 76. Cette sectorisation repose sur l'identification de secteurs cohérents intégrant le fonctionnement hydrogéomorphologique du cours d'eau, en lien avec la lithologie dominante, les principales confluences, les passages à gué et les aménagements anthropiques. Lorsque nécessaire, les secteurs sont subdivisés en tronçons afin de prendre en compte les spécificités locales.

- Secteur n°1 : « Tête du Puimichel » – Marne rouge d'Ajonc :

Le secteur amont du Puimichel traverse les formations de marne rouge d'Ajonc. Le lit est relativement encaissé dans les marnes avec un substrat fin.

- Secteur n°2 : « Transition amont » – Marnes interstratifiées de galets (pente moyenne ≈ 2 %) :

Ce secteur marque une transition lithologique avec l'apparition de marnes interstratifiées de galets, conférant une résistance légèrement supérieure à l'incision. Le substrat mixte favorise l'alternance entre dépôts fins et mobilisation ponctuelle de galets.

- Secteur n°3 : « Zone de confluence avec le Ravin Maucues » – Poudingues (pentes moyennes entre 2,4 % et 3,3 %) :

- Tronçon n°3-1 (pente $\approx 2,4$ %) : tronçon d'équilibre local où le profil longitudinal s'adapte à la structure lithologique dominante.
- Tronçon n°3-2 (pente $\approx 3,3$ %) : tronçon marqué par une accentuation de la pente liée à un changement d'axe d'écoulement par rapport au lit ancien des années 1950.
- Tronçon n°3-3 (pente $\approx 2,6$ %) : tronçon situé à l'aval direct de la confluence du ravin des Maucues avec un enrichissement en matériaux grossiers.

- Secteur n°4 : « Zone Intermédiaire jusqu'au pont de la RD101 » – Poudingues (pente moyenne $\approx 2,1$ %) :

Dans ce secteur, la pente se stabilise autour de 2,1 %. La dynamique hydrosédimentaire y est plus régulée, mais certaines confluences influencent localement les dépôts notamment le ravin de la Lague en rive droite.

- Secteur n°5 : « Puimichel aval – confluence avec le Rancure » :

Le secteur aval correspond à la jonction du Puimichel avec la Rancure, marqué par une pente moyenne inférieure à 2%. L'évolution morphologique est fortement influencée par des aménagements anthropiques, en particulier le gué et pont de la RD101, structurant le profil en long.

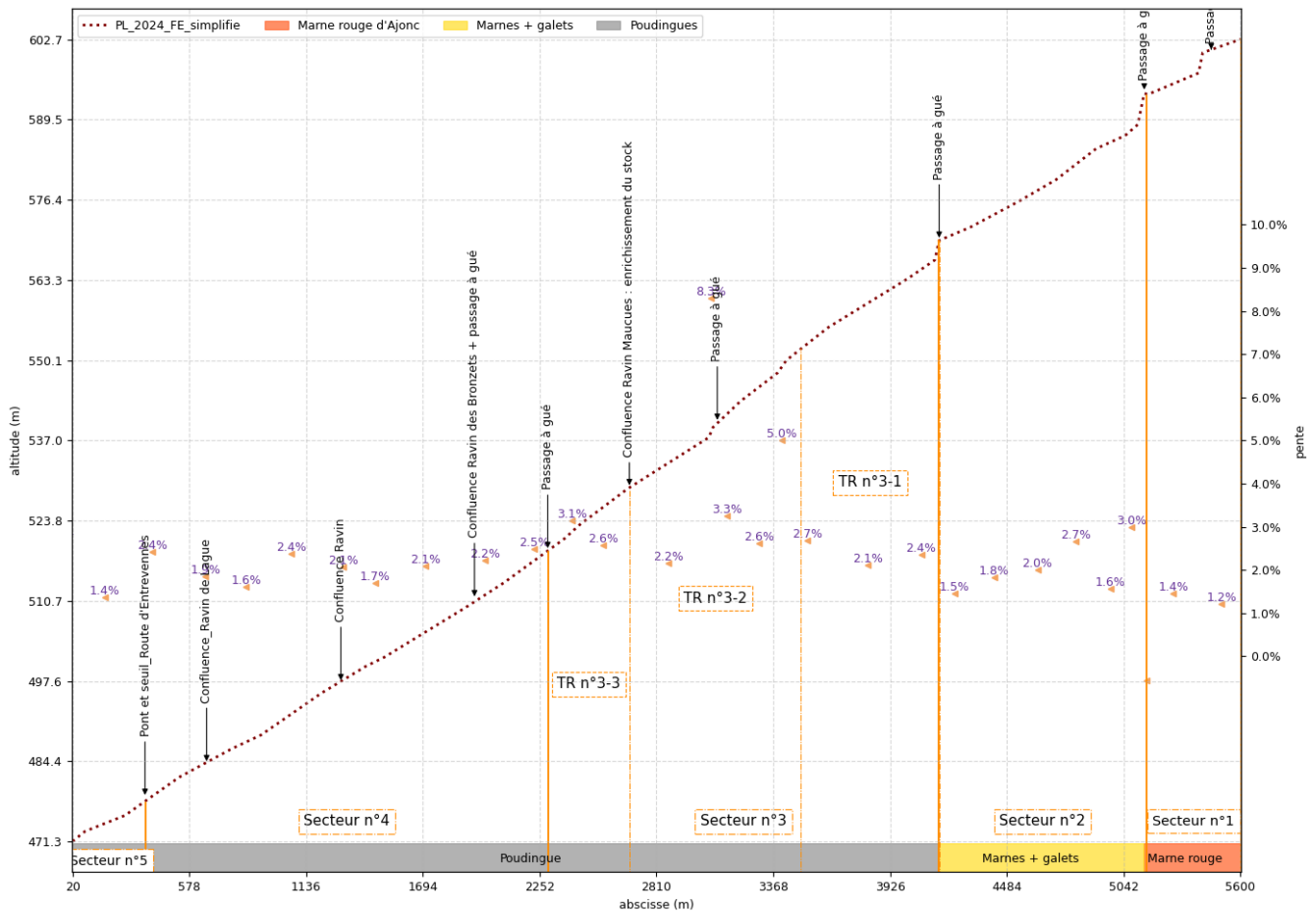


Figure 75 Profil en long 2024 du Puimichel avec la sectorisation proposée : tronçons

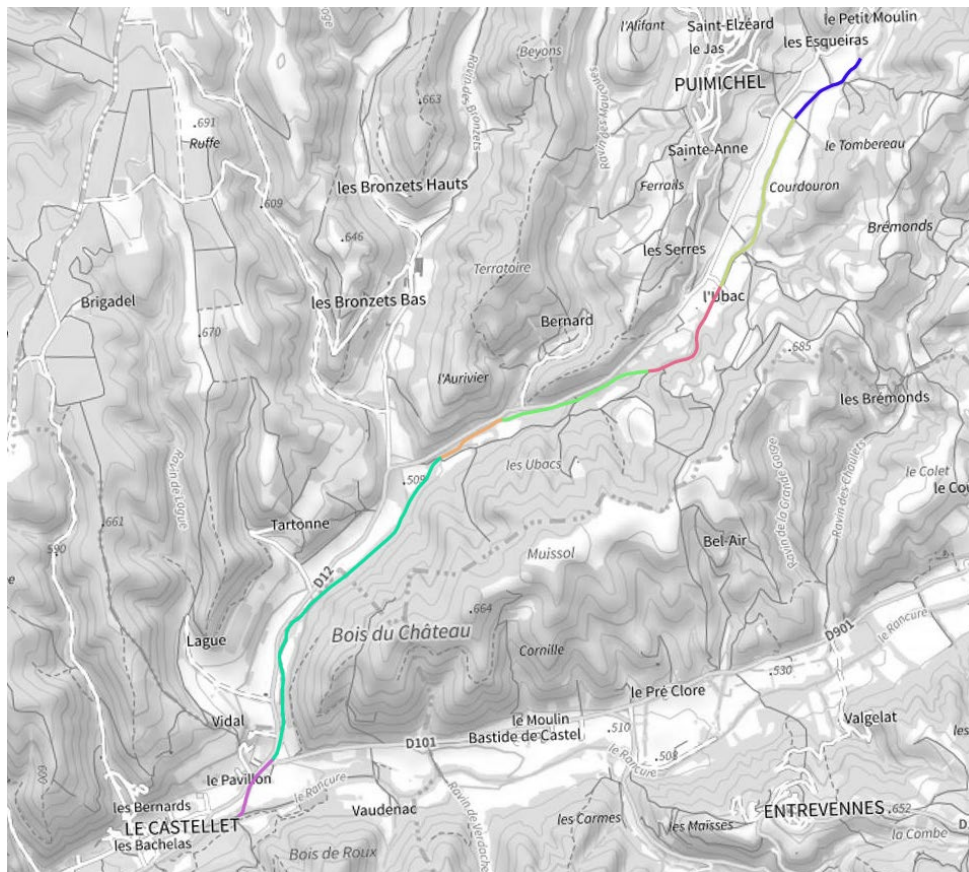


Figure 76 Découpage en tronçons homogènes du Puimichel : sectorisation proposée

3.1.3 Séquençage temporel

Le diagnostic du fonctionnement hydromorphologique du Rancure passe par trois analyses successives [32] :

- **Analyse trajectorielle historique** (évolution historique du cours d'eau) :
 - Objectif : comprendre les transformations du cours d'eau au fil du temps en étudiant ses changements morphologiques, hydrauliques et sédimentaires.
 - Méthodologie :
 - Identification des forçages historiques :
 - Évolution de l'occupation des sols
 - Évolution du climat.
 - Activités anthropiques : endiguement, extractions de matériaux, modifications des affluents, barrages et autres aménagements hydrauliques.
 - Étude diachronique :
 - Compilation de données anciennes : données topographiques, orthophotos.
 - Analyse des modifications du tracé du lit mineur et de la bande active.
 - Évaluation de l'incision et des dépôts sédimentaires passés : comparaison des profils en long et en travers à différentes périodes
- **Analyse fonctionnelle actuelle** (comment fonctionne-t-il aujourd'hui) :
 - Objectif : caractériser le fonctionnement hydromorphologique actuel du Rancure pour évaluer son état de stabilité et ses capacités de transport solide et hydrique.
 - Méthodologie :
 - Évaluation de la source/recharge sédimentaire
 - Évaluation du transport solide
 - Problématique des flottants et des formations d'embâcles
- **Analyse trajectorielle prospective** (comment fonctionnera-t-il dans le futur si on ne fait rien ou si on agit) :
 - Objectif : évaluer l'évolution future du Rancure selon différents scénarios (avec ou sans intervention) pour anticiper les impacts et orienter la gestion.
 - Méthodologie :
 - Projection naturelle (scénario "laisser-faire") : extrapolation des tendances historiques et actuelles.
 - Scénarios d'aménagements :
 - Impact potentiel des actions de restauration hydromorphologique (reméandrage, recharge sédimentaire, diversification des écoulements).
 - Effet du maintien des infrastructures existantes ou de nouvelles interventions humaines.
 - Outils de suivi :
 - Définition d'indicateurs de suivi (largeur de bande active, érosion des berges, évolution des profils en long).
 - Cartographie des secteurs à enjeu.

3.2 Analyse trajectorielle historique

3.2.1 Évolution de l'occupation des sols du bassin versant

Certaines zones du bassin versant du Rancure, autrefois dédiées à l'élevage et aux cultures, subissent aujourd'hui un déclin des activités agricoles traditionnelles, favorisant l'extension des friches et l'embroussaillage. Les anciens parcours à moutons, qui structuraient autrefois le paysage rural, cèdent progressivement la place à une recolonisation végétale spontanée, modifiant ainsi l'aspect du territoire. Si l'évolution récente est visible sur une période de 28 ans (Figure 21), une perspective plus large peut être obtenue en comparant les surfaces boisées actuelles avec celles du XIXe siècle à l'aide du champ « Forêt » numérisé de la Carte d'État-Major® IGN (Figure 77). Toutefois, cette comparaison doit être interprétée avec précaution en raison des incertitudes liées aux méthodes de cartographie anciennes, notamment la précision des levés et la classification des forêts. De plus, la carte d'État-Major ne permet pas toujours de distinguer les différents types de végétation (ripisylve, forêts d'altitude, etc.), ce qui peut conduire à des sous-cartographies ou à des interprétations variables en fonction des techniques utilisées à l'époque.

Un autre témoignage concret de cette dynamique de revégétalisation peut être observé au niveau du village du Castellet, situé à la confluence entre le Puimichel et le Rancure. La comparaison d'une photographie ancienne datant de 1952 (Figure 78) avec une prise de vue actuelle (Figure 78) met en évidence la transformation des versants environnants : alors que les collines apparaissaient largement ouvertes et utilisées pour des activités agricoles et pastorales au milieu du XXe siècle, elles sont aujourd'hui couvertes d'un manteau forestier continu. Cette évolution illustre à une échelle locale le processus général de fermeture des paysages ruraux, lié à l'abandon progressif des pratiques traditionnelles et au retour de la végétation naturelle.

D'un point de vue hydromorphologique, cette évolution à la hausse de la surface boisée sur le bassin versant du Rancure pourrait entraîner une réduction des apports sédimentaires en limitant les pluies nettes, l'érosion des versants, tout en favorisant une stabilisation des berges et un rétrécissement de la bande active, modifiant ainsi les dynamiques d'écoulement et de transport solide du cours d'eau.

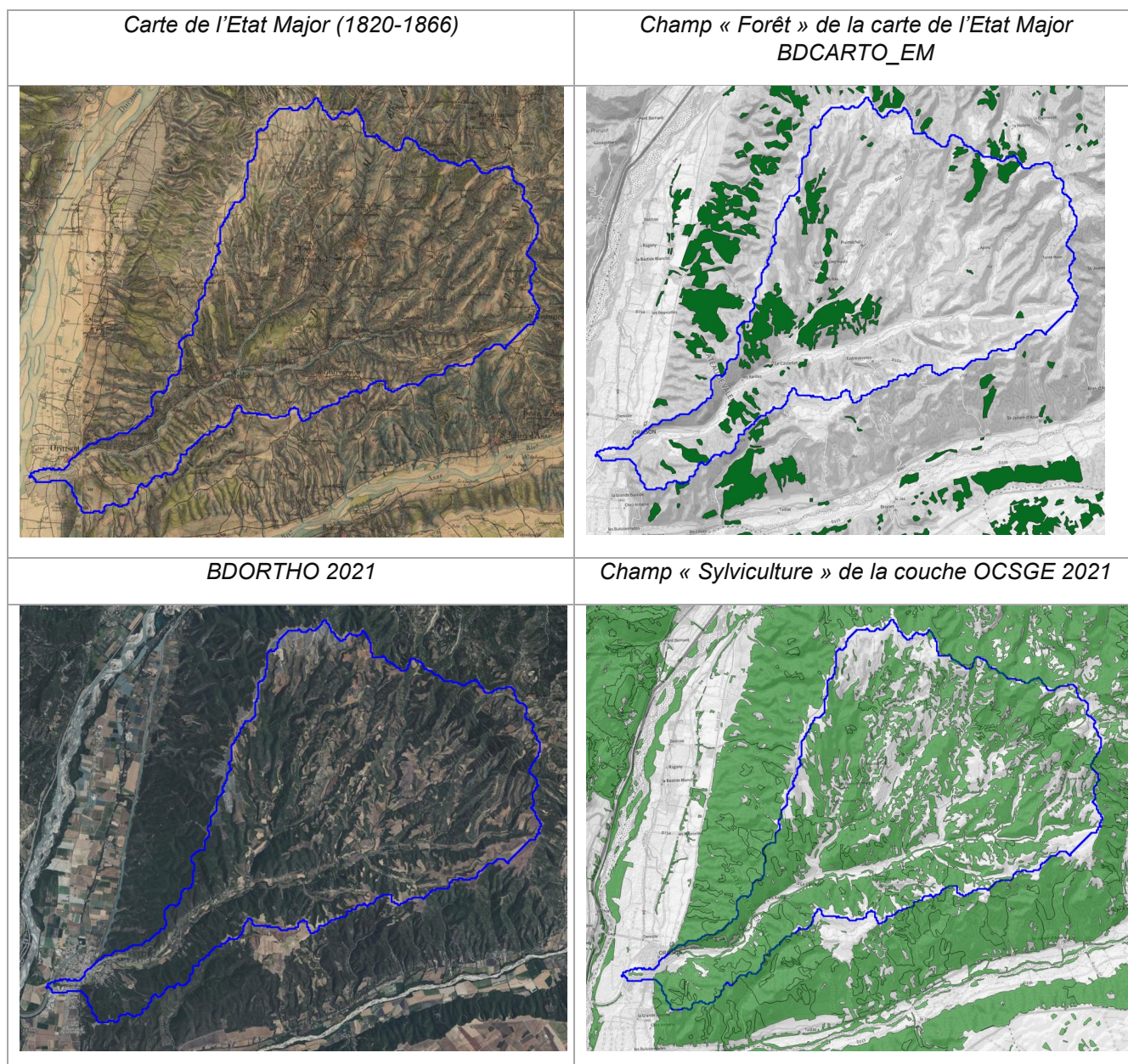


Figure 77 Évolution de l'attribut « Forêt » entre la couche d'occupation des sols 2021 (OCSGE IGN) et la carte EM numérisée (1820-1866)

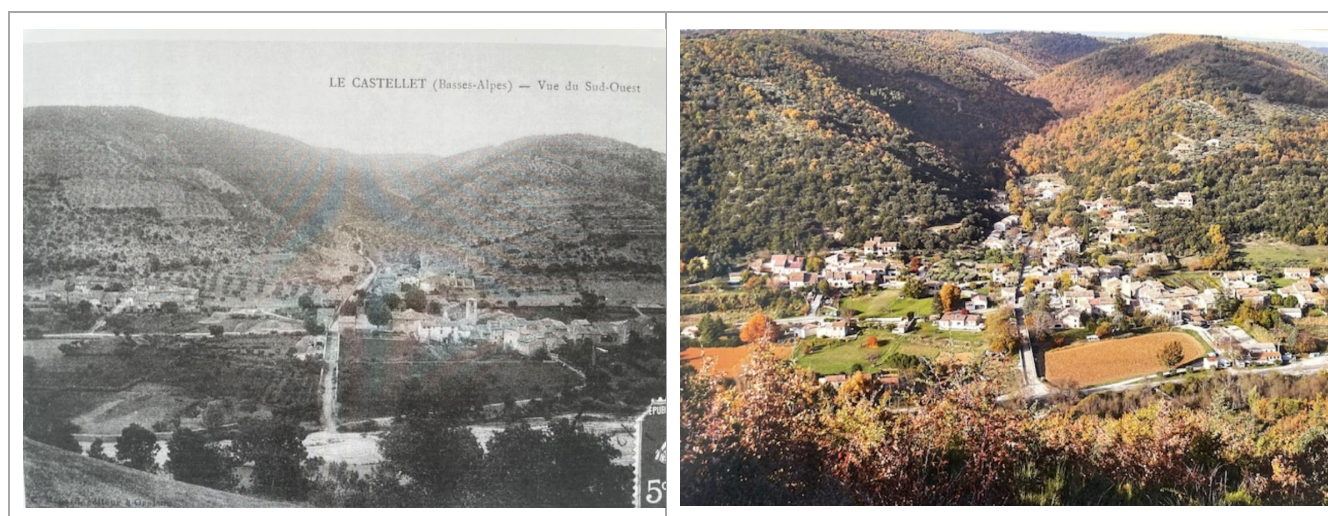


Figure 78 Évolution du paysage au niveau du village du Castellet : à gauche, vue depuis le sud-ouest en 1952 ; à droite, situation actuelle.

3.2.2 Évolution du forçage climatique

Les modifications climatiques, lorsqu'elles s'opèrent à l'échelle globale, entraînent des transformations profondes des milieux naturels. Le bassin du Rancure n'échappe pas à ces dynamiques, étant influencé par la transition post-Petit Âge Glaciaire (PAG) et le réchauffement climatique actuel.

La période du Petit Âge Glaciaire (1350-1850) se caractérisait par un climat instable marqué par des fluctuations de température et des épisodes répétés de crues de haute magnitude, alternant avec des phases d'accalmie relativement courtes. Ce régime hydrologique particulier s'explique par plusieurs facteurs :

- Une fonte généralisée des glaciers alpins dès 1800, alimentant un réseau hydrographique très actif.
- Une fonte progressive du pergélisol, libérant des volumes considérables de matériaux dans les bassins versants.
- Une forte variabilité des températures estivales.
- Une fréquence élevée des crues morphogènes, qui ont façonné les cours d'eau par des apports sédimentaires continus et abondants.

Durant cette période, les crues à haute magnitude étaient des événements majeurs qui jouaient un rôle central dans la morphogenèse des cours d'eau. Ces crues favorisaient une forte érosion des versants, une recharge quasi-permanente en sédiments grossiers et un transport solide intense, alimentant ainsi les bandes actives et limitant l'encaissement des lits fluviaux.

L'impact du climat du PAG sur l'évolution des rivières était double :

- Hivers rigoureux et neige prolongée : la végétation de montagne était limitée, laissant les sols plus vulnérables à l'érosion.
- Étés plus humides et pluvieux : une augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations favorisait l'instabilité des versants, augmentant l'apport en sédiments vers les rivières.

Ces conditions ont conduit à un renforcement du transport sédimentaire grossier, maintenant des cours d'eau largement alimentés en matériaux et limitant l'érosion verticale.

Avec la fin du PAG vers 1850, les conditions climatiques ont progressivement évolué vers un climat plus stable, caractérisé par une diminution de la fréquence des crues morphogènes et une réduction des apports sédimentaires.

À partir du XXe siècle, les effets des actions anthropiques – reboisement, correction torrentielle et endiguements – ont accentué cette tendance, entraînant une incision marquée des lits fluviaux et une diminution du tressage. **Ce processus est caractéristique des bassins de moyenne altitude, où la dynamique fluviale est aujourd'hui moins influencée par les crues morphogènes et davantage contrainte par les aménagements humains ([35], [36]).**

3.2.3 Forçage anthropique

3.2.3.1 Bref historique des actions anthropiques sur le bassin versant du Rancure

L'analyse diachronique des aménagements et interventions humaines sur le bassin versant du Rancure met en évidence, depuis un siècle, plusieurs périodes clés de modification du cours d'eau et de son environnement.

1. Premières Transformations (1930-1960)

- Développement agricole : l'occupation des sols montre une exploitation importante des terres alluviales, entraînant une première phase de stabilisation des berges.

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

- Début de la fixation des boisements alluviaux : la diminution de la fréquence des crues morphogènes a permis l'implantation progressive d'une ripisylve plus dense.
- Élargissement et méandrage naturel : les images aériennes montrent un cours d'eau ouvert avec une dynamique sédimentaire active.

2. Canalisation et Infrastructure Hydraulique (1960-1980)

- Construction du canal EDF (début des années 1960) : cet aménagement a modifié profondément la confluence du Rancure en aval, où une section de 120 mètres a été bétonnée et couverte, réduisant le cours d'eau à un fossé rectifié.
- Aménagements routiers et urbanisation : des routes et bâtiments ont été implantés en bordure de cours d'eau, contribuant à la réduction de la bande active et à la fixation des écoulements.

3. Intensification de l'Urbanisation et Rétrécissement du Lit (1980-Aujourd'hui)

- Expansion urbaine d'Oraison : le développement du quartier du Vézier (1960) et l'extension de l'urbanisation en bordure du Rancure à partir des années 1980 ont accentué le rétrécissement du lit.
- Fixation des berges et disparition des îlots : la ripisylve devient plus dense, stabilisant le tracé du cours d'eau et réduisant les écoulements latéraux.
- Réduction de l'apport sédimentaire : les versants, autrefois plus dégagés, voient leur couvert végétal se renforcer.

Outre les ouvrages actuellement visibles ou recensés dans les études antérieures, plusieurs témoignages recueillis par le SMAB signalent l'existence possible d'aménagements anciens aujourd'hui partiellement ou totalement masqués par les dépôts alluviaux. Ces éléments doivent être considérés avec prudence, mais ils apportent un éclairage utile sur l'ancienneté des interventions humaines dans le lit du Rancure et du Puimichel.

Ainsi, d'après les témoignages, un mur en pierres maçonnées serait enterré dans les lits du Rancure et du Puimichel. Situé sous les sédiments, et disposé de façon transversale aux écoulements, cet ouvrage aurait été bâti pour ramener de l'eau aux canaux d'irrigation s'écoulant en rive droite de la confluence Rancure / Puimichel (voir Figure 79).

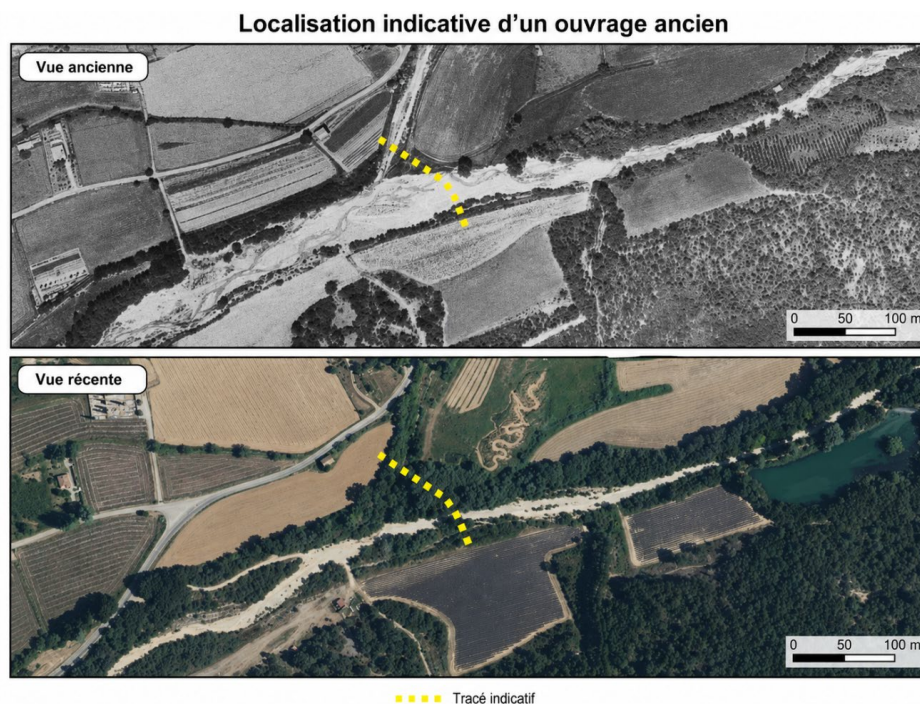


Figure 79 Localisation indicative d'un ancien mur en pierres maçonnées signalé par témoignages dans les lits du Rancure et du Puimichel, à proximité de leur confluence.

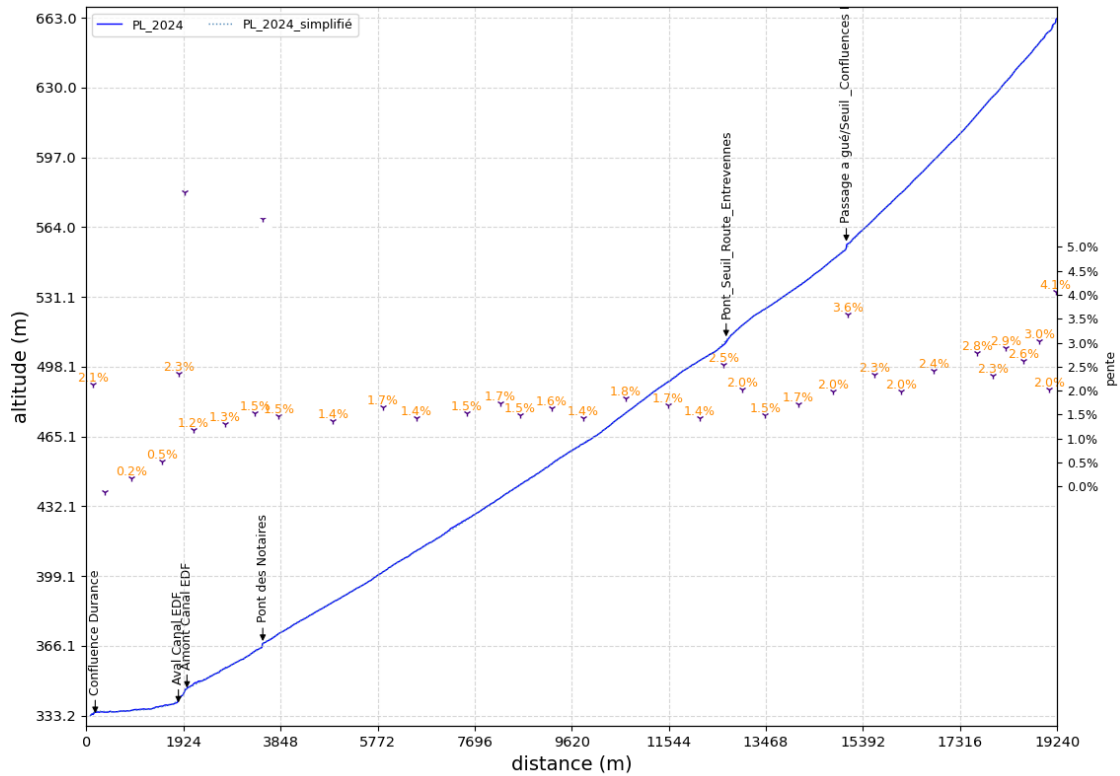


Figure 81 Profil en long 2024 du Rancure avec identification des ouvrages transversaux ayant une influence marquée sur la dynamique altimétrique du cours d'eau



Figure 82 Rancure: passage à gué de la route d'Entrevennes _vue amont (à gauche) et vue aval (à droite)



Figure 83 Rancure à Oraison : « pont des notaires » _vue amont (à gauche) et vue aval (à droite)



Figure 84 Rancure à Oraison : passage sous le canal EDF

Plus en amont sur le bassin versant, le gué du ravin des Brandaires constitue un exemple complémentaire de perturbation hydromorphologique liée à un ouvrage de franchissement secondaire. Au droit de la voie communale n°2, sur la commune de Saint-Julien-d'Asse, le passage busé apparaît limité au regard du fonctionnement torrentiel du ravin et du transport solide associé (voir Figure 85). Le SMAB indique que ce secteur est régulièrement soumis à des débordements lors de forts orages ([37]). L'engravement amont du gué a nécessité, en septembre-octobre 2025, un curage sur environ 55 m en amont de la buse. Le volume extrait a atteint environ 160 m³, les matériaux ayant ensuite été réinjectés plus en aval et dans le ravin de la Feuille sous forme de remblais fusibles. Cet exemple illustre le rôle que peuvent jouer certains ouvrages secondaires dans le ralentissement du transit solide, l'accumulation amont et la réduction locale de capacité hydraulique.

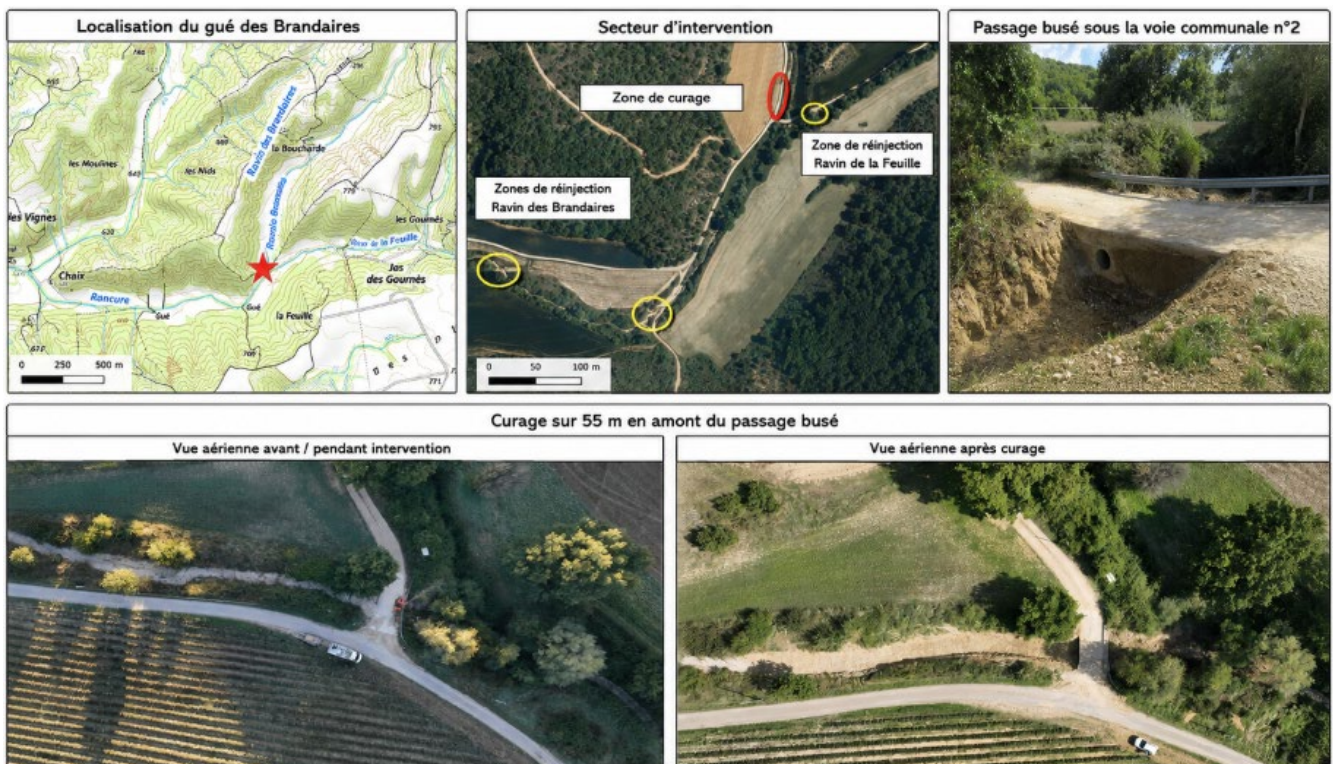


Figure 85 Gué du ravin des Brandaires : localisation, secteur d'intervention et travaux de curage réalisés en amont du passage busé

Le corsetage du lit

Le corsetage du lit d'un cours d'eau repose principalement sur des ouvrages longitudinaux d'origine anthropique, également appelés corsetage anthropique. On distingue deux grandes catégories :

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

- Les ouvrages de protection contre l'érosion des berges : ils forment le corsetage principal et incluent des structures telles que les enrochements libres ou liaisonnés, gabions, épis, murs et ouvrages en génie végétal. Leur fonction est de stabiliser les berges et de limiter leur érosion.
- Les ouvrages de protection contre les débordements : ces infrastructures, telles que merlons, digues et murs-digue, sont davantage des dispositifs de contrainte que de corsetage à proprement parler. Implantés sur le haut des berges, ils visent à limiter les débordements latéraux, mais n'empêchent pas l'érosion des berges situées en contrebas.

Cependant, certains ouvrages comme les digues et murs-digue – souvent rencontrés en milieu urbain et construits en enrochements bétonnés ou en maçonnerie – assurent à la fois une protection contre l'érosion et les débordements. En raison de cette double fonction, ils sont considérés comme des éléments de corsetage à part entière.

Concernant les « merlons », ils ne constituent pas des corsetages au sens strict. Les merlons sont généralement des levées de terre dont le rôle principal est de limiter et retarder les débordements. Ils n'impactent pas la mobilité latérale du cours d'eau puisqu'ils sont érodables au même titre que les berges.

Sur le Rancure, les ouvrages longitudinaux se concentrent principalement sur deux secteurs :

- Secteur du Castellet : en amont, ils incluent les protections de berges du lac du Castellet, tandis qu'au niveau du village, la route départementale joue un rôle structurant. En aval, des protections de berges sont présentes à proximité de la STEP (voir Figure 86).
- Secteur d'Oraison : les ouvrages se situent en rive droite le long de la route et en rive gauche avec les murs des lotissements (voir Figure 87).

L'impact exact des ouvrages longitudinaux est difficile à évaluer, car ces interventions humaines s'inscrivent dans une tendance « naturelle » qui va dans le même sens : la réduction du transport sédimentaire et l'évolution progressive vers un lit plus contraint et moins dynamique (cf analyse au paragraphe 3.2.4.1).



Figure 86 Rancure : ouvrages longitudinaux au niveau du Castellet (route, mur et protections de berges)



Figure 87 Rancure : ouvrages longitudinaux au niveau d'Oraison (route et murs des lotissements)

Curages, extractions et interventions sur le lit

Les archives et témoignages collectés mettent en évidence une longue histoire d'interventions directes sur le lit du Rancure et de ses affluents. Ces interventions relèvent de plusieurs logiques : extraction de matériaux, recalibrage, curage post-crue, création ou modification d'ouvrages, remblaiements, constitution de merlons, ou encore rétablissement d'accès après engrèvement.

Dans le secteur d'Oraison, les archives signalent entre 1980 et 1995/2000, l'exploitation d'une carrière à ciel ouvert, avec des volumes potentiellement importants, estimés dans les archives à plus de 20 000 m³ de graviers et un abaissement local du niveau de matériaux supérieur à 1 m (voir Figure 88). Ces éléments doivent être considérés comme des ordres de grandeur documentaires, mais ils montrent que le lit du Rancure a localement fait l'objet de prélèvements significatifs.

Les crues de 1992 et 1994 ont également donné lieu à des interventions de dégagement et de curage. Les archives mentionnent, après la crue d'août 1992, l'enlèvement de « tonnes de déblais » par les services municipaux, ainsi que des dommages sur plusieurs passages, canalisations et ouvrages. Après la crue de janvier 1994, des demandes de dégagement du lit et de création d'ouvrages de protection sont également rapportées, notamment dans le secteur du pont des Notaires et à Entrevennes.

Plus récemment, plusieurs opérations de curage ou de reprofilage ont été recensées sur le bassin versant. Elles concernent notamment le Puimichel en amont du passage de la RD101, le Rancure en amont du gué de la route d'Entrevennes, ainsi que le linéaire du Rancure dans la traversée ou à proximité du Castellet. Les éléments transmis indiquent des volumes de l'ordre de plusieurs centaines à plusieurs milliers de mètres cubes selon les opérations. Les matériaux ont pu être évacués, mis en merlons ou réinjectés en Durance selon les cas.

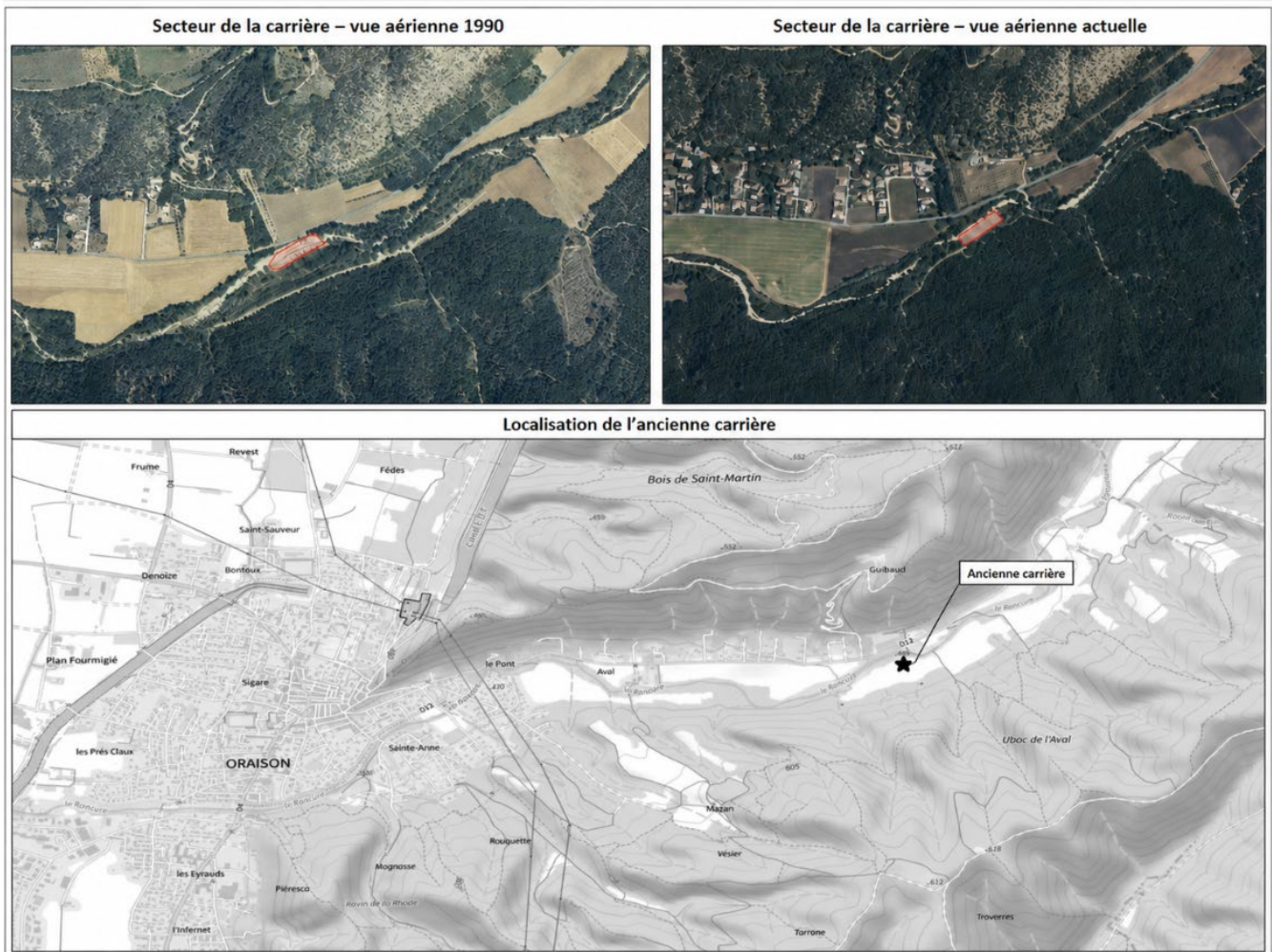


Figure 88 Localisation et évolution du secteur de l'ancienne carrière du Rancure, en amont d'Oraison.

3.2.4 Analyse diachronique

3.2.4.1 Evolution en plan

L'emprise de la bande active, qui englobe le lit du cours d'eau ainsi que les bancs de galets peu végétalisés, constitue, à l'instar du profil en long, un paramètre clé pour comprendre le fonctionnement géomorphologique et l'évolution des cours d'eau. Une analyse de cette caractéristique a été réalisée sur le Rancure ainsi que sur le Puimichel. Pour cela, les orthophotos historiques disponibles ont été analysées et les bandes actives ont été digitalisées (Figure 89 et Figure 90). Sept dates ont été étudiées afin de retracer les principales évolutions des dernières décennies : 1950_65, 1965_80, 2004, 2009, 2012, 2015 et 2018.

L'évolution spatiale de la largeur de la bande active du Rancure, mesurée tous les 10 mètres pour ces sept dates, est illustrée à la Figure 89 et à la Figure 90. Par ailleurs, la distribution statistique de la largeur de la bande active, analysée à ces mêmes dates sur les tronçons définis lors de sectorisation du cours d'eau (cf partie 3.1.2.1), est présentée à la Figure 91. L'analyse de l'évolution de la largeur de la bande active le long du Rancure, met en évidence plusieurs tendances temporelles et spatiales :

- **Tendance globale :**
 - Réduction de la largeur de la bande active au fil du temps : les valeurs médianes des années récentes sont en générales plus basses que celles des années plus anciennes (1950-65, 1965-80). Cela suggère un resserrement de la bande active au cours des décennies, avec une dynamique de stabilisation naturelle (fixation des boisements alluviaux) et anthropique (contrainte latérale) des berges.
 - Variabilité interannuelle : on observe une dispersion plus forte pour les années anciennes (1950-65, 1965-80), indiquant une plus grande diversité de largeurs entre les tronçons. Dans les années récentes, les largeurs semblent plus homogènes, ce qui est le signe d'une stabilisation ou d'une réduction progressive des dynamiques de mobilité latérale du Rancure.
- **Analyse spatiotemporelle :**
 - L'évolution de la largeur de la bande active entre 1950 et 1965 reflète le comportement naturel du cours d'eau en lien avec son fonctionnement hydromorphologique. On observe une augmentation significative de la largeur médiane après les principales confluences, notamment avec le Puimichel, témoignant d'un apport sédimentaire marqué (voir Figure 92). De plus, une expansion de la bande active est visible à l'entrée d'Oraison, en cohérence avec la dynamique d'un cône de déjection géomorphologique, où le cours d'eau tend naturellement à s'étaler et à déposer ses sédiments.
 - Ce comportement naturel tend à s'atténuer au fil du temps, se traduisant par une homogénéisation progressive des largeurs de la bande active et une nette réduction de la variabilité. Ce phénomène est particulièrement visible lors de la traversée d'Oraison, où l'urbanisation et les contraintes latérales restreignent l'expansion naturelle du cours d'eau et altèrent sa dynamique morphologique (voir Figure 92 et Figure 94). De plus, en aval de la confluence avec le Puimichel, les valeurs les plus élevées observées pour les années anciennes témoignent d'une alimentation sédimentaire « historique » significative apportée par cet affluent majeur. Une photographie aérienne ancienne de la confluence entre le Rancure et le Puimichel (prise en 1952, Figure 93) illustre de manière visuelle cette dynamique historique. On y distingue clairement une bande active très large et peu végétalisée, occupée par des bancs de galets et des chenaux multiples, en cohérence avec les observations issues des orthophotos 1950-65. Toutefois, cette contribution du Puimichel a progressivement diminué au fil des décennies, notamment sous l'effet du seuil de la RD101.
 - Pour les années récentes, l'évolution interannuelle de la bande active s'est nettement atténuée, avec des élargissements ponctuels en réponse aux crues, comme en 2015 suite aux événements de 2013 et 2014. Toutefois, ces élargissements restent limités, suggérant une réduction de la capacité du cours d'eau à mobiliser et redistribuer les sédiments sur le long terme.

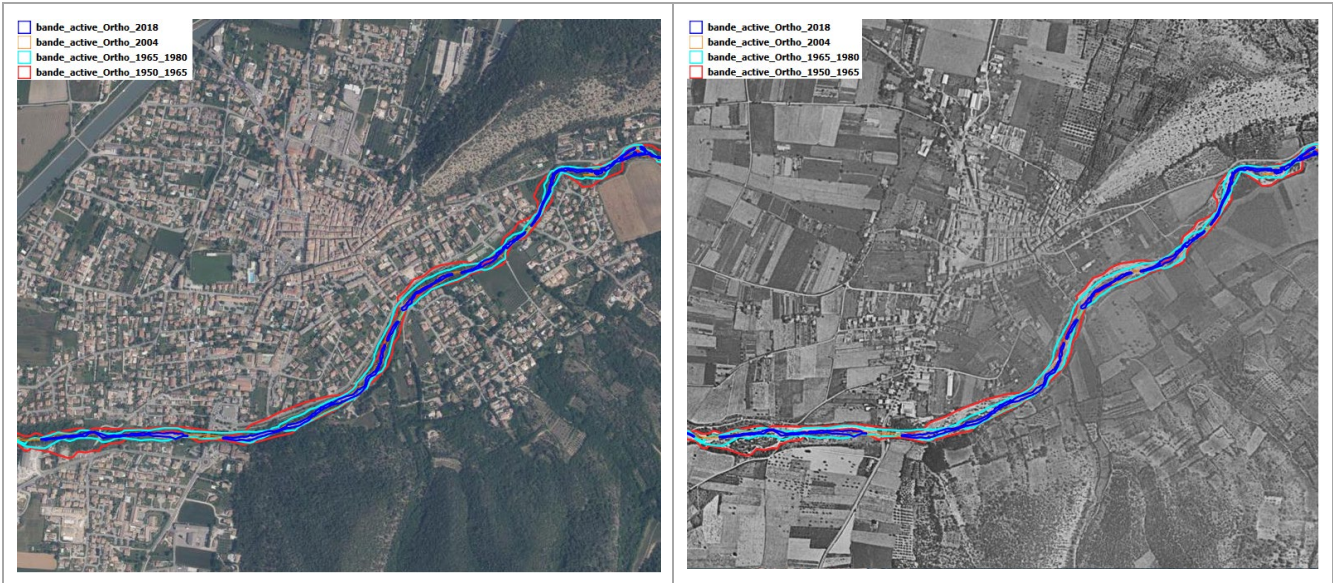


Figure 89 Évolution de la bande active du Rancure à Oraison de 1950 à aujourd'hui (orthophoto 2018 à gauche et orthophoto 1950_65 à droite)

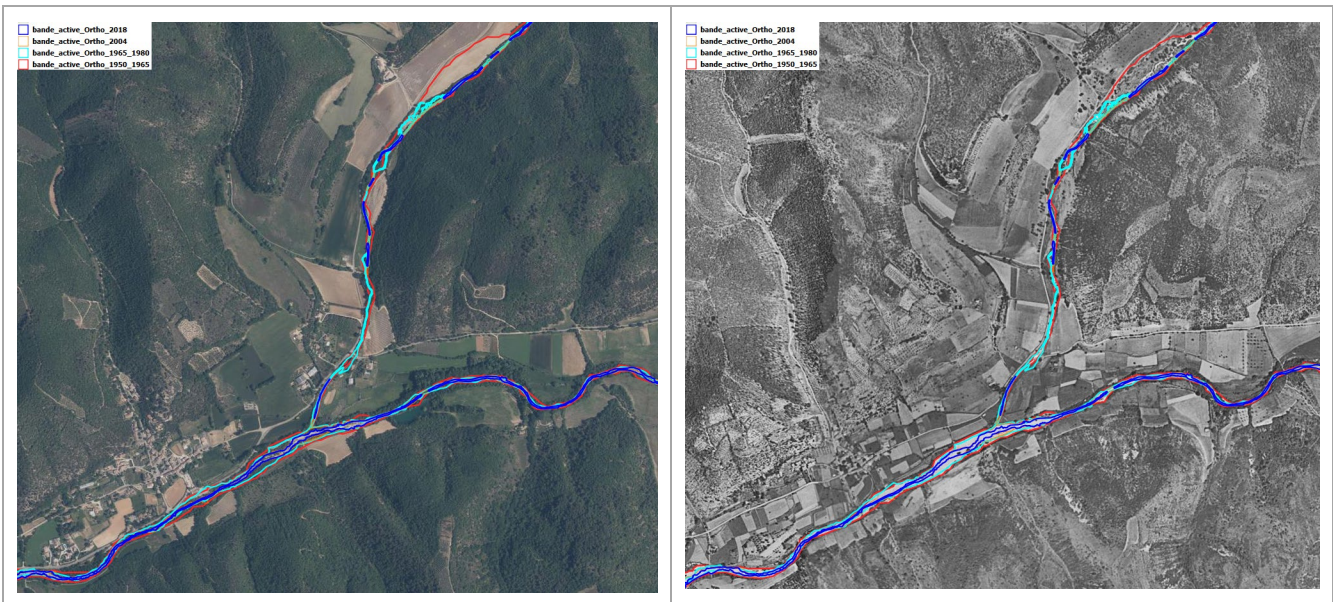


Figure 90 Évolution de la bande active du Rancure et du Puimichel à leur confluence à Oraison de 1950 à aujourd'hui (orthophoto 2018 à gauche et orthophoto 1950_65 à droite)

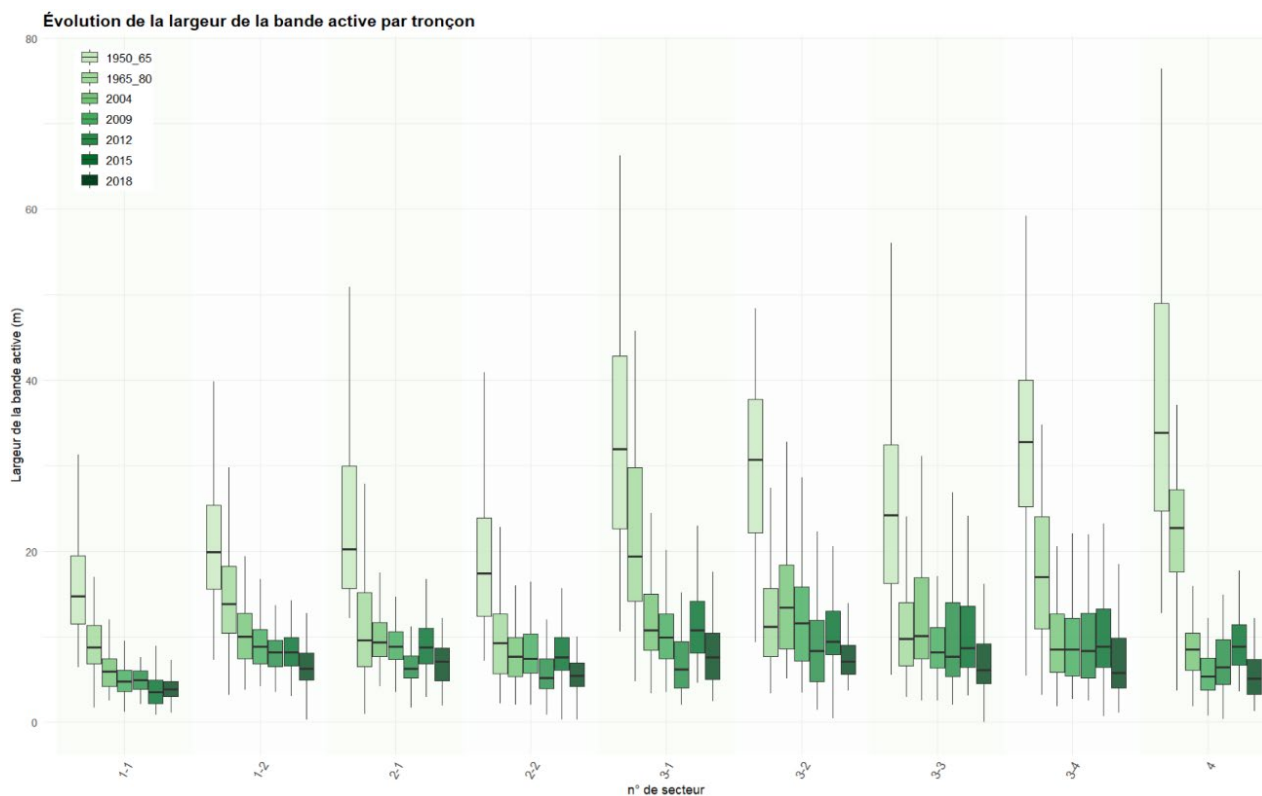


Figure 91 Répartitions statistiques des largeurs de bandes actives du Rancure pour chaque période et pour les différents tronçons de la sectorisation.

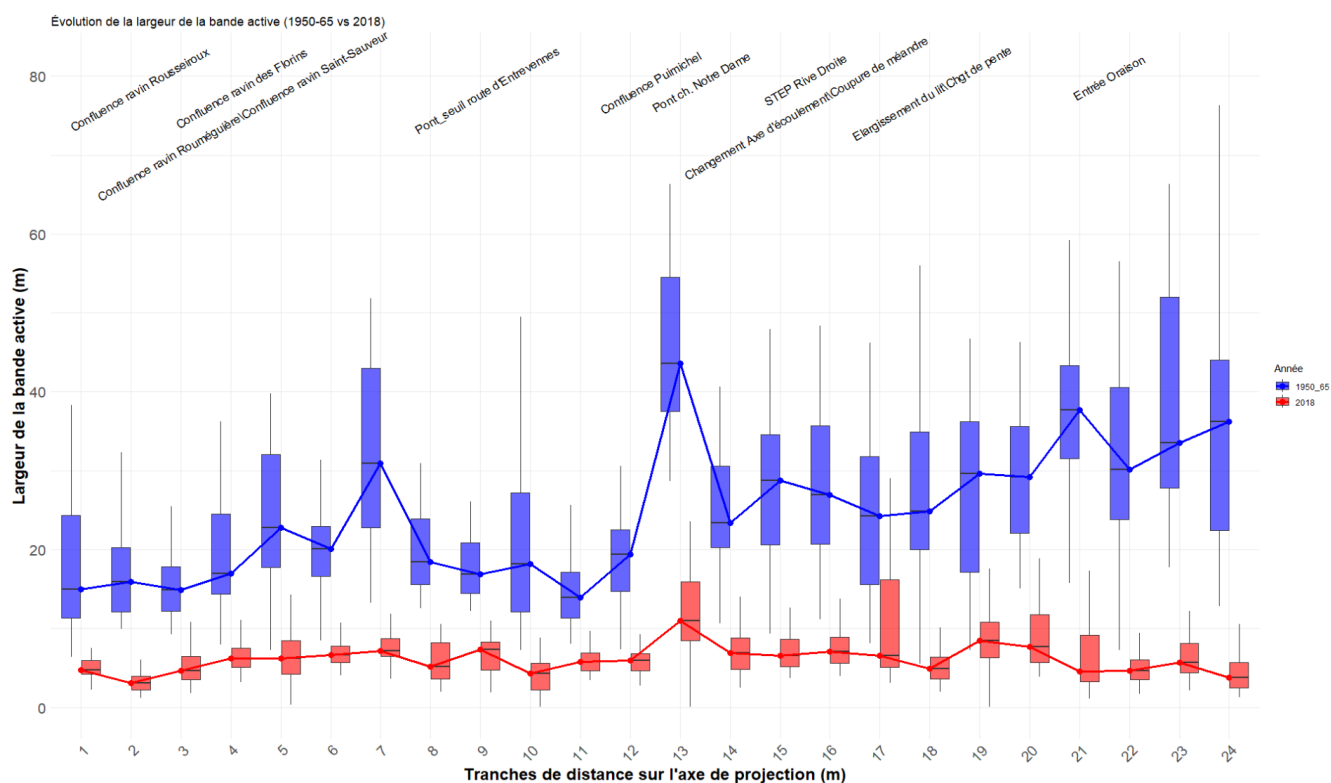


Figure 92 Distribution de la largeur de la bande active du Rancure en 1950-65 et 2018, présentée par tranches de distance le long de l'axe de projection.



Figure 93 Vue aérienne de la confluence entre le Rancure et le Puimichel en 1952

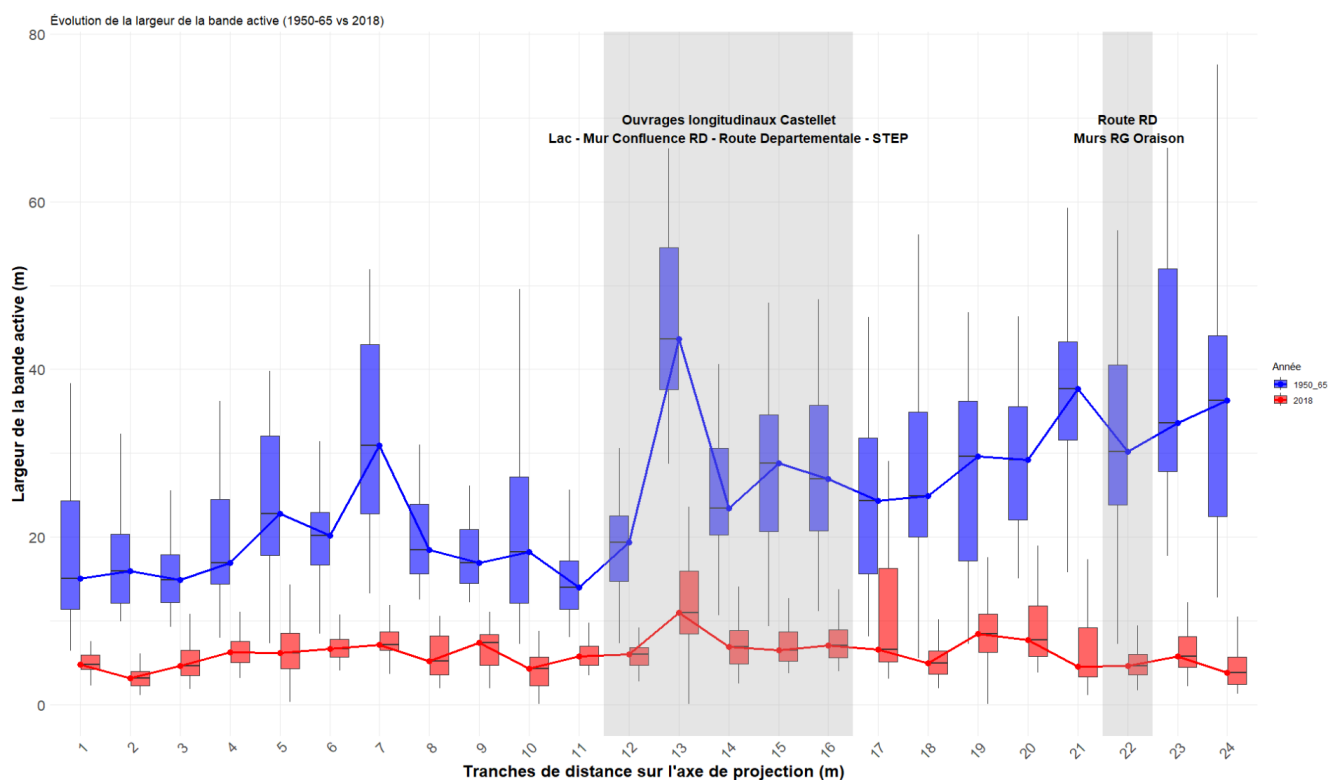


Figure 94 Distribution de la largeur de la bande active du Rancure en 1950-65 et 2018, impact des ouvrages longitudinaux.

L'évolution de la bande active du Puimichel (voir Figure 96) suit globalement les mêmes tendances que celles observées pour le Rancure : une réduction progressive et marquée de la largeur de la bande

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

active au cours des soixante-dix dernières années, avec des largeurs médianes plus élevées dans les années anciennes (1950-65, 1965-80) que dans les années récentes (2004-2021). Cette évolution traduit un processus de stabilisation latérale du chenal, associé à la fixation de la ripisylve et aux contraintes anthropiques, mais aussi à une diminution progressive de la charge solide mobilisée par le cours d'eau.

- Tendances amont (secteurs 1 et 2)

Dans les tronçons amont, la diminution de la bande active est réelle mais d'ampleur plus limitée que dans les tronçons aval. Cette différence s'explique par des conditions initiales déjà contraignantes : en 1950, la bande active était relativement réduite par rapport à l'aval. Cela correspond à la lithologie dominante des marnes rouges et des formations marneuses, qui apportent essentiellement des matériaux fins. Ces substrats limitent le développement de chenaux multiples et de formes de tressage, d'où une largeur de bande active historiquement plus étroite et moins sensible aux variations morphodynamiques.

- Tendances médianes et aval (secteurs 3 et 4)

Dans les tronçons intermédiaires et aval, l'analyse diachronique révèle une dynamique plus marquée. Historiquement, on observe une augmentation significative de la bande active dans les secteurs 3-3 et 4. Cette expansion correspond à l'apport de matériaux grossiers par les affluents latéraux, le ravin des Bronzets et le ravin Maucues, qui enrichissaient ponctuellement la charge solide du Puimichel. Cependant, l'analyse met en évidence un affaiblissement progressif de ces apports latéraux. En comparant les largeurs médianes de bande active des années anciennes et récentes, l'écart qui existait historiquement entre les tronçons 3-2 (plus étroits) et les tronçons 3-3 / 4 (plus larges) s'est progressivement réduit au cours des 70 dernières années. Cette homogénéisation témoigne d'une réduction de la capacité des affluents à alimenter le Puimichel en charge solide grossière, et donc d'un affaiblissement de leur rôle morphogène.

- Tendances récentes (2004-2021)

Comme sur le Rancure, les largeurs récentes (2004-2021) montrent des valeurs plus homogènes et nettement plus faibles que dans les années 1950-80. Quelques élargissements ponctuels reflètent l'impact d'épisodes de crues morphogènes, mais ces réactions restent limitées.

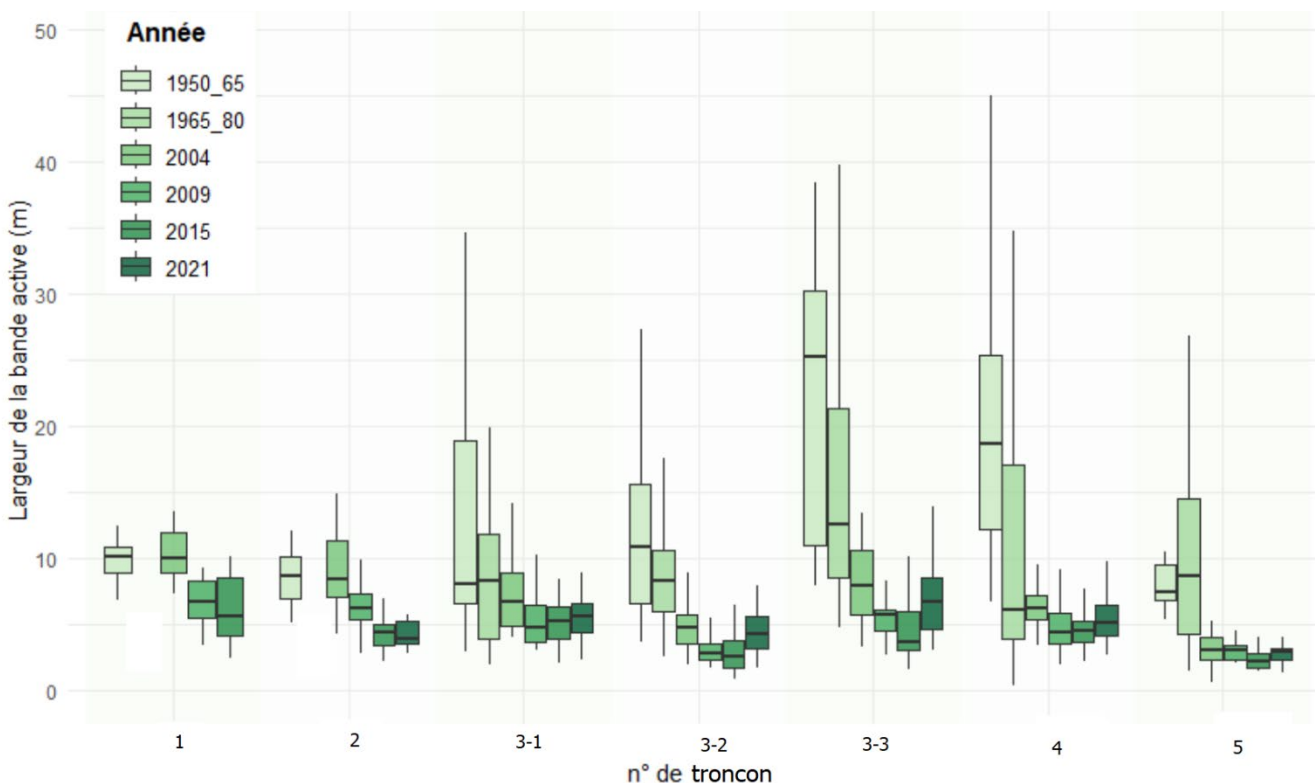


Figure 95 Répartitions statistiques des largeurs de bandes actives du Puimichel pour chaque période et pour les différents tronçons de la sectorisation.

Outre la tendance générale à la réduction de la largeur de la bande active, l'analyse diachronique en plan met en évidence un changement d'axe d'écoulement du Puimichel à proximité de la confluence avec le ravin des Maucoues. Historiquement centré, le lit s'est progressivement déplacé vers la rive droite, en se rapprochant de l'exutoire du ravin (voir Figure 96). Ce déplacement peut témoigner d'une diminution de l'influence de l'apport solide du Maucoues sur la dynamique locale du Puimichel.

Depuis le milieu du XXe siècle, la largeur de la bande active du Rancure a progressivement diminué, témoignant d'un resserrement du lit et d'une réduction de la mobilité latérale du cours d'eau. Cette évolution, liée à une stabilisation naturelle des berges, a été accentuée par les actions anthropiques. Ce processus, caractéristique des bassins de moyenne altitude, limite désormais l'influence des crues morphogènes sur la dynamique fluviale, au profit d'un contrôle croissant par les aménagements humains.

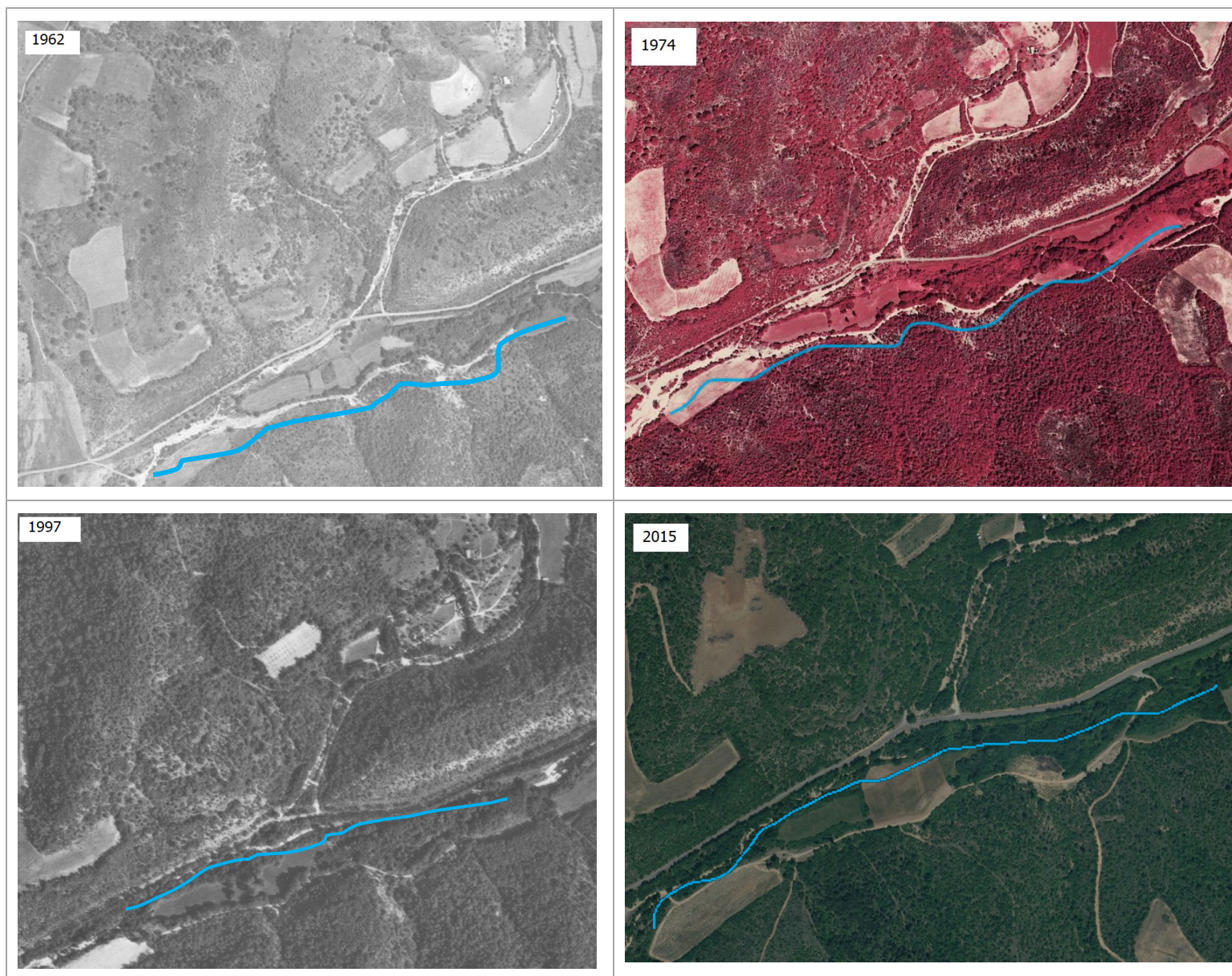


Figure 96 Évolution diachronique en plan du Puimichel (secteur confluence du ravin des Maucoues), à partir des orthophotos de 1962, 1974, 1997 et 2015. Les traits bleus indiquent la localisation du chenal principal à chaque date

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

3.2.4.2 Evolution du profil en long

Une analyse diachronique des profils en long disponibles a été menée afin de caractériser les grandes tendances d'évolution du cours d'eau et d'identifier leurs liens avec des causes potentielles naturelles ou anthropiques.

Les données topographiques, recensées et utiles pour l'analyse des profils en long, sont reprises dans le Tableau 24.

Auteur	Année	Description succincte
SCP	1994	<i>Format pdf</i> - Profil en long Rancure sur ~1 km (dans la traversée du Castellet) 468,45 à 449,59 m NGF - Profil en long Rancure sur ~ 17,7 km (de la confluence du ravin des Brandaires au canal EDF) 671,50 à 345,00 m NGF : reconnaissance effectuée en novembre 1993
SOGREAH	2007	<i>Format dwg</i> Dans la traversée du Castellet : - Profil en long (fonds extrême - FE) Rancure sur 3,5 km 492,84 à 434,90 m NGF - Profil en long (fonds extrême - FE) Puimichel sur 1,3 km jusqu'à la confluence, 496,92 à 471,41 m NGF
CARLAVAN	2020	<i>Format dwg</i> - Profil en long (fonds extrême - FE) Rancure sur 0,3 km (autour du pont de la RD101), 515,63 à 508,11 m NGF - Profil en long (fonds extrême - FE) Puimichel sur 0,5 km, 484,25 à 474,39 m NGF
OHNIMUS TOULEMONDE BONTOUX	/ 2021	<i>Formats dwg, xls</i> - Profil en long (fonds extrême - FE) Rancure sur 19 km (de la confluence du ravin des Brandaires à celle de la Durance) - Profil en long (fonds extrême - FE) des principaux affluents du Rancure : - o Puimichel sur 5,5 km, - o St Sauveur sur 0,5 km, - o Roumégère sur 0,5 km, - o Rougeiroux sur 0,5 km
IGN	2021	<i>Format Laz et tif</i> Levé LIDAR HD (semi de points) de l'ensemble du bassin versant avec classification
TOULEMONDE BONTOUX	2024	<i>Formats dwg, xls</i> Levés similaires à ceux de 2021 avec compléments : <u>Sur la coussière de la Lague (affluent du Puimichel) :</u> o profil en long en amont de la confluence avec le Puimichel (environ 0,5 km)

Tableau 24 Données topographiques disponibles pour l'analyse diachronique du profil en long

Les profils en long obtenus à partir des levés terrestres (pour rappel : seuls les fonds extrêmes sont disponibles) ont été reprojetés selon l'axe de projection défini par Toulemonde (2021, 2024) : voir (Figure 97). Pour valider le système de reprojection employé, une comparaison a été réalisée entre les données projetées (Toulemonde, 2024) et les données brutes reprojetées à l'aide du même système. L'écart est ensuite représenté à chaque abscisse le long des axes (voir Figure 98).

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

Par ailleurs, le profil en long de 1994 a été repositionné sur l'axe de projection en s'appuyant sur les éléments disponibles. Toutefois, cette reconstitution doit être interprétée avec prudence, car elle repose sur un nombre de points limité et un contexte de recentrage dans l'axe de projection qui introduit une part d'incertitude. Ces éléments doivent donc être pris en compte dans l'analyse des évolutions morphologiques.

Concernant les **données issues du Lidar HD**, le traitement a consisté à générer des transects tous les 10 mètres, perpendiculaires à l'axe de projection, et prolongés jusqu'aux limites du polygone représentant le fond du lit du chenal actif actuel. Ce polygone a été défini par le croisement entre la bande active numérisée à partir de l'orthophotographie de 2021 et le MNT issu du Lidar HD.

Ces transects sont ensuite élargis à l'aide d'un buffer de 5 m, permettant de calculer la moyenne des altitudes contenues dans cette zone pour estimer le fond moyen, ainsi que l'altitude minimale afin de déterminer le fond extrême. La comparaison, présentée à la Figure 99, du profil "fonds extrême" reprojeté issu des levés terrestres (Toulemonde, 2024) avec le profil "fonds extrême" extrait du traitement Lidar HD 2021 permet de valider le système d'extraction du profil en long à partir des données Lidar.

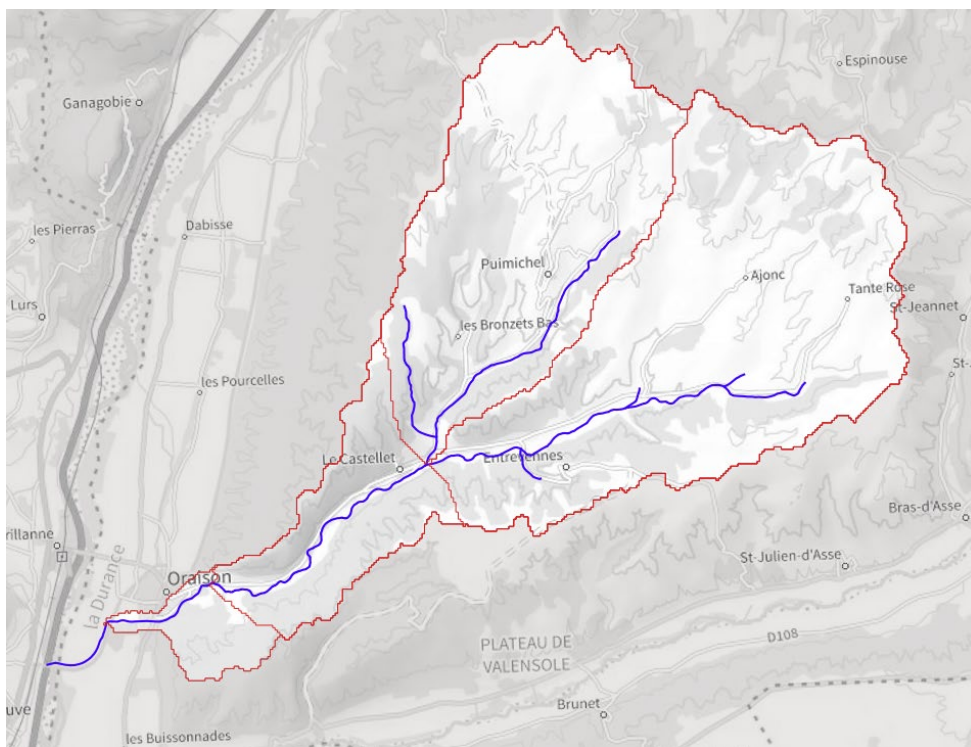


Figure 97 Axes de projection établis par le SMAB pour le Rancure et ses principaux affluents (notamment le Puimichel).

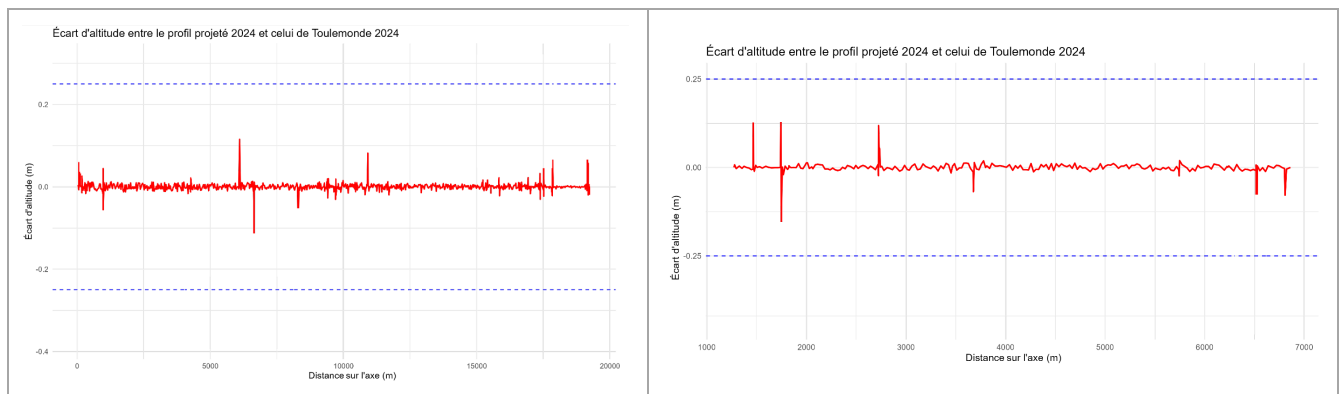


Figure 98 Validation du système de projection des données topographiques issues des levés terrestres : écart d'altitude entre les données brutes (Toulmonde, 2024) reprojetées et les données projetées (Toulemonde, 2024) : Rancure (à gauche) et Puimichel (à droite).

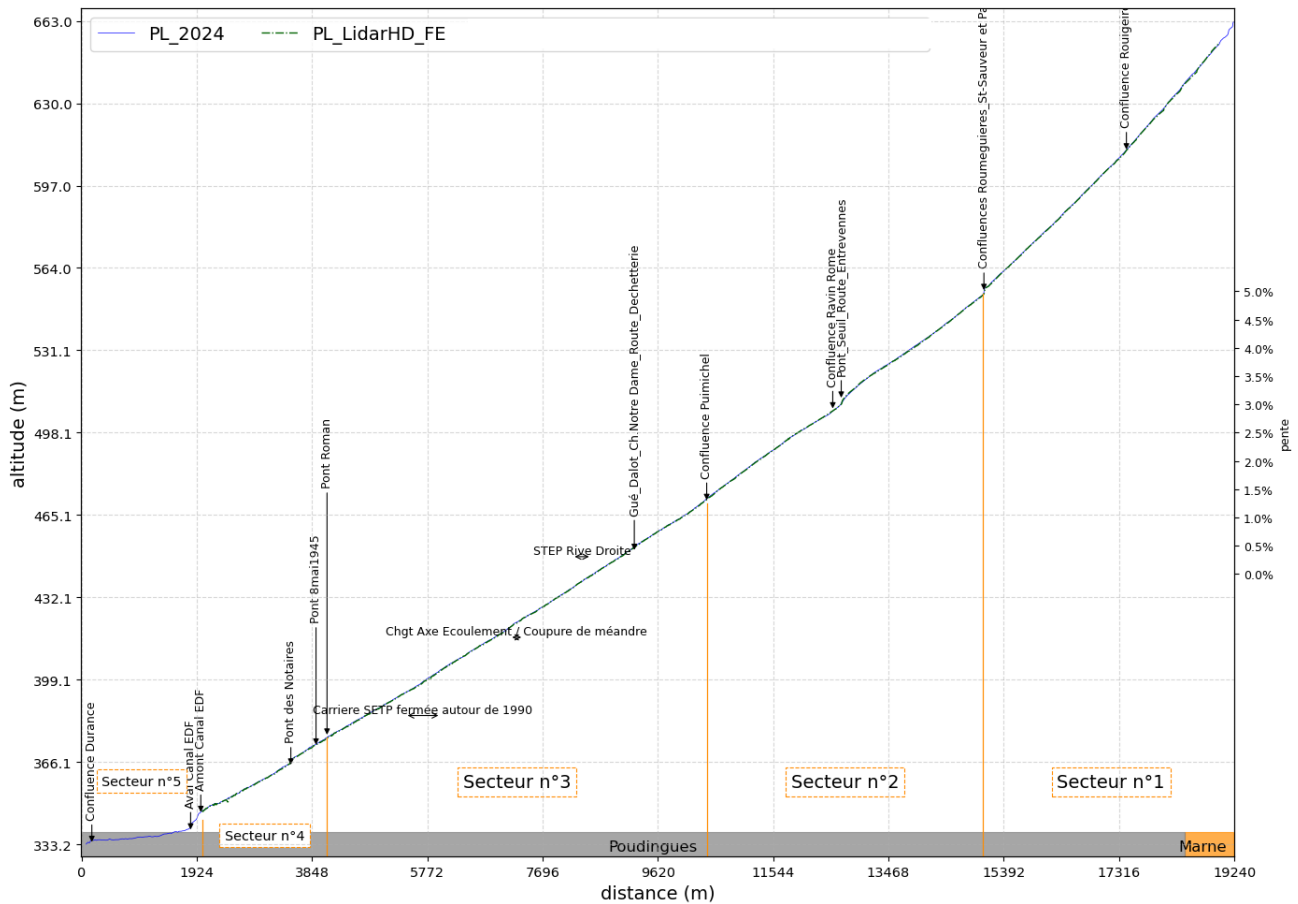


Figure 99 Comparaison du profil « fonds extrême » reprojété issu des levés terrestres (Toulemonde, 2024) avec le profil « fonds extrême » issu du traitement Lidar HD 2021.

Analyse diachronique du profil en long du Rancure

L'analyse des profils en long du Rancure repose donc sur la comparaison d'un profil ancien (1994) et de plusieurs relevés récents (2007, 2021, 2024) mais également d'un profil morphologique extrait des terrasses anciennes. Cette dernière extraction a été réalisée afin d'évaluer les valeurs de pentes caractéristiques du cours d'eau.

L'identification et la caractérisation morphologique des terrasses anciennes ont été réalisées en combinant une analyse géomorphologique avec l'exploitation d'orthophotographies historiques et de données altimétriques récentes.

1. Délimitation des terrasses anciennes

La détection des terrasses dites « anciennes » ou « historiques » a été fondée sur (Figure 100) :

- L'interprétation géomorphologique à partir de l'orthophotographie de 1950-1965, permettant d'identifier les anciennes bandes de tressage ou les bas niveaux correspondant aux terrasses héritées du Petit Âge Glaciaire (PAG).
- L'analyse du MNT actuel afin de repérer les discontinuités de pente ou ruptures de versant associées à ces terrasses.
- L'analyse par ombrage du MNT, qui a permis de mieux visualiser les ruptures morphologiques et les anciens niveaux de terrasse.
- Les zones anthropisées ou fortement remaniées ont été exclues du traitement afin de ne conserver que les terrasses préservées dans leur topographie naturelle.

La comparaison de ces éléments avec la configuration actuelle du lit mineur a permis de distinguer :

- Le chenal actif actuel, correspondant au « lit mineur », qui a été digitalisé par deux entités :
 - Le fond du lit mineur actuel, représentant l'axe de concentration des écoulements.
 - Les berges du lit mineur actuel, délimitant l'emprise latérale du chenal actif.

- Le fond du lit élargi incluant les terrasses anciennes, digitalisé à partir des éléments interprétés sur les orthophotos anciennes et du MNT, correspondant à l'espace occupé historiquement par la bande de tressage ou les anciennes bandes actives.

2. Extraction des terrasses anciennes

Pour isoler les terrasses anciennes :

- Une opération de différence spatiale (différence vectorielle) a été réalisée entre le polygone du fond du lit incluant les terrasses anciennes et le polygone des berges du lit mineur actuel.
- Cette différence a permis de retirer l'emprise du chenal actif actuel, ne conservant ainsi que les surfaces correspondant aux terrasses anciennes hors chenal actif.

3. Caractérisation altitudinale

Une fois ces terrasses isolées, la méthodologie suivante a été appliquée :

- Génération de transects perpendiculaires à l'axe de projection, espacés tous les 10 mètres, couvrant l'ensemble de la largeur des polygones des terrasses anciennes.
- Chaque transect a ensuite été élargi par un buffer de 5 mètres de part et d'autre, de façon à intégrer une surface suffisante pour la mesure.

Dans chaque transect élargi, les altitudes issues du Lidar HD actuel ont été extraites, permettant de calculer la moyenne altimétrique par transect. Cela fournit une estimation du fond moyen des terrasses anciennes, reflétant l'altitude moyenne de ces niveaux par rapport à l'axe du cours d'eau.

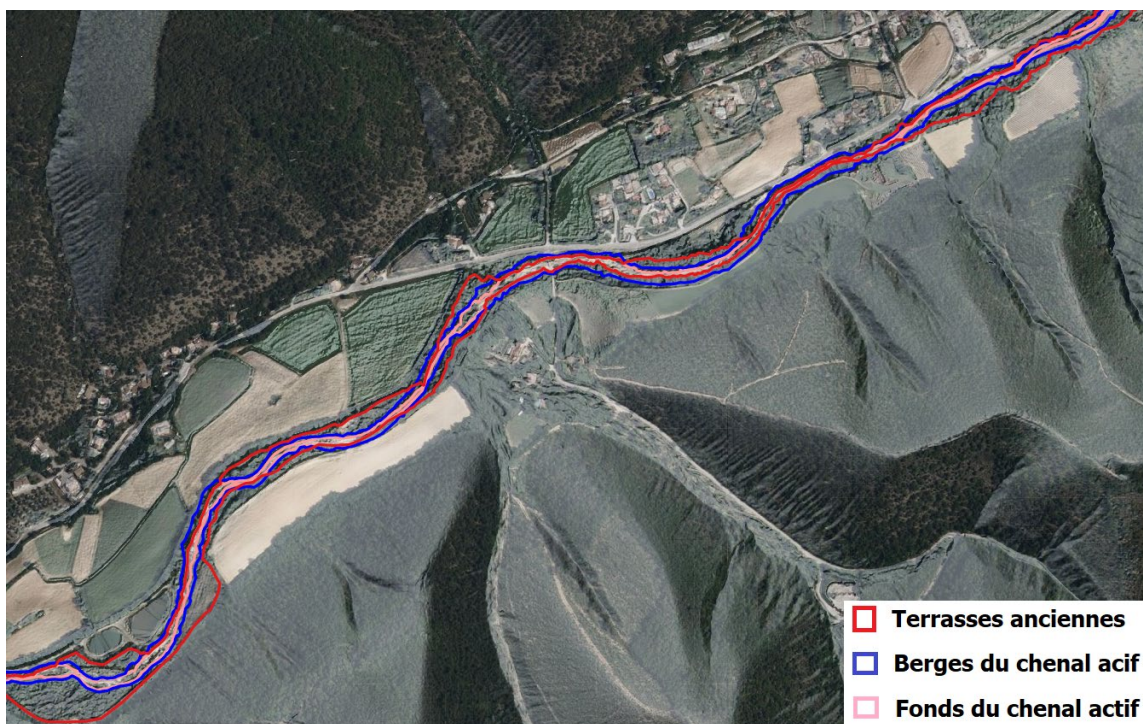


Figure 100 Exemple de délimitation du chenal actif actuel et des terrasses anciennes (Rancure au niveau du Castellet).

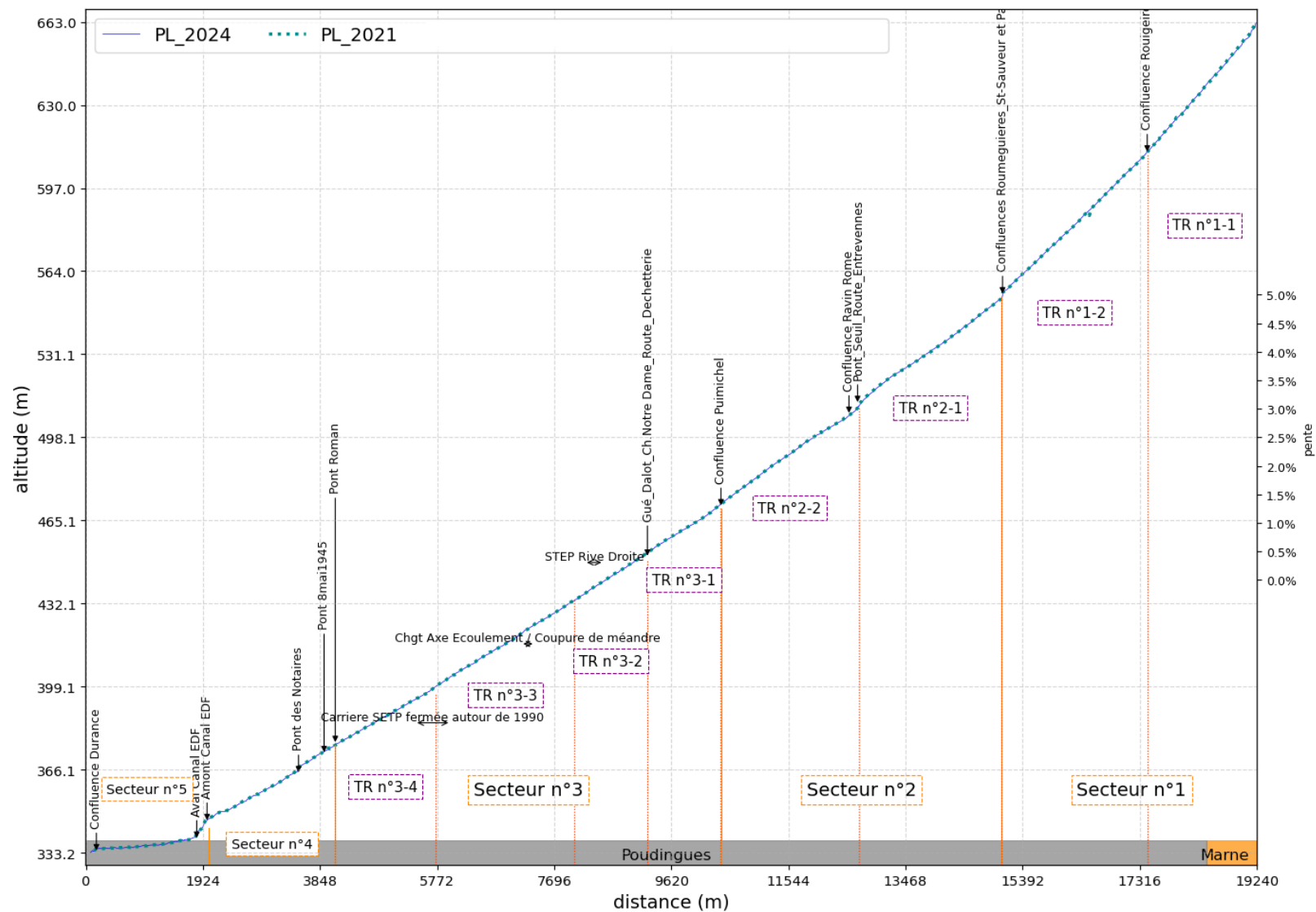


Figure 101 Profils en long: comparaison 2024/2021

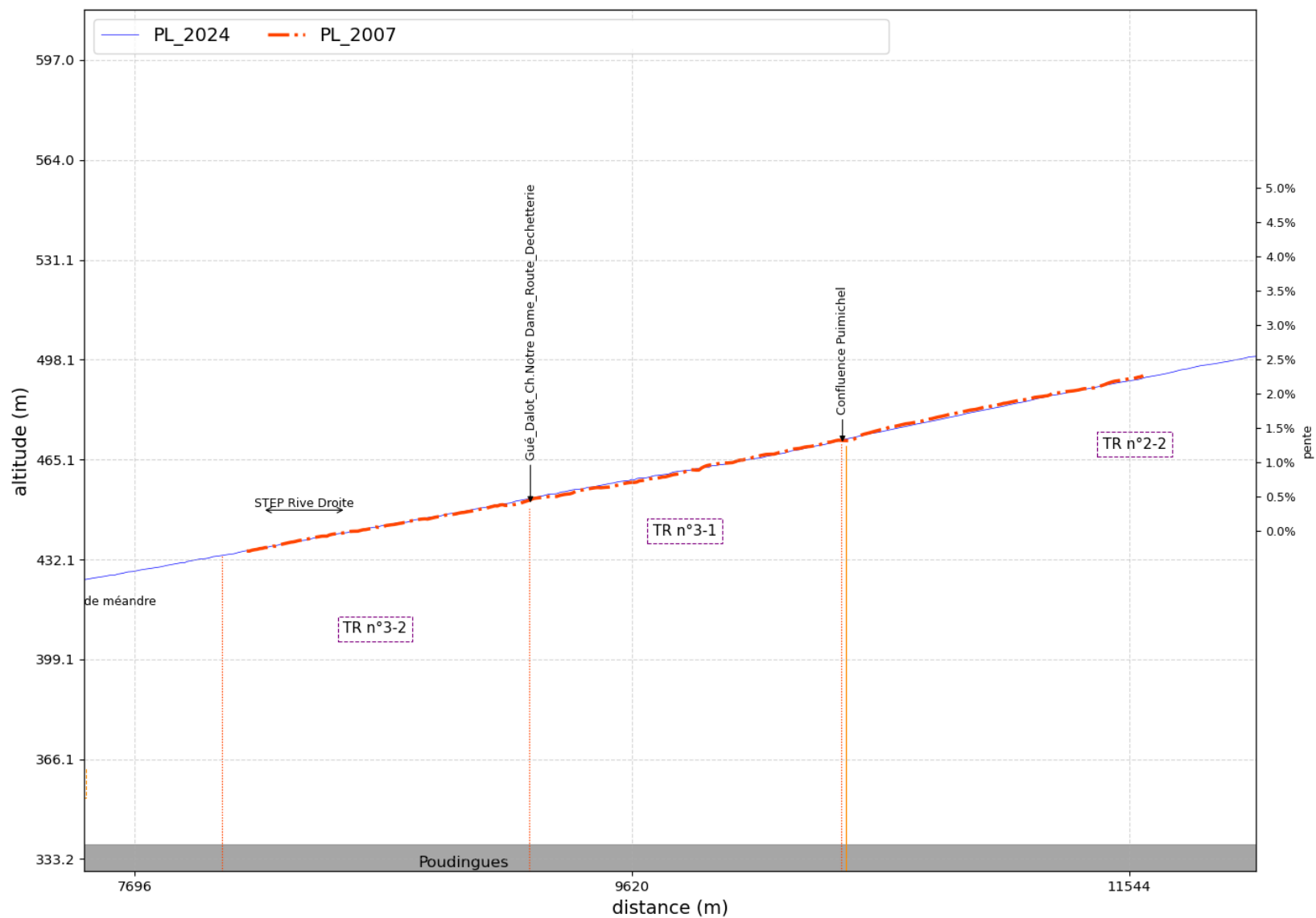


Figure 102 Profils en long : comparaison 2024/2007

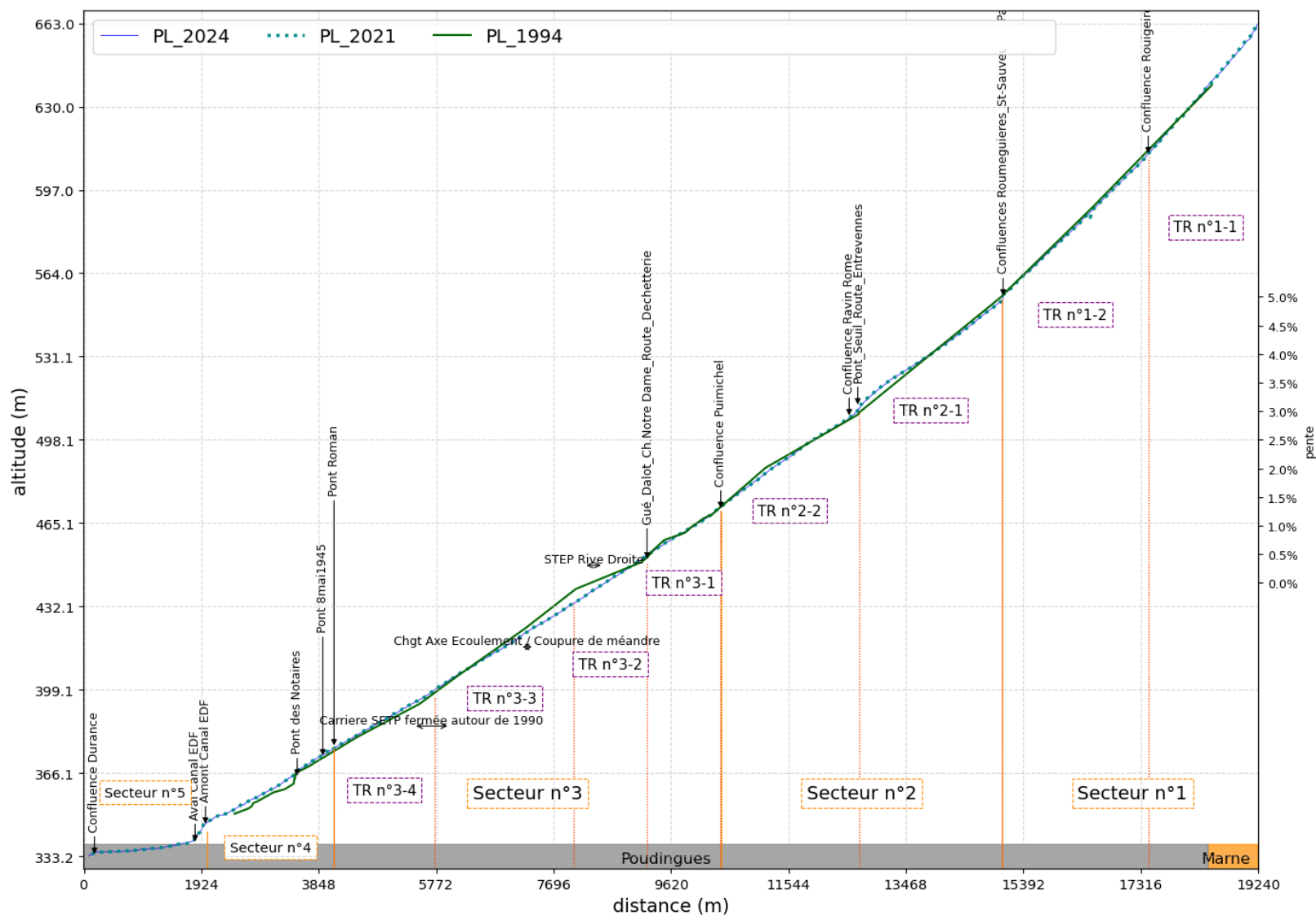


Figure 103 Profils en long 2024/1994 : profil en long général

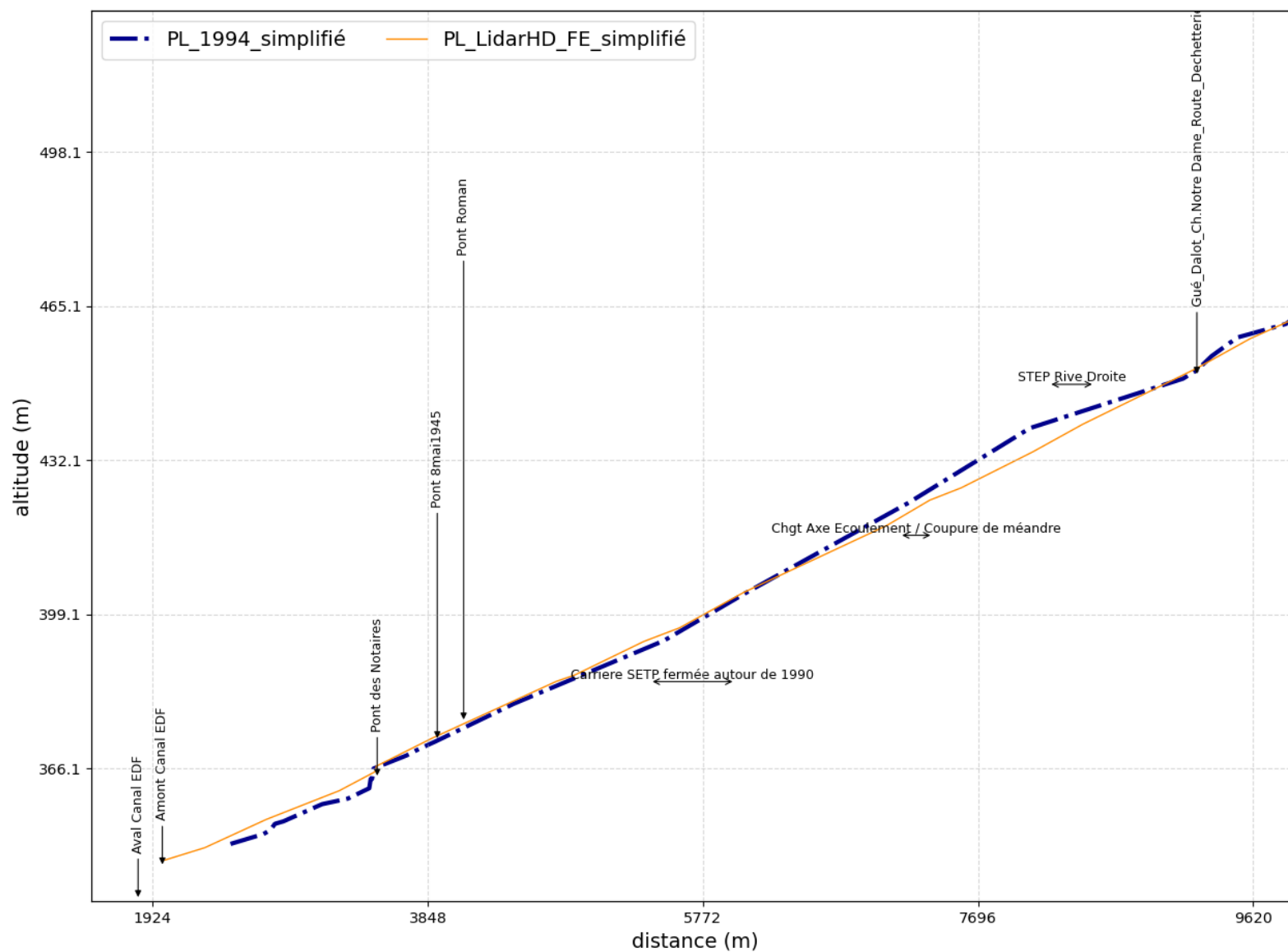


Figure 104 Profils en long 2024/1994 : zoom à partir de l'entrée d'Oraison

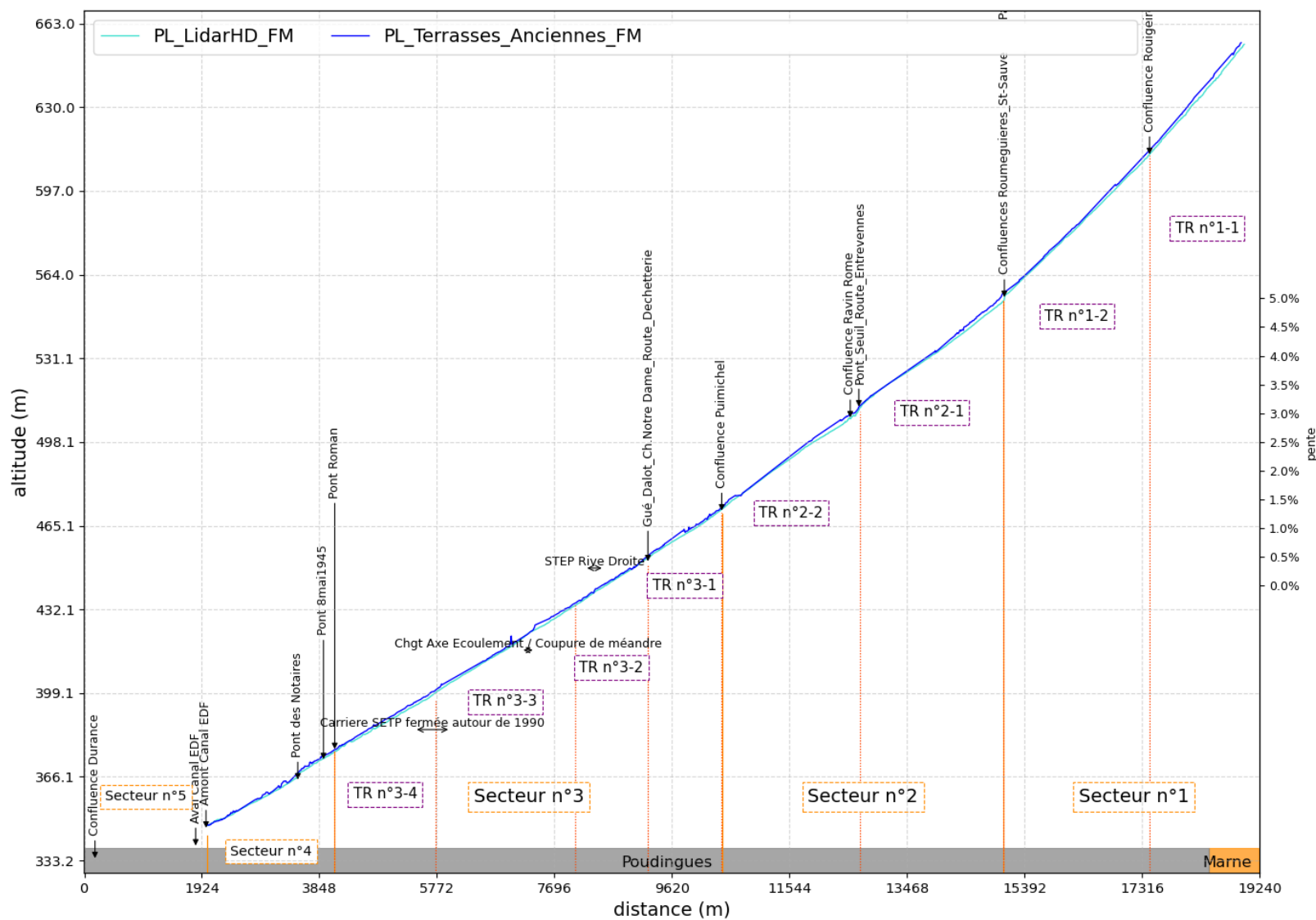


Figure 105 Fonds moyens du chenal actif Lidar HD (2021) et Fonds moyens des « terrasses anciennes » : profil en long général

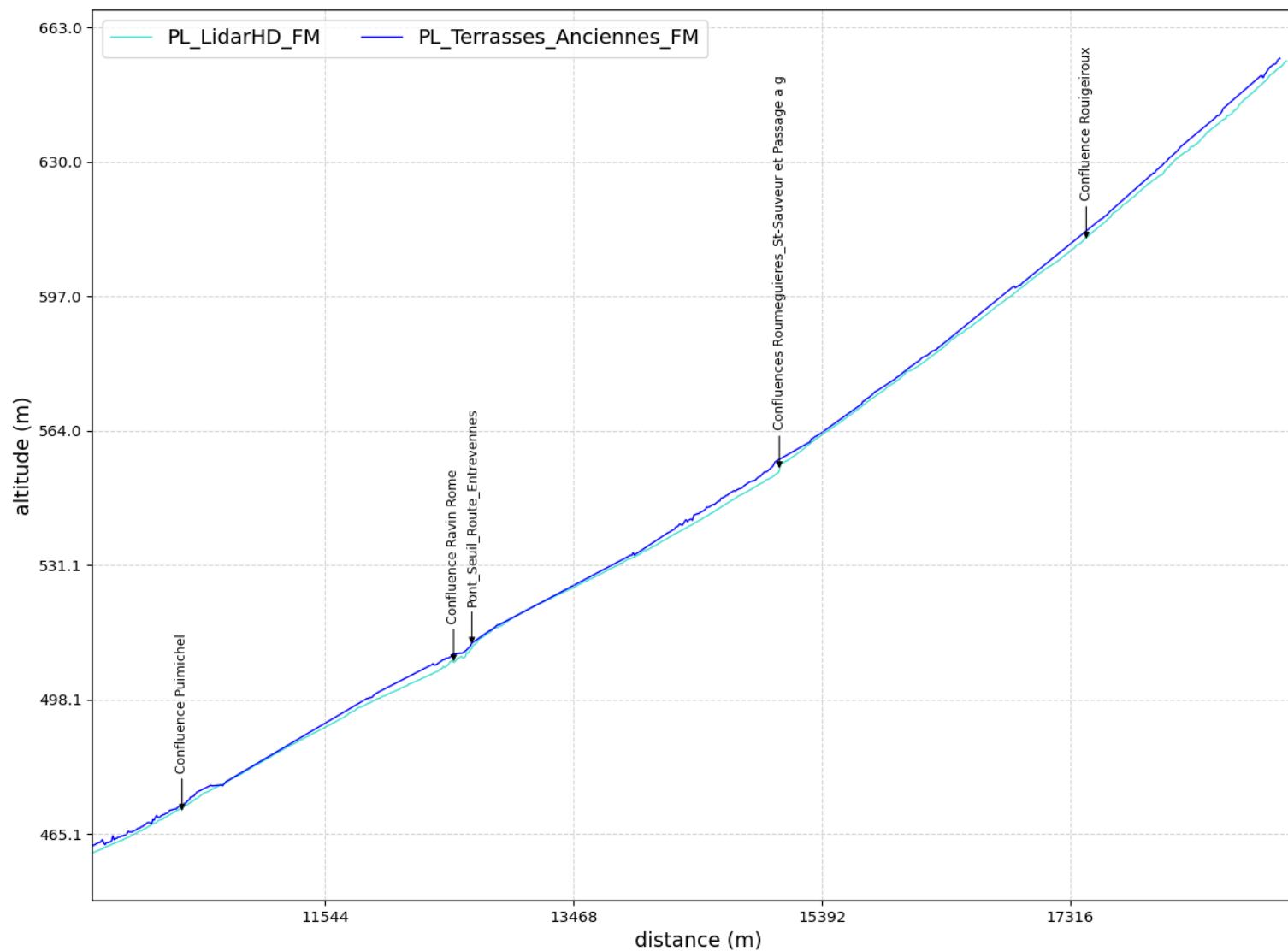


Figure 106 Fonds moyens du chenal actif Lidar HD (2021) et Fonds moyens des « terrasses anciennes » : zoom sur la partie amont

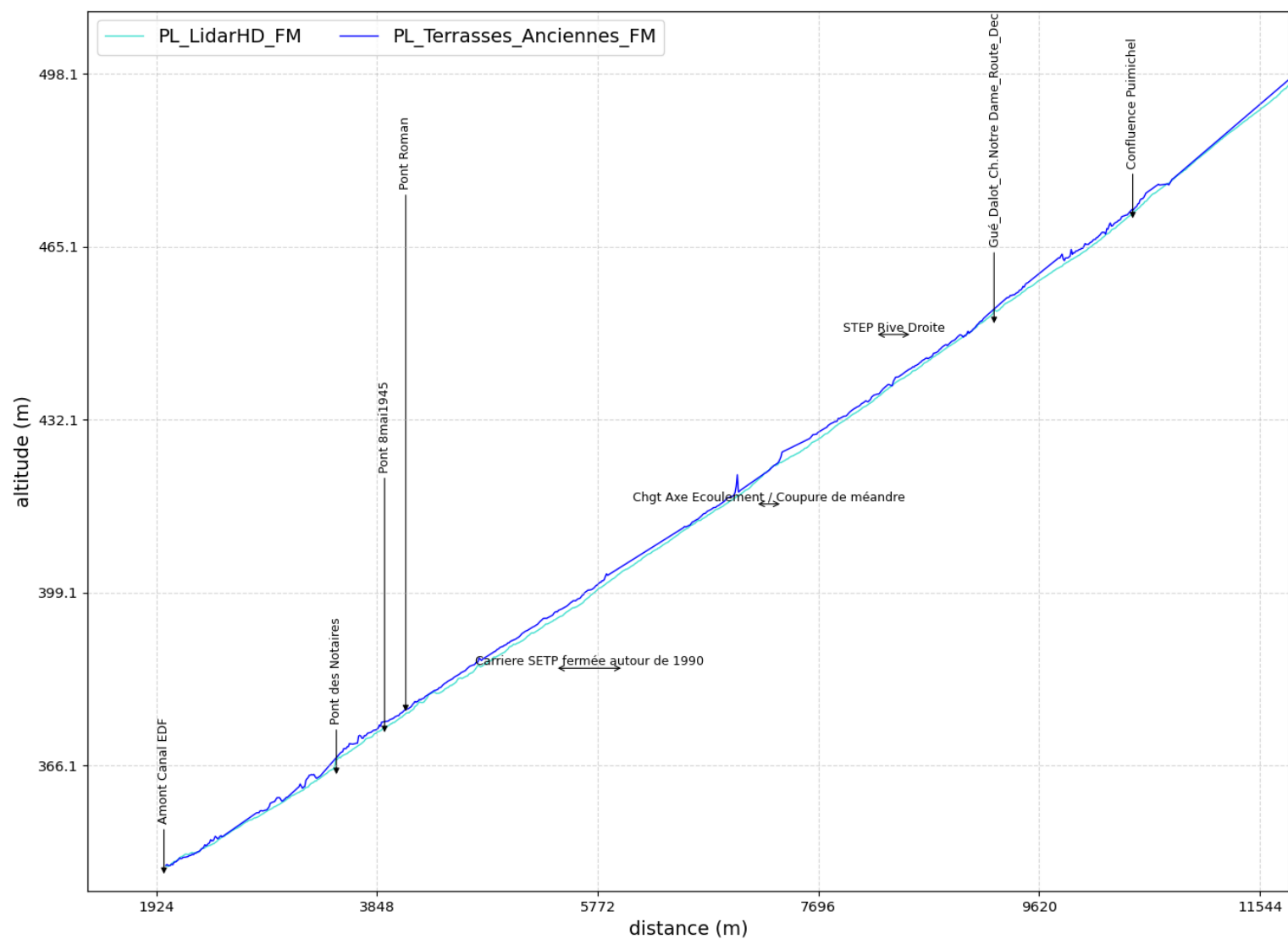


Figure 107 Fonds moyens du chenal actif Lidar HD (2021) et Fonds moyens des « terrasses anciennes » : zoom sur la partie aval

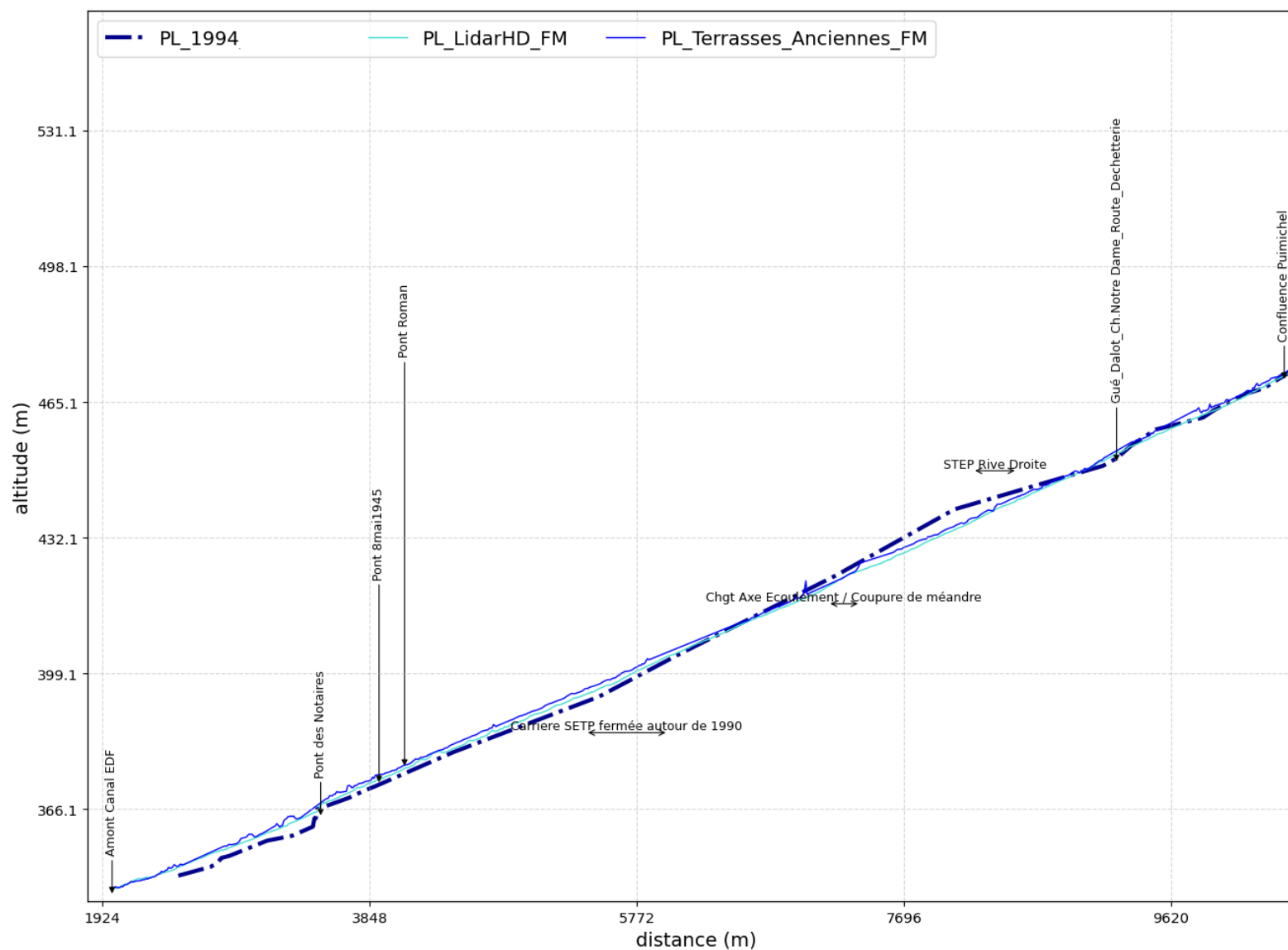


Figure 108 Fonds moyens du chenal actif Lidar HD (2021) et Fonds moyens des « terrasses anciennes » : aval avec ajout du profil 1994

1. Stabilité morphologique du lit mineur sur les périodes récentes (2007–2024)

La comparaison entre les profils de 2007, 2021 et 2024 (Figure 101 et Figure 102) ne révèle pas d'évolution significative du fond du lit mineur. Cette stabilité suggère une absence d'érosion ou de dépôt majeur sur cette période, malgré l'occurrence de certaines crues morphogènes (janvier 2014, novembre 2019) qui ont localement modifié la géométrie du chenal.

En plan, l'analyse transversale du Lidar HD 2021 met également en évidence une relative stabilité de la bande active : l'absence de variations latérales marquées entre les fonds extrêmes et les fonds moyens traduit une dynamique de divagation latérale modérée. Cela confirme un comportement relativement stable, avec une respiration torrentielle peu marquée.

Cette stabilité pourrait être le signe d'un équilibre entre les apports et le transport sédimentaire, compatible avec le régime hydrologique actuel du bassin versant.

2. Singularités du profil de 1994 et incertitudes associées

Le profil de 1994 se distingue nettement des profils plus récents. Deux zones présentent des écarts notables :

- À la sortie de Castellet, en aval du gué de la route de la déchetterie, le profil de 1994 indique une altimétrie anormalement haute, traduisant possiblement un exondement marqué du lit (voir Figure 104). Cette zone est suivie d'une augmentation de la pente pour rejoindre un profil proche de celui de 2024. Cette discontinuité n'est pas retrouvée dans les profils de 2007, 2021 et 2024, ni dans le profil des terrasses anciennes. Même dans ce dernier cas, les altitudes restent plus faibles que celles du profil 1994 (voir Figure 108), ce qui renforce l'hypothèse d'un artefact.
- Dans le secteur d'Oraison, le profil de 1994 semble au contraire indiquer un lit plus bas que celui observé aujourd'hui en lien avec les opérations de curage menées au niveau d'Oraison suite à la crue d'août 1992.

Ces constats posent la question de la fiabilité du profil de 1994. Ce dernier, issu d'un relevé projeté datant de novembre 1993 (donc entre les crues d'août 1992 et janvier 1994), pourrait refléter :

- soit une situation temporaire avec, depuis 1994, un rééquilibrage progressif du lit (transfert de la zone d'engravement amont vers la zone en déficit à l'aval),
- soit un biais méthodologique dans la projection ou la précision du relevé.

3. Apports de l'analyse des terrasses anciennes

L'extraction des terrasses historiques a été menée pour disposer d'un profil de référence ancien, permettant d'évaluer les pentes caractéristiques du cours d'eau. Ce profil montre une forte cohérence morphologique avec les profils récents, en dehors de certaines perturbations locales :

1. Influence des seuils et passages à gué :

À la confluence avec les ravins de Roumeguières et de Saint-Sauveur, le passage à gué associé au seuil modifie localement le profil en long. Une érosion marquée en aval du seuil est visible, avec une perte d'altitude du fond du lit actif (voir Figure 106). Cette perturbation influence le profil sur environ 1 km en aval.

Un phénomène similaire est observé au niveau de la route d'Entrevennes, où le passage à gué et le seuil entraînent également un creusement local du lit en aval, modifiant le profil "historique" sur une longueur comparable.

2. Confluence du Puimichel :

Le profil en long ne présente pas de surhausse notable à l'amont immédiat de la confluence du Puimichel, ce qui suggère une diminution de l'apport sédimentaire de ce tribut au fil du temps. Le chenal principal semble moins influencé par cette confluence qu'il ne pouvait l'être historiquement.

3. Zone de divagation redressée :

Dans le secteur de l'ancienne zone de divagation historique, une réorganisation du tracé du lit s'est opérée avec une coupure de méandre et un redressement du chenal. Cela se traduit par une

augmentation locale de la pente, visible sur le profil du chenal actuel, qui s'écarte temporairement du profil des terrasses anciennes

4. Verrou sédimentaire à Oraison :

Le pont du 8 mai 1945 semble jouer un rôle de verrou sédimentaire, limitant la transitivité des matériaux et provoquant un remous solide à l'amont, se traduisant par une accumulation sédimentaire localisée. Cet effet n'est toutefois pas visible sur le profil en long actuel, du fait des opérations régulières de curage menées en amont de l'ouvrage à l'occasion des crues récentes. En revanche, c'est en aval immédiat du pont des Notaires que l'influence de ce verrou sédimentaire devient plus perceptible, en raison de l'effet combiné de l'ouvrage et du seuil associé, qui contribuent à stabiliser le lit en amont (voir Figure 109c).

Cette comparaison qualitative est complétée par une analyse quantitative, réalisée à l'échelle de chaque tronçon le long de l'axe de projection, en examinant :

- la répartition des pentes entre le profil du fond du chenal actif issu du Lidar HD et celui des anciennes terrasses (voir Figure 109),
- la différence d'altitude entre le profil dit « actuel » et celui des anciennes terrasses (voir Figure 110).

La comparaison des pentes moyennes par tronçon entre le profil actuel (Lidar HD) et le profil issu des terrasses anciennes met en évidence une cohérence morphologique globale entre les deux états du cours d'eau. L'allure générale de la pente est similaire sur l'ensemble du linéaire, traduisant une organisation longitudinale conservée. Toutefois, les pentes issues du Lidar HD apparaissent légèrement plus marquées, en particulier en amont, ce qui peut être interprété comme le reflet d'une dynamique actuelle plus incisive. Cette différence s'explique probablement par une diminution des apports sédimentaires et une réduction de la fréquence des crues morphogènes par rapport au contexte du Petit Âge Glaciaire, période à laquelle sont attribuées les terrasses anciennes.

L'écart d'altitude entre le profil actuel (Lidar HD) et celui des terrasses anciennes suit une logique cohérente avec l'allure des pentes décrite précédemment. Les différences altitudinales sont les plus marquées dans les tronçons amont, où les pentes sont également les plus fortes, traduisant une incision plus prononcée du lit dans les anciennes terrasses. On note toutefois une remontée de cet écart dans le tronçon 2-2, alors même que la pente y diminue par rapport aux tronçons amont. Cette rupture peut s'expliquer par l'influence du passage à gué d'Entrevennes : ce seuil anthropique provoque une érosion accrue du lit à l'aval immédiat, accentuant localement l'incision et donc la différence d'altitude avec le niveau des terrasses anciennes.

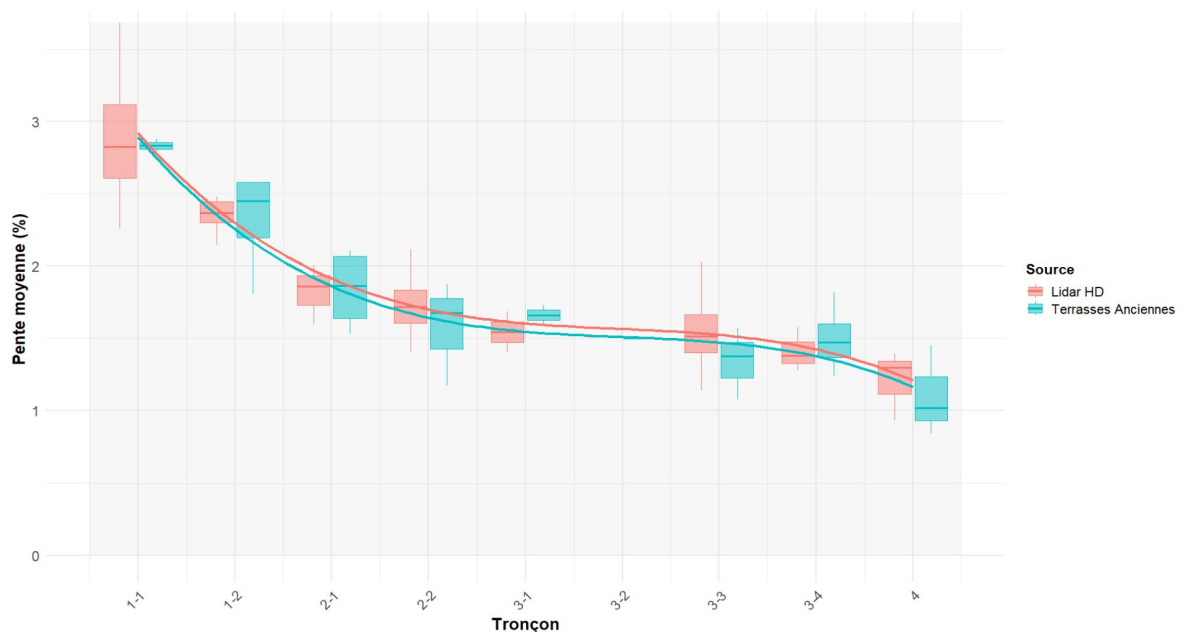


Figure 109 Distribution des pentes par tronçon homogène – Profil en long du chenal actif actuel (fonds moyens) et Profil en long des anciennes terrasses

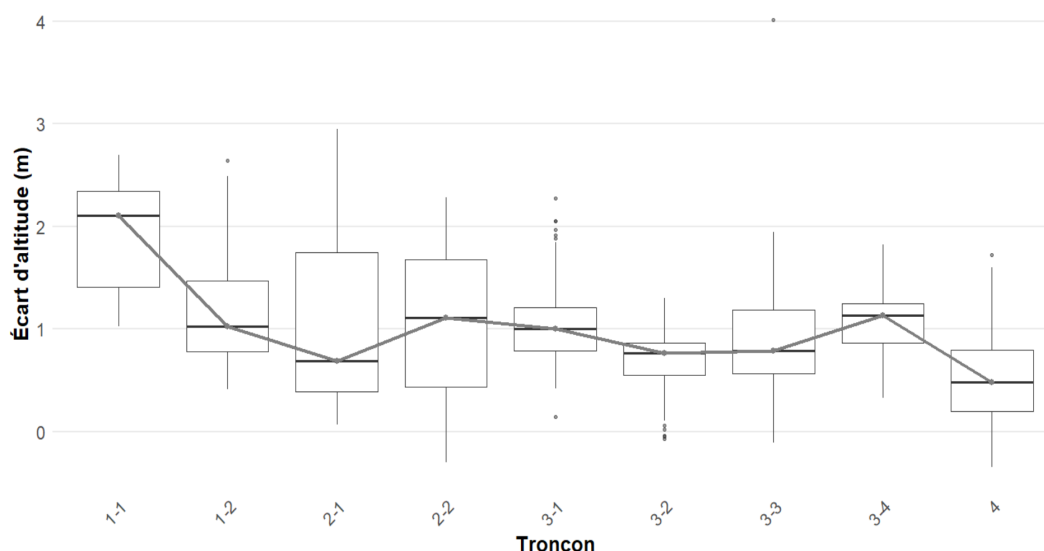


Figure 110 Distribution par tronçon homogène de l'écart d'altitude entre le fonds du chenal actif et les terrasses anciennes

L'analyse diachronique du profil en long du Rancure met en évidence une stabilité globale du lit mineur sur la période récente (2007–2024), malgré quelques ajustements ponctuels liés aux crues morphogènes. Le profil de 1994 se distingue par des anomalies locales (engravement amont, curage aval), qui interrogent sa fiabilité. La comparaison avec les terrasses anciennes confirme une cohérence morphologique générale mais révèle une incision accrue en amont, traduisant une dynamique actuelle plus contrainte par le déficit sédimentaire. Les perturbations principales sont localisées aux seuils, passages à gué et ouvrages d'Oraison, qui modifient ponctuellement le profil.

Enfin, l'analyse de la respiration torrentielle (écart entre l'altitude des points et le fond extrême de chaque profil en travers) permet de compléter ce diagnostic diachronique en quantifiant la variabilité altitudinale intra-tronçon. Le graphique ci-dessous compare cette respiration pour la bande active actuelle et les terrasses anciennes par tronçon de 500 m de long. On y observe des valeurs systématiquement plus élevées pour les terrasses, traduisant une micro-topographie plus marquée, héritée de l'ancien fonctionnement du cours d'eau. Cette analyse renforce l'hypothèse d'une incision du chenal actif dans les formations anciennes, dans un contexte d'atténuation de la dynamique morphogène.

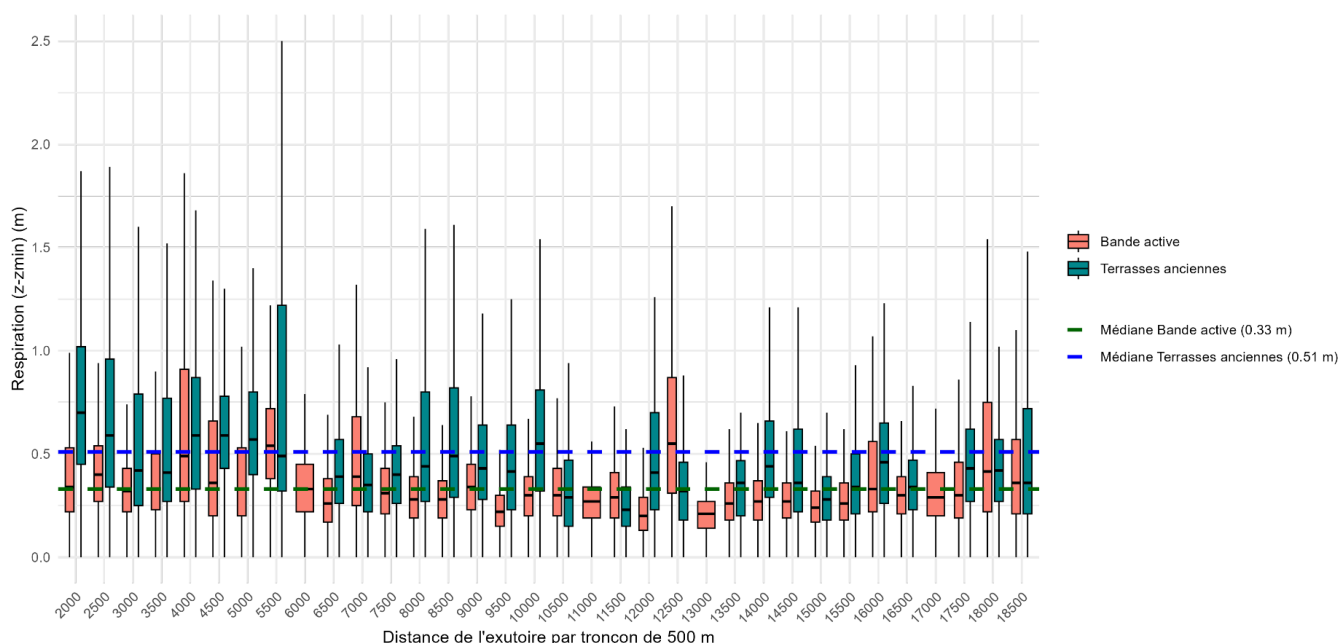


Figure 111 Distribution de la respiration torrentielle (Z - Zmin) par tronçon de 500 m le long du Rancure. : bande active (en rose) et les terrasses anciennes (en bleu-vert).

Analyse diachronique du profil en long du Puimichel

L'analyse des profils en long du Puimichel repose sur la comparaison de plusieurs relevés récents 2007, 2021, 2024 (le profil 1994 n'étant pas disponible pour cet affluent) mais également d'un profil morphologique extrait des terrasses anciennes sur la partie aval du cours d'eau. Cette dernière extraction a été réalisée, comme pour le Rancure, afin d'évaluer les valeurs de pentes caractéristiques du cours d'eau.

La comparaison des profils en long du Puimichel (Figure 112 à Figure 115) met en évidence plusieurs enseignements quant à l'évolution récente du lit mineur et aux héritages morphologiques plus anciens.

1. Stabilité relative du profil récent (2021–2024)

La confrontation des profils de 2021 et 2024 montre une stabilité générale du lit mineur, sans modification marquée du fond du chenal sur la majorité du linéaire. L'exception concerne le secteur aval, en amont immédiat du passage à gué de la RD101, où des opérations de curage (2023) et de reprofilage du lit ont été conduites. Ce tronçon est connu pour sa propension aux dépôts récurrents de matériaux grossiers, ce qui explique la nécessité d'interventions régulières. La morphologie actuelle traduit donc davantage un état d'entretien qu'une évolution naturelle du cours d'eau.

2. Dynamique d'engrèvement en aval sur la période 2007–2024

La comparaison entre 2007 et 2024 révèle un engrèvement du chenal en amont du passage à gué de la RD101, engrèvement qui se prolonge jusqu'à la zone de débordement/divagation plus en amont, caractérisée par des débordements fréquents sur la RD12. Ce rehaussement progressif du fond traduit une accumulation sédimentaire durable sur ce tronçon, confirmant le rôle de zone de dépôt préférentiel du Puimichel dans ce secteur.

3. Lecture croisée avec les terrasses anciennes

La confrontation avec le profil issu des terrasses anciennes apporte des éléments complémentaires. Sur le secteur en amont du gué de la RD101, le lit mineur actuel ne présente pas d'affaissement particulier : son altitude moyenne reste cohérente avec les niveaux hérités. En revanche, plus en amont, notamment dans les secteurs des confluences avec les ravins des Maucues et des Bronzets, le chenal actif apparaît incisé au sein des terrasses. Ce creusement est d'autant plus marqué que la charge sédimentaire grossière est moins abondante dans cette partie amont, accentuant les processus d'incision locale.

4. Évolutions morphologiques héritées et accentuation des pentes

Enfin, la comparaison avec la bande active historique (orthophotographie 1950–1965) illustre le changement de tracé du lit identifié lors de l'analyse en plan. On observe une augmentation de la pente longitudinale, liée à la coupure d'un ancien méandre et au redressement du tracé. Ce « shunt » de méandre s'est traduit par une accentuation locale de la pente, qui se superpose aux effets d'incision mis en évidence plus en amont.

En synthèse, l'évolution diachronique du Puimichel révèle un cours d'eau globalement stable sur les deux dernières décennies, mais marqué par une dynamique contrastée : engrèvement localisé dans le tronçon aval soumis aux dépôts et aux opérations d'entretien, et incision plus marquée en amont, notamment au droit des confluences avec les affluents latéraux.

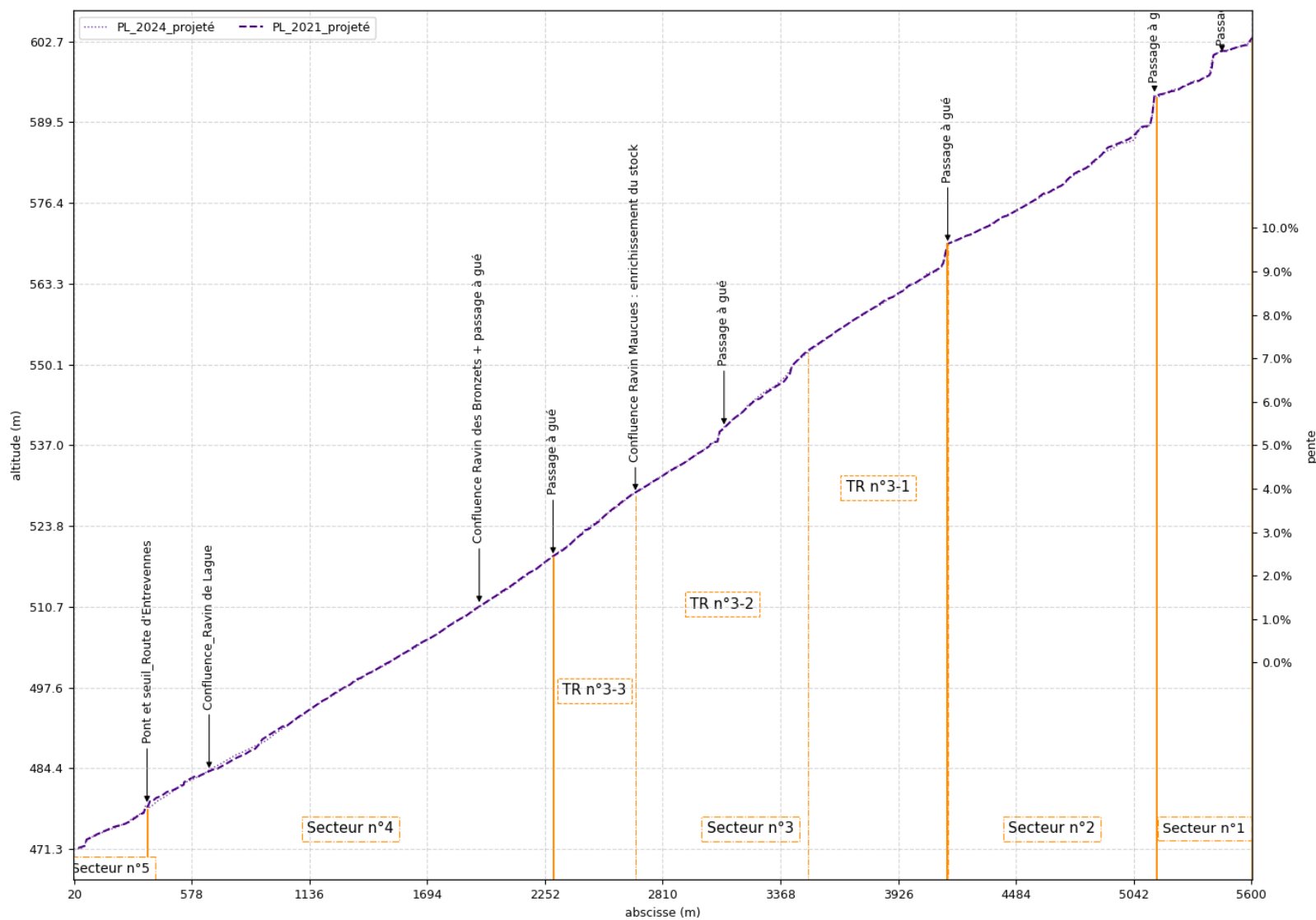


Figure 112 Profils en long du Puimichel : comparaison FE 2024/2021

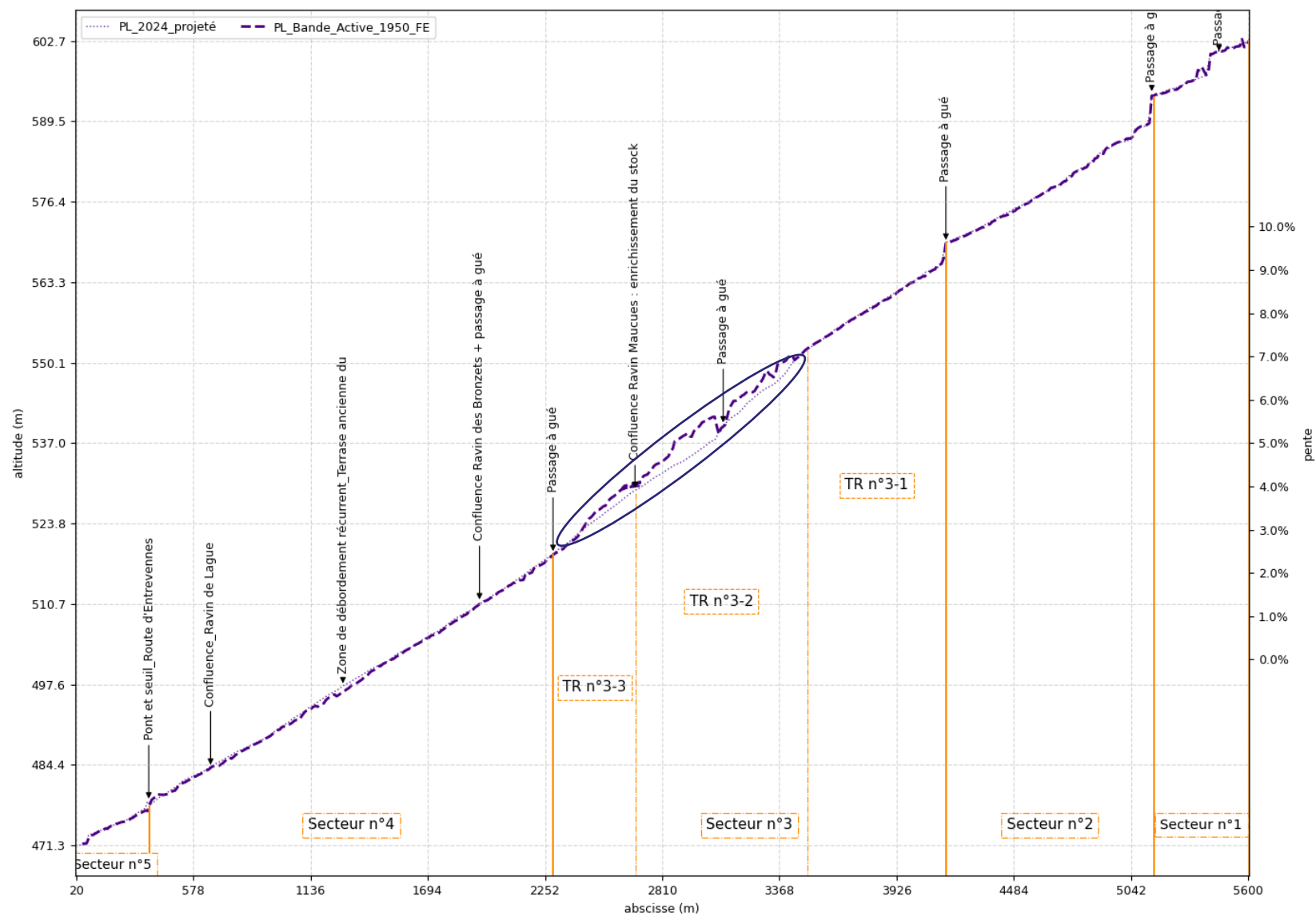


Figure 113 Profils en long du Puimichel : comparaison FE 2024/BA_1950/65

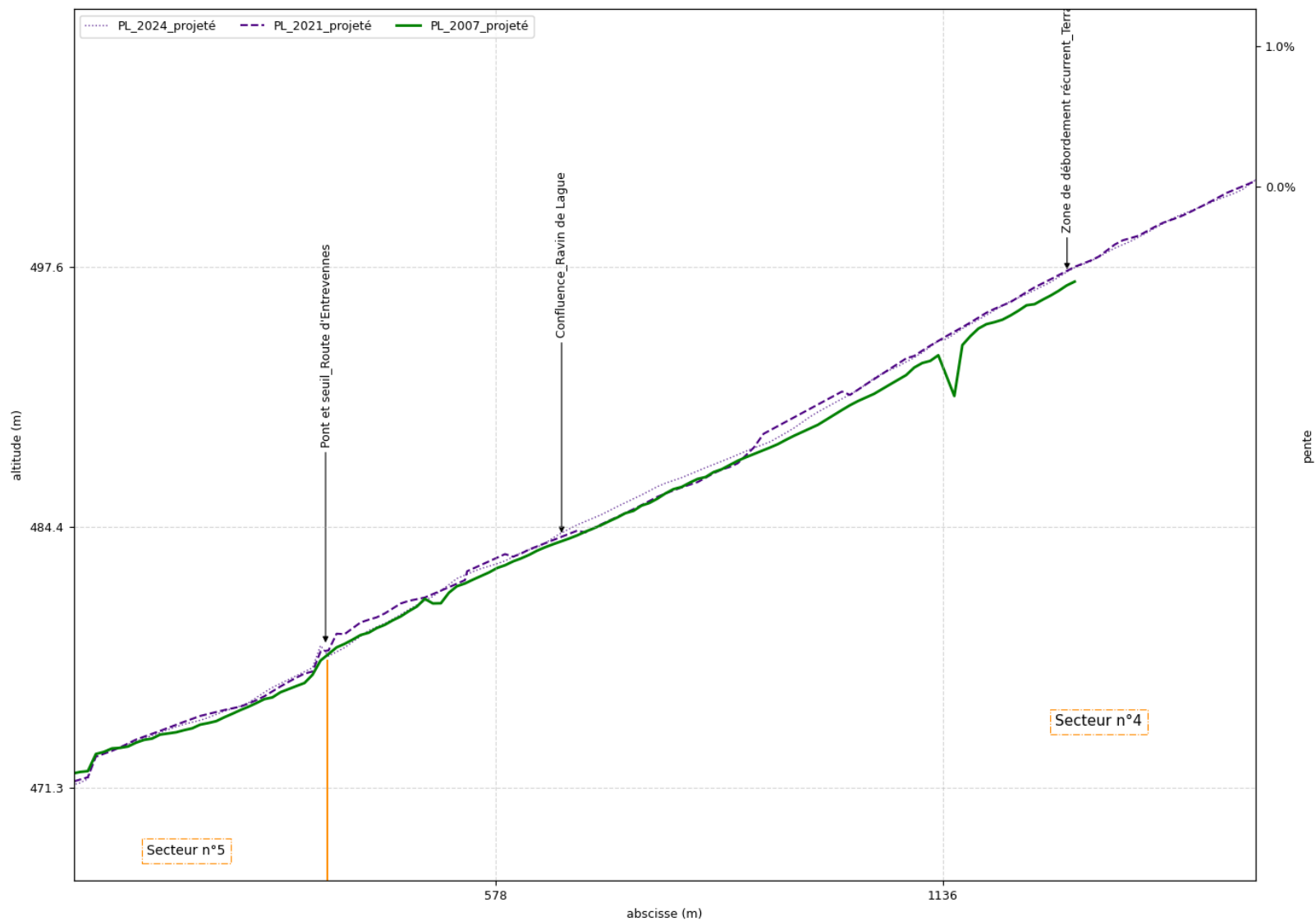


Figure 114 Profils en long du Puimichel : comparaison FE 2024/2021/2007 (zone aval)

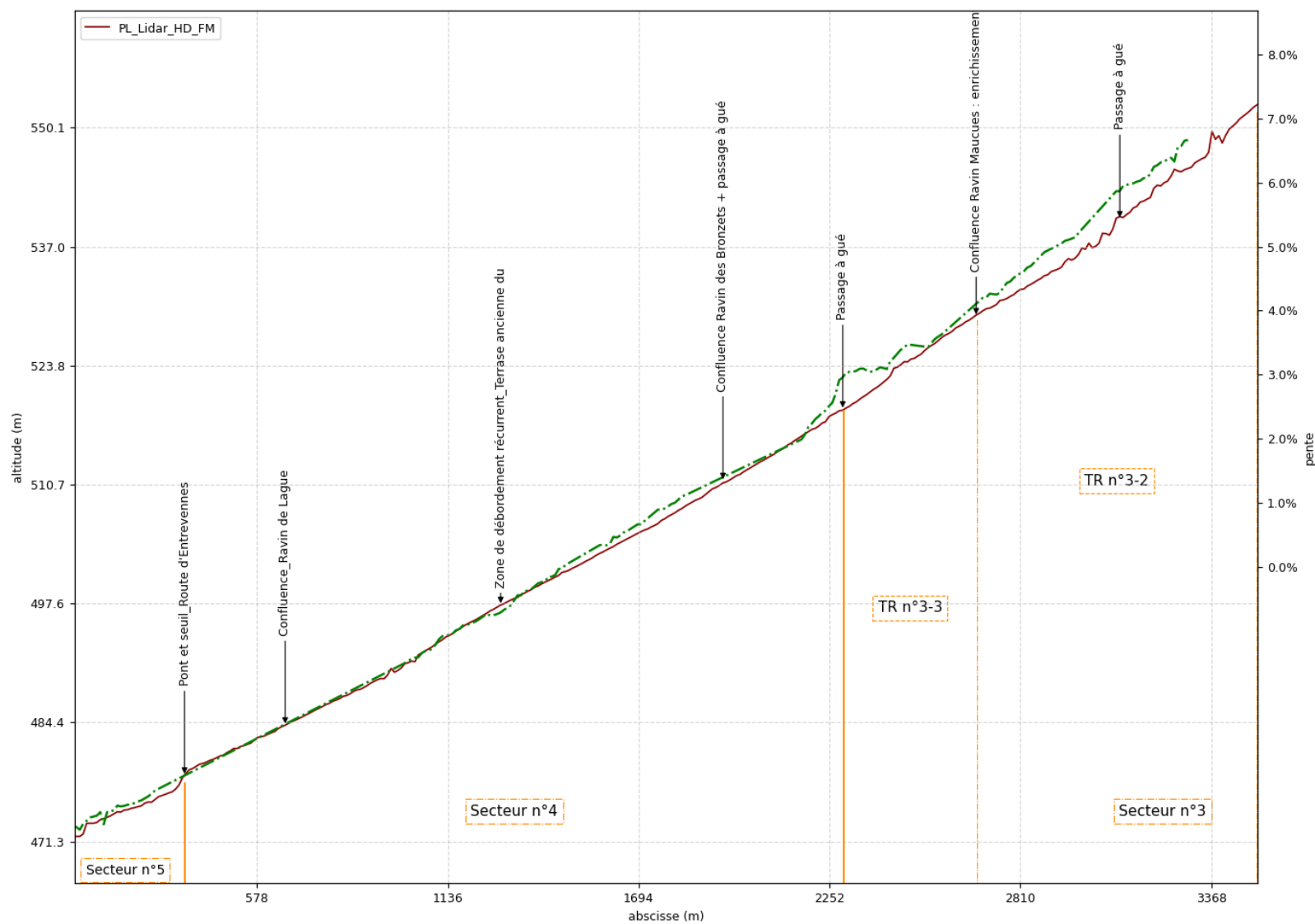


Figure 115 Profils en long du Puimichel : comparaison FM Lidar_HD/Terrasses anciennes

3.2.5 Synthèse de l'analyse trajectorielle historique

L'analyse de la trajectoire historique du Rancure révèle une évolution marquée depuis le milieu du XXe siècle, sous l'influence combinée de forçages climatiques et anthropiques. La fin du Petit Âge Glaciaire (vers 1850) a initié une tendance de fond à la réduction des apports sédimentaires, accentuée par une augmentation significative du couvert forestier sur le bassin versant ("fermeture des paysages") qui limite l'érosion des versants. À cela se sont ajoutées de fortes pressions humaines, notamment le développement agricole, l'urbanisation progressive autour d'Oraison et la construction d'infrastructures comme le canal EDF, qui ont contribué à contraindre et "corseter" le lit du cours d'eau.

Les conséquences morphologiques de ces forçages sont doubles. D'une part, on observe un resserrement généralisé de la bande active sur l'ensemble du linéaire, témoignant d'une réduction de la mobilité latérale du cours d'eau. D'autre part, la comparaison des profils en long actuels avec les terrasses anciennes révèle une tendance à l'incision verticale du lit, particulièrement visible en amont, bien que le profil récent (2007-2024) montre une relative stabilité. Cette évolution est ponctuée par des perturbations locales liées aux ouvrages transversaux (seuils, passages à gué) qui modifient l'équilibre du profil en long.

3.3 Analyse fonctionnelle actuelle

3.3.1 Évaluation de la source/recharge sédimentaire

L'évaluation de la recharge sédimentaire du Rancure et de ses affluents est une étape essentielle pour comprendre son fonctionnement dynamique actuel. Cette recharge est constituée des **apports solides externes**, provenant des versants et des affluents, et des **apports solides internes**, issus de l'érosion des berges et de la remobilisation du stock alluvial déjà présent dans le lit.

3.3.1.1 Apports solides externes : une production dominée par les matériaux fins

L'analyse géomorphologique du bassin versant, présentée au paragraphe 2.3.3, met en évidence un point fondamental pour le fonctionnement hydrosédimentaire du Rancure : l'absence de zones d'érosion actives sur les versants qui fourniraient une charge grossière significative au cours d'eau.

Les secteurs d'érosion active identifiés, notamment au lieu-dit Ajonc ou au-dessus d'Entrevennes, se situent majoritairement dans des formations marneuses, en particulier les marnes rouges d'Ajonc. Ces formations, bien que facilement érodables, contribuent principalement à l'apport de matériaux fins (argiles, limons, sables fins) qui transitent majoritairement en suspension dans la colonne d'eau. Ces apports participent peu à la construction des lits des cours d'eau.

Cette configuration, où les apports externes grossiers sont très limités, explique pourquoi les formules empiriques de quantification de la production sédimentaire développées pour des bassins avec des sources d'érosion grossières actives ([38]) ne sont pas applicables ici.

Les affluents du Rancure, comme le Puimichel, drainent des formations géologiques similaires (conglomérats de Valensole et marnes). Par conséquent, leurs apports solides externes suivent la même logique : une contribution majoritaire en matériaux fins issus de l'érosion des niveaux marneux, et une contribution plus limitée en éléments grossiers.

3.3.1.2 Apports solides internes : le remaniement du stock alluvial comme source principale de matériaux grossiers

En l'absence d'alimentation externe significative en matériaux grossiers, la dynamique du Rancure est principalement conditionnée par ses apports internes. Ceux-ci proviennent de deux sources principales :

1. **L'érosion des berges** : L'érosion latérale, bien que modérée, constitue une source de matériaux. Des zones d'érosion sont observées localement, comme au niveau du gué

d'Entrevennes. Les matériaux ainsi mobilisés proviennent directement du remaniement des formations en place, qu'il s'agisse des conglomérats de Valensole ou des niveaux marneux intercalés. Cette source contribue donc à la fois à la charge fine et à la charge grossière, en fonction de la lithologie de la berge érodée.

2. Le remaniement du stock alluvial : C'est la source principale de recharge en matériaux grossiers (galets) pour le Rancure. Le stock alluvial actuel, constitué des alluvions récentes et des dépôts plus anciens comme les cônes de déjection ou les colluvions, est directement issu du démantèlement des conglomérats de Valensole. Les crues morphogènes remobilisent ces matériaux déjà présents dans le lit mineur et les berges, assurant ainsi le transit sédimentaire et le maintien des formes fluviales.

En synthèse, la recharge sédimentaire du bassin versant du Rancure est caractérisée par :

- Des **apports externes limités** en charge grossière, mais fournissant des matériaux fins issus de l'érosion des formations marneuses.
- Des **apports internes qui constituent la source prépondérante de matériaux grossiers**, via le remaniement du stock alluvial hérité de l'érosion des conglomérats de Valensole.

Ce fonctionnement, où le cours d'eau "travaille" principalement sur son propre stock sédimentaire hérité plutôt que sur des apports externes continus, est un élément clé de sa trajectoire géomorphologique.

3.3.2 Granulométrie

3.3.2.1 Objectifs et enjeux

L'analyse granulométrique a pour objectif de caractériser la distribution des tailles de sédiments constituant le lit actif du Rancure. Cette information est essentielle, notamment, pour comprendre les processus de transport solide et de dépôt, quantifier les seuils de mobilisation des matériaux lors des crues et fournir des paramètres d'entrée pour les analyses hydrauliques et de transport solide.

Deux approches complémentaires ont été utilisées :

- des comptages manuels par la méthode Wolman ;
- une analyse d'images automatisée via le logiciel Basegrain.

3.3.2.2 Méthodologie

Comptages Wolman

Deux sites ont fait l'objet d'un comptage type Wolman : passage à gué de la route de la déchetterie et à l'aval du Rancure en amont du passage sous le canal EDF (voir Figure 116).

Sur chaque site, 5 profils transversaux espacés de quelques mètres ont été échantillonnés [39].

Pour chaque profil, les particules rencontrées sous une règle posée perpendiculairement à l'écoulement ont été classées dans 9 classes granulométriques logarithmiques : <2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm, 16–32 mm, 32–64 mm, 64–128 mm, 128–256 mm et 256–512 mm.

À partir des distributions cumulées, les diamètres caractéristiques suivants ont été calculés :

- D16 : taille sous laquelle 16 % des grains sont plus fins,
- D50 : diamètre médian,
- D84 : taille caractéristique des matériaux grossiers mobilisables lors des crues morphogènes,
- D90 : taille représentative des blocs dominants.

Analyse d'images automatisée — Basegrain

En complément des relevés de terrain, des analyses d'images ont été réalisées via le logiciel Basegrain développé par Detert & Weitbrecht ([40], [41]) : voir Figure 116.

Cet outil, basé sur MATLAB, utilise un algorithme de détection automatique des grains à partir de photographies verticales haute résolution.

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

Le traitement suit cinq étapes principales :

- Détection des interstices entre les grains via des seuils de gris multi-niveaux,
- Filtrage morphologique des images pour réduire le bruit,
- Détection des contours des grains (algorithmes de Sobel et Canny),
- Segmentation des grains par algorithme de watershed optimisé,
- Calcul du diamètre caractéristique à partir de l'axe b des ellipses ajustées.

Les résultats sont exportés sous forme de distributions granulométriques comparables à celles issues des méthodes classiques (Wolman, Fehr).

● **Analyse Image**

● **Wolman et Analyse Image**

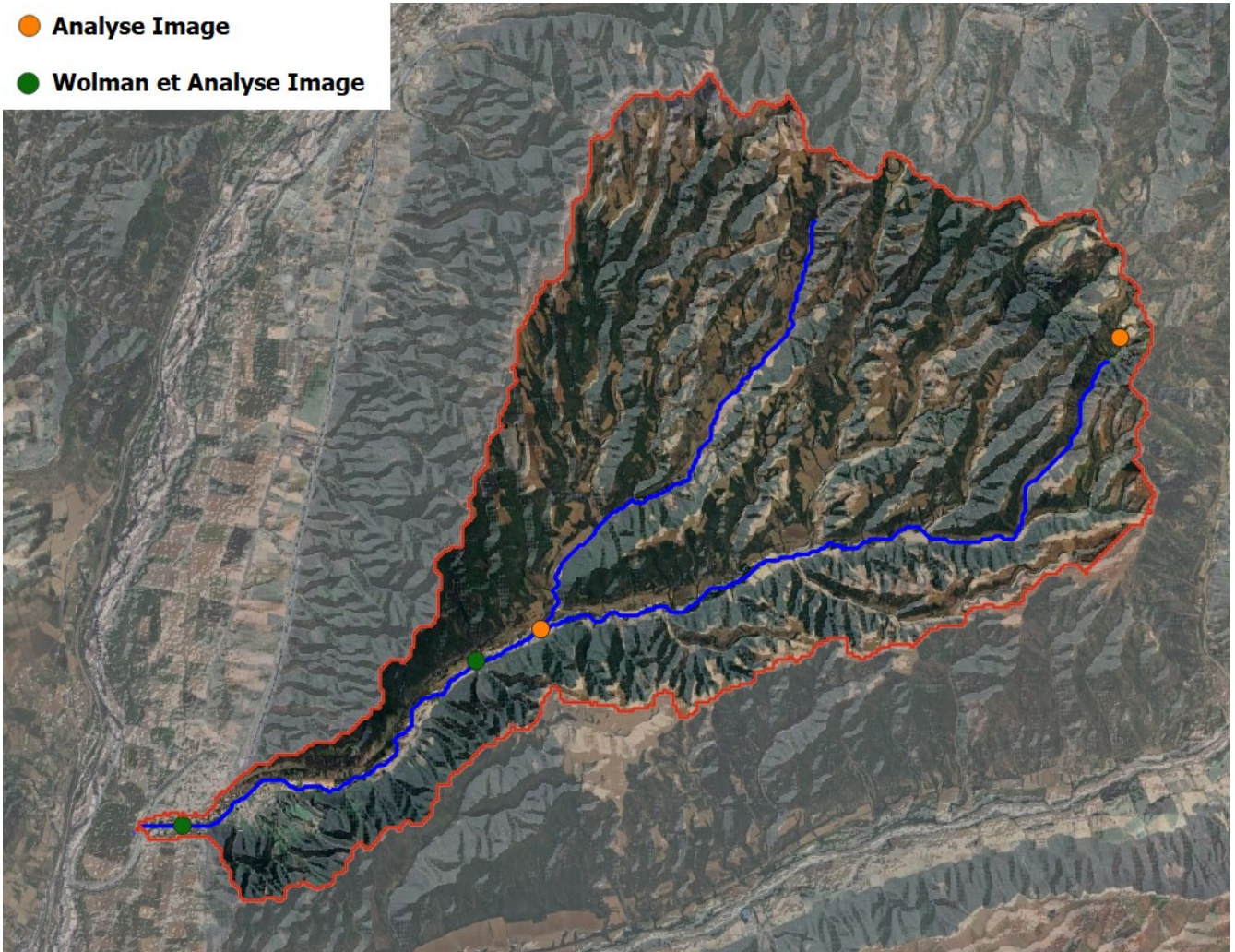


Figure 116 Bassin versant du Rancure : zones d'analyse d'images et points de relevés granulométriques (méthode Wolman)

3.3.2.1 Résultats

Comptages Wolman

Le Tableau 25 présente les résultats issus de deux comptages type Wolman.

Site	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	D90 (mm)	Fraction >64 mm
Oraison aval	12,9	25,0	48,4	55,6	3,0 %
Gué déchetterie	12,2	25,0	49,7	56,3	3,0 %

Tableau 25 Paramètres granulométriques dérivés des courbes cumulées issues des comptages Wolman (D16, D50, D84, D90) et proportion de matériaux grossiers (>64 mm).

La distribution granulométrique est homogène entre les deux stations, avec un D50 autour de 25 mm. Les lits sont dominés par des graviers moyens à grossiers (8–64 mm). La fraction de blocs (>64 mm) reste faible (<5%), suggérant une mobilisation potentiellement forte du lit lors des crues significatives.

Analyse Basegrain

Le Tableau 26 présente les résultats issus de l'analyse Basegrain.

Site	D10 (mm)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	D90 (mm)
Oraison aval	12,4	13,9	18,9	39,2	43,6
Gué déchetterie	12,5	14,2	19,9	40,1	45,4
Rancure aval – confluence Puimichel	12,5	14,2	19,6	37,5	42,6
Rancure amont	13,0	15,2	22,5	49,2	57,5

Tableau 26 Diamètres granulométriques caractéristiques (D10, D16, D50, D84, D90) obtenus à partir des analyses d'images via le logiciel Basegrain sur les quatre sites étudiés.

Basegrain confirme les « tendances » des relevés Wolman. Les secteurs amont présentent des matériaux légèrement plus grossiers (D50 $\approx$ 22,5 mm), ce qui peut refléter une légère transition sédimentaire amont-aval.

La comparaison entre la méthode de comptage manuel (Wolman) et l'analyse d'images (Basegrain) met toutefois en évidence des écarts systématiques :

- D50 (diamètre médian) : Wolman $\approx$ 25 mm, Basegrain $\approx$ 19 mm (sous-estimation de 20 à 25 % par Basegrain).
- Fractions grossières (D84, D90) : Basegrain sous-estime les valeurs (D84 : 39–40 mm contre 48–50 mm en Wolman ; D90 : 44–45 mm contre 56 mm). Ce biais est lié en partie à la segmentation des gros éléments en particules plus petites (malgré la correction « manuelle » apporté lors de chaque traitement).
- Fractions fines (D16) : valeurs proches entre méthodes, avec une légère surestimation par Basegrain.

Les ratios D84/D50 sont proches de 2 pour les deux méthodes, ce qui correspond aux valeurs de référence observées dans les rivières à graviers ([42]). Cela confirme la cohérence générale des distributions, mais souligne que Basegrain sous-estime systématiquement les fractions grossières.

Les résultats obtenus sur le Rancure avec les mesures Wolman sont cohérents avec ceux issus de l'étude granulométrique du torrent de Saint-Jeannet ([9]), situé dans les mêmes formations géologiques. Dans cette étude, le D50 mesuré sur le torrent de Saint-Jeannet est de l'ordre de 27,7 mm et le D84 avoisine 45 mm, des valeurs proches des gammes observées sur la Rancure (D50 $\approx$ 25 mm et D84 $\approx$ 49 mm).

Les mesures Wolman apparaissent plus fiables et représentatives pour le Rancure. Basegrain peut être utilisé comme outil complémentaire, mais ses limites sur les queues de distribution (grossiers, fins) doivent être prises en compte. Pour les calculs menés par la suite, **les valeurs de référence adoptées sont un D50 de 25 mm et un D84 de 49 mm.**

3.3.3 Evaluation du transport solide

Après avoir caractérisé la granulométrie du lit et identifié les principales sources d'alimentation sédimentaire du Rancure, il est possible d'évaluer la capacité de transport solide du Rancure et du Puimichel. Cette étape permet de confronter les potentialités de mobilisation des matériaux observés à la dynamique hydraulique des crues, et d'identifier les secteurs les plus propices au transit ou au stockage des sédiments.

3.3.3.1 Objectifs et données mobilisées

L'évaluation du transport solide sur le bassin versant du Rancure a pour objectif de mieux cerner les volumes de matériaux susceptibles d'être mobilisés et redistribués lors des crues. L'approche repose sur la combinaison de profils représentatifs par tronçon, de la granulométrie de référence déterminée sur le bassin, et des hydrogrammes issus des scénarios hydrologiques retenus.

L'analyse porte plus spécifiquement sur deux événements :

- la crue de novembre 2019, considérée comme représentative d'une période de retour voisine du décennal,
- la crue issue de l'analyse pluviométrique bivariée de période centennale.

Les sections représentatives ont été construites à partir de transects perpendiculaires à l'axe de projection, intersectés avec le chenal actif (largeur active) et l'espace de divagation/corridor alluvial (lit fixe en rive gauche et droite) afin de calculer les largeurs médianes. Ces informations ont été complétées par les hauteurs de berge (lit actif et espace de divagation) et les pentes locales du chenal actif, de manière à caractériser la morphologie transversale de chaque secteur. Chaque tronçon « homogène » a ainsi été défini par une section médiane, exportée dans l'outil BedloadWeb [43]. Les calculs se basent sur les valeurs granulométriques retenues précédemment ($D_{50} = 25$ mm et $D_{84} = 49$ mm) et sur les hydrogrammes associés à la crue de 2019 et à l'événement centennal issu de l'analyse bivariée des pluies.

Le découpage en tronçons « homogènes » (voir Figure 118 pour le Rancure et Figure 119 pour le Puimichel) a été établi à partir de plusieurs critères complémentaires. Les ruptures observées sur le profil en long et dans l'analyse diachronique de la morphologie ont permis de définir des limites naturelles correspondant notamment à des changements de pente. Ces éléments ont été croisés avec les « clusters » hydromorphologiques identifiés lors de l'analyse hydraulique (cf. paragraphe 4.1.2), qui distinguent des secteurs présentant des comportements contrastés vis-à-vis des écoulements et des débordements.

À ces tronçons s'ajoute, pour le Rancure, un secteur singulier situé en amont du gué d'Entrevennes, où le lit s'élargit nettement et où l'on observe l'une des rares zones d'alimentation externe en matériaux grossiers. Ce talus de rive gauche, instable, est en effet susceptible de fournir des matériaux fins mais également éléments grossiers en cas de déstabilisation (voir Figure 117).



Figure 117 Secteur singulier en amont du gué d'Entrevennes. À gauche : affleurement de la formation des poudingues de Valensole montrant une succession de couches meubles susceptibles d'alimenter le lit en cas de déstabilisation du talus. À droite : vue du lit élargi au niveau du gué.

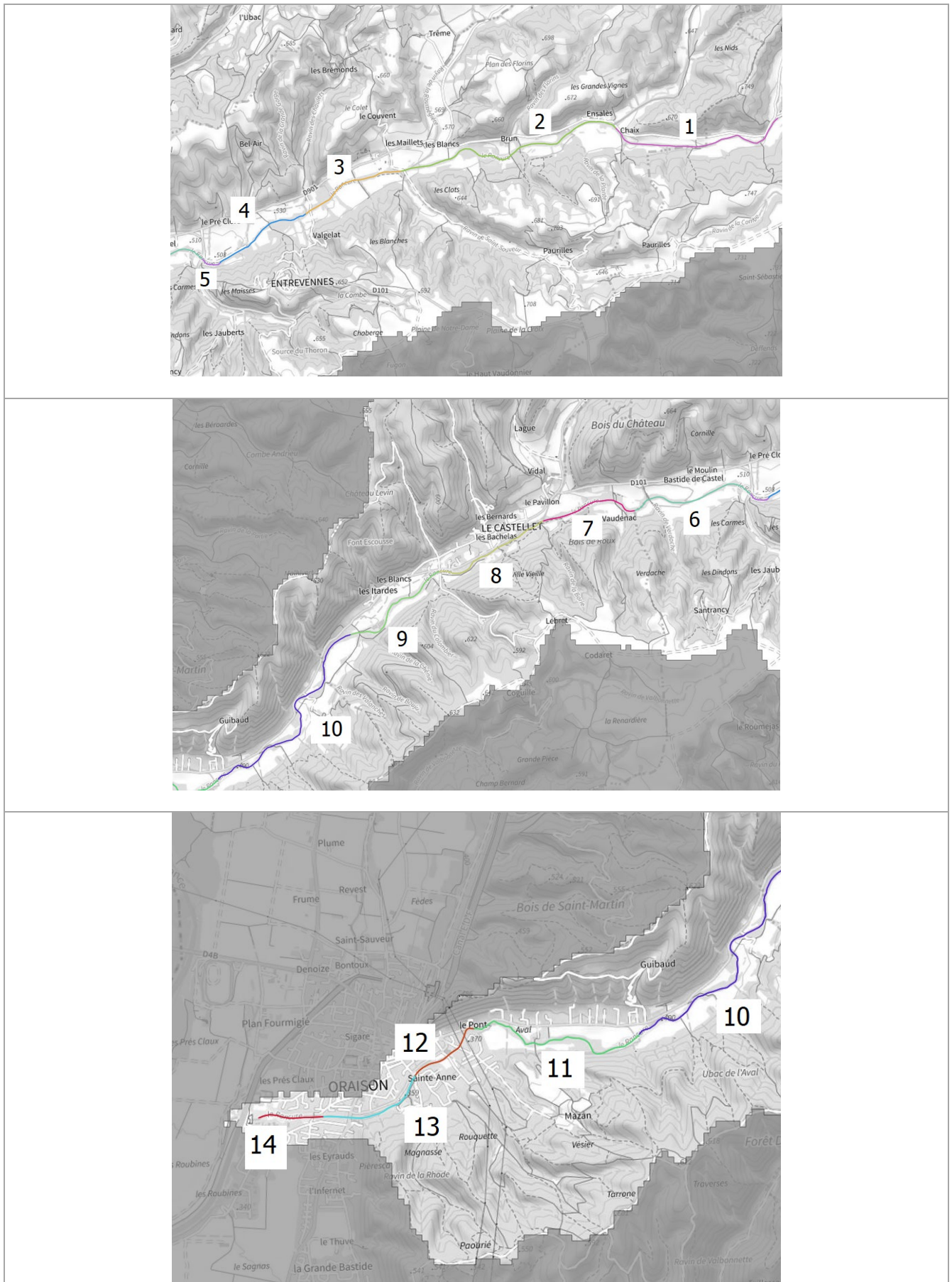


Figure 118 Localisation des tronçons retenus pour l'évaluation du transport solide sur le Rancure.

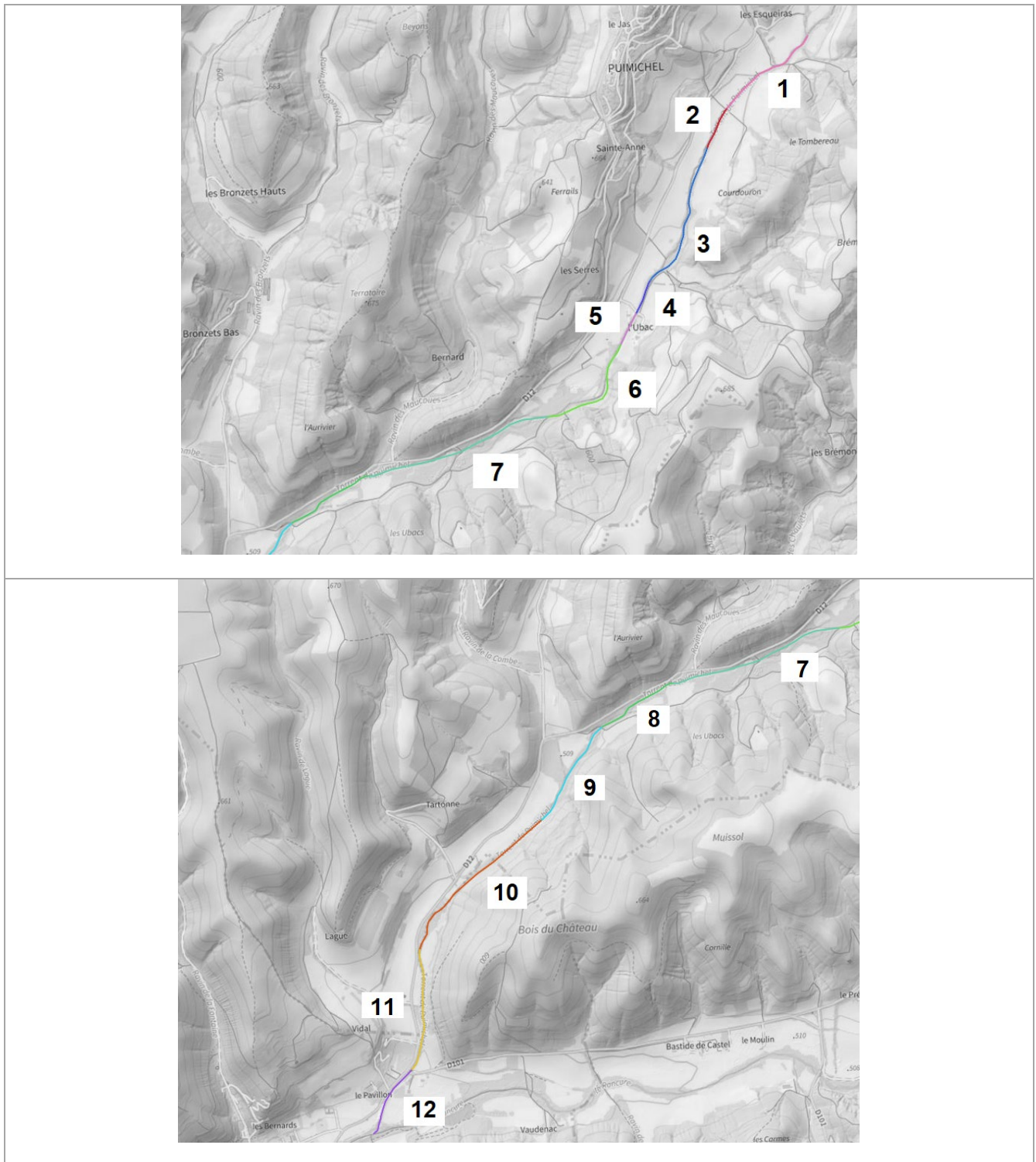


Figure 119 Localisation des tronçons retenus pour l'évaluation du transport solide sur le Puimichel.

3.3.3.2 Méthode de calcul et principe d'interprétation

Les simulations ont été réalisées avec BedloadWeb ([43]), en utilisant la formule de Recking (2013) [44], adaptée aux conditions observées sur le Rancure et le Puimichel. Cette équation, fondée sur le D84, permet d'estimer une capacité maximale potentielle de transport de fond à partir de la pente, de la granulométrie et de la géométrie active. Les résultats sont fournis en volumes réels et apparents, mais ce sont ces derniers qui ont été privilégiés, car ils sont directement comparables aux dépôts observables sur le terrain.

Afin d'identifier les secteurs les plus sensibles, les volumes apparents ont été différenciés entre sections successives. **Les différences positives ont été affectées à la section aval, ce qui permet de repérer**

les zones de tendance accumulative. Cette approche donne une lecture longitudinale du fonctionnement du cours d'eau en termes de transit et de stockage.

3.3.3.3 Limites et incertitudes de l'exercice

De manière générale, les équations de transport solide reposent sur des hypothèses simplificatrices et possèdent un domaine de validité restreint qui limite leur application. Elles sont le plus souvent calibrées pour des sections alluviales relativement libres de contraintes et s'avèrent donc mal adaptées aux tronçons très encaissés, aux gorges ou aux secteurs fortement aménagés. Dans le cas d'écoulements torrentiels, caractérisés par des pentes supérieures à 5 % et par des lits grossiers fortement armurés, la plupart des formules empiriques sortent de leur domaine de pertinence, car elles ne prennent pas en compte les effets de masquage et d'exposition. Pour le Rancure, les conditions locales de pente et de granulométrie se situent globalement dans l'intervalle de validité de ces équations, ce qui justifie leur usage. Toutefois, cette adéquation apparente ne dispense pas d'une lecture prudente des résultats. Dans le cas du Puimichel, l'évaluation n'a été menée que sur les tronçons présentant une dynamique clairement alluviale et une alimentation suffisante en matériaux grossiers, soit les tronçons 8 à 11 (en aval de la confluence avec le Maucues : Figure 119). En amont de ce point (tronçons 1 à 7), le lit ne présente pas une richesse suffisante en matériaux grossiers pour justifier l'application des équations de transport solide. En aval, le tronçon 12 n'a pas été considéré en raison de l'influence majeure du passage busé et du pont de la RD101, qui bloquent l'essentiel du charriage et s'accompagnent d'une absence de lit actif immédiatement en aval.

Outre l'incertitude liée aux équations de transport solide elles-mêmes, cette évaluation comporte un certain nombre de limites qui en conditionnent la portée. Les données d'entrée sont entachées d'incertitudes : la granulométrie est variable dans l'espace et dans le temps, la pente est lissée à l'échelle des tronçons et les profils LiDAR peuvent manquer de précision dans les zones végétalisées ou en eau. Les sections médianes ne traduisent qu'un état moyen, susceptible de masquer des hétérogénéités locales parfois importantes.

Par ailleurs, les calculs fournissent une capacité maximale de transport, qui suppose une alimentation sédimentaire suffisante. En contexte de déficit, les volumes réalisés seront inférieurs, et le risque d'incision demeure. L'approche considère en outre un fond fixe : elle ne prend pas en compte les rétroactions morphologiques, les avulsions, ni les ouvrages.

Ces limites invitent à considérer les résultats comme des ordres de grandeur et des tendances.

3.3.3.4 Résultats et interprétation

La Figure 120 et la Figure 121 synthétisent les résultats pour le Rancure : la première compare, par section, les volumes apparents transportés pour les scénarios 2019 (AMC2) et bivarié P100 ; la seconde représente les Δ -volumes positifs ($i \rightarrow i+1$) affectés à la section aval, révélant les secteurs de dépôt préférentiel.

Pour la crue de 2019 (AMC2), les résultats mettent en évidence plusieurs tronçons jouant le rôle de zones de dépôt préférentiel. L'événement, bien que d'ampleur limitée, apparaît déjà morphogène et cohérent avec les débordements observés sur le terrain. Pour la crue issue de l'analyse bivariée des pluies de période centennale, les volumes calculés sont nettement supérieurs, avec des pics marqués dans certains tronçons qui traduisent une capacité de dépôt et d'engrèvement beaucoup plus forte. L'analyse longitudinale souligne l'alternance de secteurs à transit dominant et de zones d'accumulation massive.

Par tronçon, plusieurs secteurs se distinguent. Le tronçon 4, situé en amont du gué de la route d'Entrevennes au droit de la distillerie, correspond à un lit aggradé (lit en "toit") dans la classification hydromorphologique issue de l'analyse hydraulique (cf. paragraphe 4.1.2) : la capacité de transport y est nettement inférieure à celle des tronçons amont et aval, la propension au dépôt (matériaux mais aussi flottants) est élevée et des débordements surviennent dès de faibles périodes de retour. Ce diagnostic rejoint les informations historiques ; pour la crue de janvier 1994, il est rapporté que « *la distillerie des Blancs est restée quasiment inaccessible ; les terres agricoles ont été inondées, notamment là où le cours d'eau a momentanément changé de lit aux abords de la distillerie et sur les parcelles en aval* ».

En regard, le tronçon 2 présente également une tendance au dépôt, mais d'intensité moindre ; sa capacité de transport augmente avec le niveau sollicité. Un autre secteur préférentiel de dépôt est le tronçon 7, immédiatement en amont de la confluence avec le Puimichel : l'adoucissement de la pente

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

à l'approche de la confluence favorise l'élargissement du chenal et l'engravement. Enfin, le tronçon 12, à l'entrée d'Oraison, confirme une propension au dépôt : le pont du Vésier y joue le rôle de verrou hydraulique, induisant des accumulations récurrentes au droit de l'ouvrage. Cette lecture spatiale est cohérente avec les volumes apparents simulés et précise l'articulation entre transit dominant et zones de stockage le long du profil.

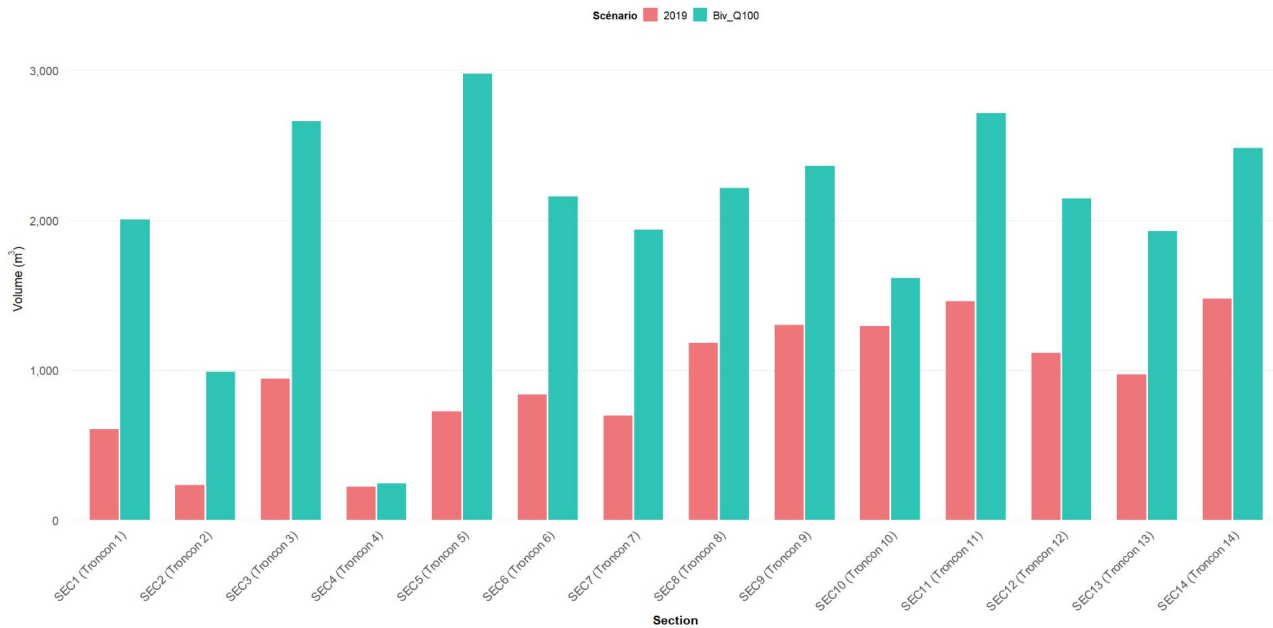


Figure 120 Volumes de sédiments transportés par section pour le Rancure : comparaison des scénarios « Crue Novembre 2019 (AMC2) » et « Crue issue de l'analyse bivariable des pluies Biv_P100 » : volumes apparents (m³) par section, calculés avec BedloadWeb (formule de Recking) sur les sections médianes.

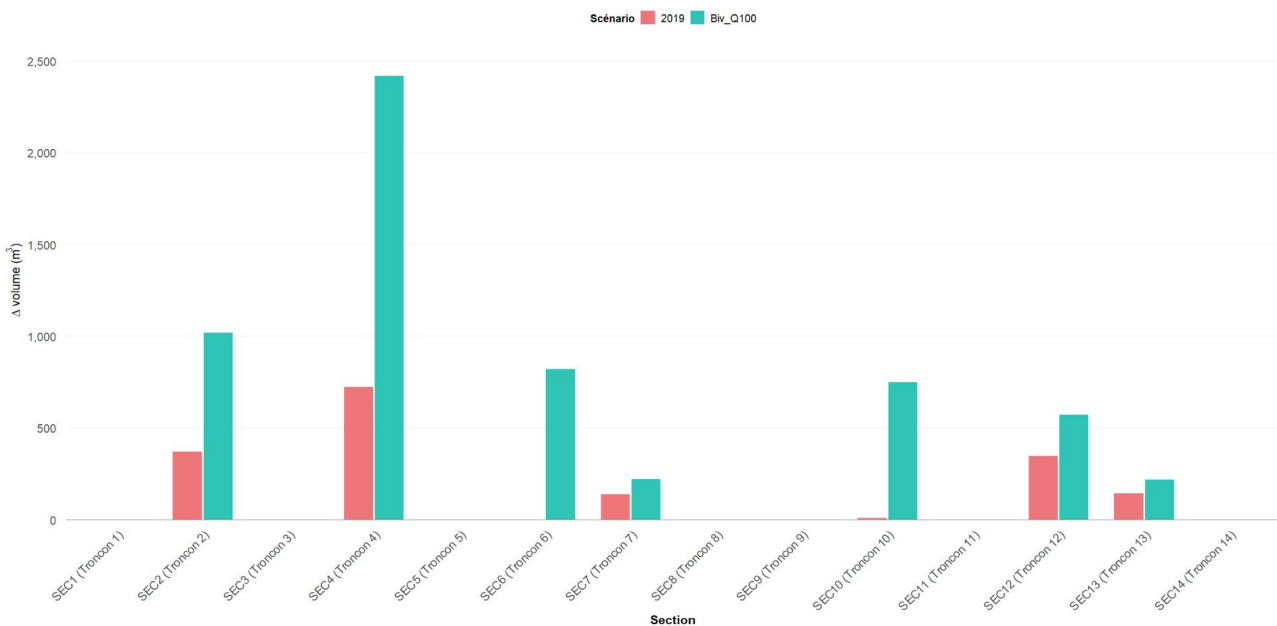


Figure 121 Δ-volumes par section ($i \rightarrow i+1$) pour le Rancure : différences positives de volumes apparents affectées à la section aval, pour la « Crue de Novembre 2019 (AMC2) » et pour la « Crue issue de l'analyse bivariable des pluies Biv_P100 »

Pour le Puimichel, les résultats présentés ne concernent que les tronçons 8 à 11, en aval de la confluence avec le Maucues, où le lit dispose d'une alimentation suffisante en matériaux grossiers ; les tronçons amont et le tronçon 12 en aval du passage busé/pont de la RD101 n'ont pas été retenus (cf 3.3.3.3). La Figure 122 et la Figure 123 illustrent respectivement les volumes apparents transportés et les Δ-volumes associés.

Les résultats obtenus pour le Puimichel confirment une propension marquée aux dépôts sur le tronçon 11, immédiatement à l'amont du gué de la RD101 : les Δ-volumes ($i \rightarrow i+1$) apparents simulés y sont les plus élevés pointant ce secteur comme une zone d'engravement préférentiel. Cette signature

est cohérente avec les observations de terrain (lit aggradé, pente adoucie), et fait écho au fonctionnement du tronçon 4 du Rancure (lit en "toit"), où le transit est déficitaire et les débordements précoces.

En ordre de grandeur, pour un événement de type 2019, on obtient quelques centaines de m³ déposables sur le tronçon 11 : (i) le volume transportable par le tronçon 11, bloqué au droit du gué (une centaine de m³ immédiatement à l'aval), et (ii) un dépôt équivalent à la différence de capacité entre les tronçons 11 et 10 (≈ 250 m³), soit un total d'environ ~ 350 m³ le long du tronçon 11. Pour l'événement centennal bivarié, les volumes apparents atteignent plusieurs centaines de m³ (proches du millier).

Ces ordres de grandeur sont cohérents avec l'intervention d'urgence menée fin 2023 : curage estimé à 1 780 m³ sur environ 150 m à l'amont du gué, avec une pente de reprofilage de 1,6 % conforme au profil 2007 et une largeur de base de 5 m (talus de raccordement aux berges). Ces paramètres et volumes sont documentés dans la note complémentaire du Conseil Départemental des Alpes de Haute de Provence d'octobre 2023 [45]. Le décalage d'échelle entre le volume curé ($\approx 1\,800$ m³) et l'ordre de grandeur déductible d'un seul épisode 2019 (≈ 350 m³) s'explique : le curage visait à résorber un stock pluri-événementiel et à revenir au gabarit 2007 plus encaissé (pente 1,6 %) ; le reprofilage a donc retiré à la fois le bourrelet d'engravement construit au fil des crues (dont juin 2023) et une partie de surépaisseur latérale, afin de retarder la ré-aggradation.

En conséquence, le tronçon 11 doit être considéré comme un secteur à entretien récurrent.

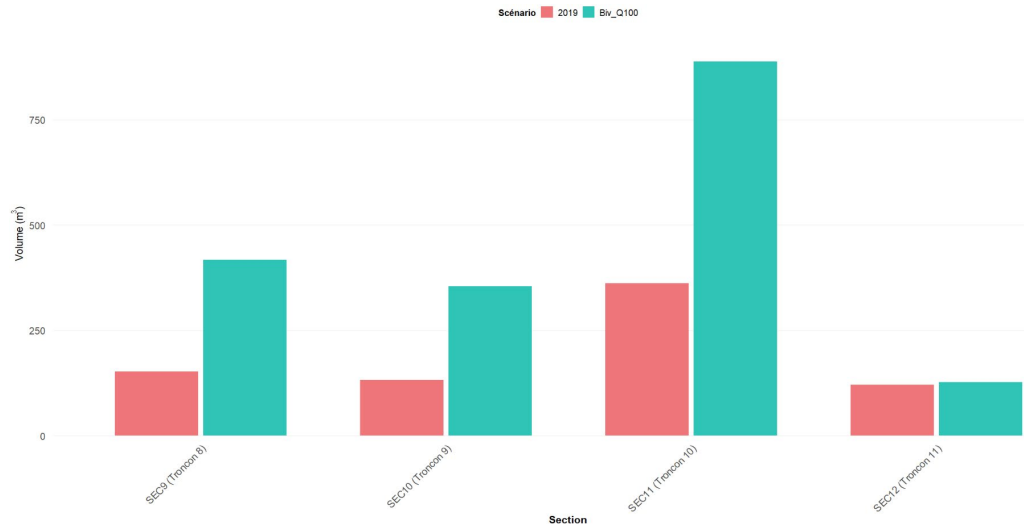


Figure 122 Volumes de sédiments transportés par section pour le Puimichel : comparaison des scénarios « Crue Novembre 2019 (AMC2) » et « Crue issue de l'analyse bivariée des pluies Biv_P100 » : volumes apparents (m³) par section, calculés avec BedloadWeb (formule de Recking) sur les sections médianes.

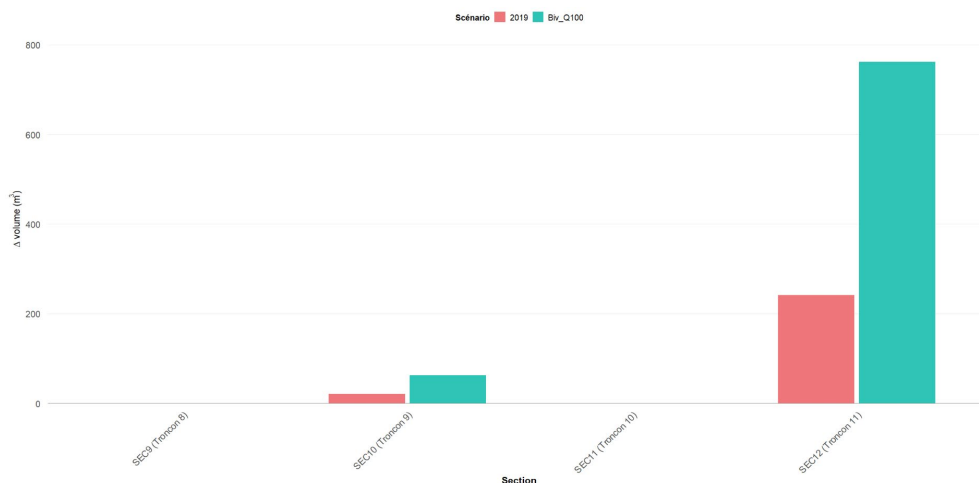


Figure 123 Δ-volumes par section ($i \rightarrow i+1$) pour le Puimichel : différences positives de volumes apparents affectées à la section aval, pour la « Crue de Novembre 2019 (AMC2) » et pour la « Crue issue de l'analyse bivariée des pluies Biv_P100 »

3.3.4 Flottants et formation d'embâcles

La dynamique torrentielle est fortement dépendante non seulement du transport solide, mais aussi du transport de flottants, qui peuvent notamment obstruer les ouvrages et augmenter ainsi les probabilités de débordements.

3.3.4.1 Potentiel de production de flottants

Contrairement à une idée répandue, la majorité du bois transporté lors des crues majeures est du bois frais issu d'arbres ou arbustes vivants arrachés par la dynamique de l'événement, et non du bois mort préexistant dans le lit ([46]). Les principaux processus à l'origine de cette production de flottants sont l'érosion des berges, les glissements de terrain et les apports des affluents.

Dans le contexte du bassin versant du Rancure, plusieurs facteurs influencent ce potentiel de production :

- La géologie et la géomorphologie : Le bassin est caractérisé par des formations géologiques facilement érodables comme les marnes rouges d'Ajonc. Bien que ces formations contribuent principalement à un apport en matériaux fins, leur érosion peut déstabiliser les versants et les berges végétalisées. L'essentiel de la charge grossière du Rancure provient du remaniement de son propre stock alluvial (terrasses anciennes, colluvions) issu du démantèlement des conglomérats de Valensole. C'est donc principalement l'érosion des berges boisées et des anciennes terrasses recolonisées par la végétation qui constitue la source majeure de bois flottant.
- L'évolution de l'occupation des sols : Depuis le milieu du XIXe siècle, le bassin du Rancure a connu une augmentation significative du couvert forestier ("fermeture des paysages"), notamment sur les versants. Cette dynamique, bien que réduisant l'érosion de surface et donc les apports sédimentaires, a augmenté le stock de bois sur pied potentiellement mobilisable par érosion latérale le long du cours d'eau principal et de ses affluents.
- L'état de la ripisylve : Le long du Rancure et du Puimichel, la ripisylve est globalement de bonne qualité et constitue un corridor écologique essentiel. Cette végétation rivulaire dense, bien que stabilisant les berges en conditions normales, représente un réservoir important de bois susceptible d'être recruté lors de crues morphogènes (exemple à la Figure 124).

En synthèse, le potentiel de production de flottants par érosion des berges et remaniement du stock alluvial boisé est significatif, en particulier sur les secteurs où le cours d'eau a une dynamique latérale active.



Figure 124 Dépôts de flottants au sein du Rancure lors de la crue de juin 2023 au niveau de la distillerie

3.3.4.2 Interaction ouvrages/flottants

Les nombreux ouvrages de franchissement présents sur le Rancure et ses affluents (15 ponts, 10 passages busés et 77 passages à gué) constituent des verrous hydrauliques où les flottants sont susceptibles de s'accumuler et de former des embâcles. Ces embâcles augmentent le risque de débordement, d'affouillement et de destruction d'ouvrages.

La probabilité de formation d'un embâcle dépend des caractéristiques des flottants et de celles de l'ouvrage. Sur le bassin du Rancure, plusieurs configurations sont à risque :

- Les passages à gué : Très nombreux sur le linéaire (Rancure et affluents), ils sont par nature bas et leur capacité de franchissement est rapidement dépassée. Ils constituent des points de blocage potentiels pour les flottants, même de petite taille.
- Les ponts et passages busés dans les zones urbanisées (Oraison, Le Castellet) : les passages busés de la RD101 et de la route de la déchetterie au Castellet sont des exemple notables (Figure 125) tout comme le pont du Vésier à Oraison (Figure 125).
- La présence de piles en rivière : Les piles augmentent significativement la probabilité de blocage en accrochant les bois, pouvant initier un "embâcle de pile" qui peut ensuite s'étendre à toute la travée.

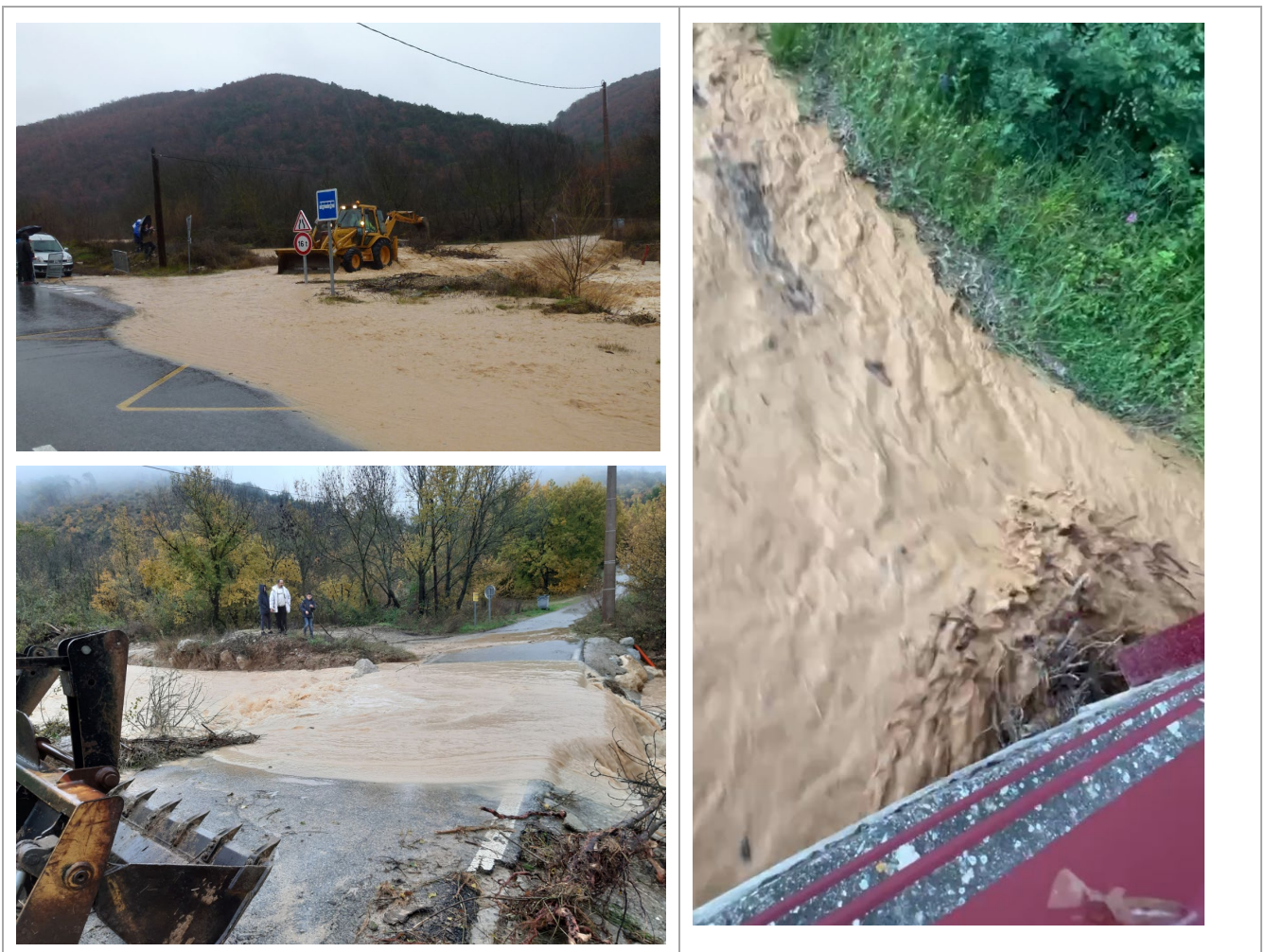


Figure 125 Exemples de dysfonctionnements aux ouvrages lors des crues récentes : à gauche, le passage busé de la route de la déchetterie lors des crues de 2014 et 2019, marqué par des accumulations et enlèvements d'embâcles ; à droite, le pont Vésier à Oraison lors de la crue de juin 2023, avec un début de formation d'embâcles au droit d'un appui intermédiaire.

3.3.5 Synthèse de l'analyse fonctionnelle actuelle

Le fonctionnement hydromorphologique actuel du Rancure est principalement conditionné par une alimentation sédimentaire dominée par les apports internes. En l'absence de zones d'érosion actives sur les versants fournissant une charge grossière significative, le cours d'eau "travaille" essentiellement sur son propre stock sédimentaire hérité. La recharge en matériaux grossiers (galets) provient donc majoritairement du remaniement du stock alluvial et de l'érosion des berges, tandis que les apports externes se limitent principalement à des matériaux fins issus des formations marneuses. La granulométrie de référence du lit actif est caractérisée par un diamètre médian D50 de 25 mm et un D84 de 49 mm.

L'évaluation de la capacité de transport solide, menée avec la formule de Recking (2013), a permis d'identifier des zones de dépôt préférentiel où la capacité de transport diminue. Sur le Rancure, ces zones se situent notamment en amont du gué de la route d'Entrevennes, en amont de la confluence avec le Puimichel et à l'entrée d'Oraison. Sur le Puimichel, le tronçon en amont du gué de la RD101, est également une zone d'engrèvement récurrente. Enfin, la présence d'une ripisylve dense et l'érosion active des berges créent un potentiel significatif de production de flottants, qui peuvent former des embâcles au droit des nombreux ouvrages transversaux (ponts, gués, buses), augmentant ainsi localement le risque de débordement.

3.4 Analyse trajectorielle prospective

L'évolution future du Rancure peut être appréhendée en prolongeant les dynamiques observées dans le passé récent et en intégrant l'incertitude liée au changement climatique. L'approche trajectorielle proposée cherche ainsi à croiser les tendances héritées, les forçages actuels et les aléas futurs afin de dégager des scénarios plausibles d'évolution du système en place.

3.4.1 Tendances héritées et leur projection future

L'analyse de la trajectoire historique et du fonctionnement actuel du Rancure a mis en évidence plusieurs tendances de fond qui, sans intervention majeure ou rupture climatique, devraient structurer son évolution à moyen et long terme :

- La poursuite de la péjoration sédimentaire
L'héritage géomorphologique du Rancure est marqué par une réduction significative des apports sédimentaires depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (vers 1850). Cette tendance a été renforcée par des forçages anthropiques, notamment l'augmentation du couvert forestier sur le bassin versant qui limite l'érosion des versants.
En l'absence de changement majeur, cette tendance au déficit sédimentaire devrait se poursuivre. Le système mis en place dépendra de plus en plus de ses « apports internes » (érosion de ses propres berges et de son lit) plutôt que d'apports externes "nouveaux". Le cours d'eau continuera de fonctionner sur son stock alluvial hérité, qu'il remaniera et déstockera lentement au fil des crues.
- L'Ajustement Morphologique : resserrement et incision du Lit
La conséquence directe du déficit sédimentaire est un ajustement morphologique durable du cours d'eau. L'analyse diachronique a montré un « resserrement généralisé de la bande active » sur l'ensemble du linéaire depuis le milieu du XXe siècle, tendance liée à la fois à une stabilisation naturelle par la végétation et aux contraintes anthropiques (urbanisation, routes). Parallèlement, la comparaison des profils en long actuels avec les terrasses anciennes révèle une relative tendance à l'incision verticale du lit au sein des anciennes terrasses alluviales.
Le Rancure devrait poursuivre son évolution vers un lit plus contraint, plus étroit et plus stable en plan. L'incision verticale au sein des anciennes terrasses, bien que modérée sur les dernières décennies, devrait se maintenir sur le long terme, notamment en réponse aux crues qui mobiliseront les matériaux du fond du lit sans compensation par des apports amont suffisants.

3.4.2 L'Incertitude majeure : la "Super-Variable" climatique

À l'instar des analyses menées sur des bassins voisins comme l'Asse, il est essentiel de considérer que les tendances lourdes décrites ci-dessus pourraient être profondément modifiées par le forçage climatique futur, qui agit comme une "super-variable" de contrôle. L'évolution du climat dans les pré-Alpes et les Alpes du Sud introduit deux processus potentiellement contradictoires mais puissants :

- **Processus n°1 : Augmentation des sécheresses et du stress hydrique**
Une hausse des températures et des sécheresses estivales pourrait fragiliser le couvert végétal et augmenter le risque d'incendies. Paradoxalement, une dégradation de la végétation pourrait réactiver l'érosion des versants et augmenter brutalement la fourniture sédimentaire lors des épisodes pluvieux intenses, inversant temporairement le déficit actuel.
- **Processus n°2 : Intensification des précipitations extrêmes**
Les projections climatiques suggèrent une possible augmentation de la fréquence ou de l'intensité des pluies extrêmes. Le bassin versant du Rancure, déjà caractérisé par un régime de "crues éclair", serait particulièrement sensible à ce phénomène. Des crues plus violentes ("crues très morphogènes") pourraient remobiliser massivement le stock alluvial statique (terrasses anciennes) et dynamique, provoquant des élargissements soudains et brutaux de la bande active et des changements morphologiques rapides.

3.4.3 Scénarios d'évolution dynamique du Rancure

En croisant les tendances de fond et l'incertitude climatique, deux scénarios principaux pour l'évolution future du Rancure peuvent être envisagés.

3.4.3.1 Scénario tendanciel ("Laisser-faire") :

Ce scénario correspond à la poursuite des dynamiques actuelles sans rupture majeure. Le Rancure continuerait sa trajectoire vers un rétrécissement et une incision lente de son lit. La bande active se stabiliserait davantage par la végétation. La morphologie du cours d'eau deviendrait de moins en moins dynamique, avec une faible mobilité latérale, sauf lors de crues exceptionnelles qui pourraient remanier localement le lit de manière importante mais sans en changer la forme générale

3.4.3.2 Scénario de rupture par forçage climatique :

Ce scénario envisage une rupture avec les tendances actuelles, provoquée par l'intensification des extrêmes climatiques. Il se traduirait par de longues périodes de stabilité (similaires au scénario tendanciel) ponctuées par des événements morphogènes brutaux et de haute magnitude. Ces crues pourraient :

- Provoquer des avulsions et des élargissements soudains, menaçant les infrastructures situées dans l'espace de mobilité historique du cours d'eau.
- Générer un « artéfact sédimentaire » : une recharge massive mais temporaire en sédiments par l'érosion des terrasses et des versants fragilisés.

3.4.4 Synthèse et implications pour la gestion future

L'évolution dynamique du Rancure sera probablement un mélange complexe des deux scénarios. Le système en place tend vers un état de plus en plus stable et incisé, mais reste sous la menace de chocs hydromorphologiques violents qui pourraient réactiver brutalement sa dynamique. Un épisode exceptionnel pourrait provoquer un ajustement brutal du système morphologique avec la rupture de seuils ou d'ouvrages transversaux, un engravement important de certaines zones et une modification locale de la géométrie du lit et de la répartition des flux. Ainsi, même en l'absence de changement notable de l'occupation du bassin versant, la survenue d'un événement extrême appellerait à une vigilance particulière vis-à-vis des zones d'expansion potentielles et des secteurs historiquement instables.

Cette trajectoire prospective implique donc des enjeux de gestion majeurs :

- La gestion doit être adaptative, capable de répondre à la fois à une tendance de fond (incision, déficit sédimentaire) et à des risques ponctuels extrêmes (crues éclair morphogènes).
- Laisser le cours d'eau se "fossiliser" dans un chenal étroit pourrait augmenter la vulnérabilité des enjeux lors d'un événement de rupture, car l'énergie de la crue serait concentrée dans un lit sous-dimensionné.
- Les actions de gestion futures devront arbitrer entre la protection des enjeux existants et la nécessité de redonner au Rancure un espace de mobilité suffisant pour dissiper l'énergie des crues et gérer son transport solide de manière plus fonctionnelle.
- Un **suivi dynamique sera indispensable** pour observer l'évolution réelle du système (incision, largeur de la bande active, réponse aux crues) et ajuster la stratégie de gestion en conséquence.

4 ANALYSE HYDRAULIQUE

Cette section rassemble l'ensemble des éléments nécessaires pour apprécier, le long du Rancure et du Puimichel, la capacité des lits à véhiculer les crues de référence et les conditions d'apparition des débordements. L'approche adoptée combine une lecture morpho-hydraulique en profil longitudinal (pentes, largeurs écoulees, hauteurs de berges) et des simulations 2D destinées à qualifier les zones de débordement préférentielles. L'objectif est double :

- sectoriser le linéaire en fonction des processus dominants (divagation, confinement, incision, aggradation),
- apprécier, pour chaque secteur, les marges entre débits sollicitants et capacités du lit/corridor, ainsi que la probabilité de débordement et sa propagation.

4.1 Évaluation des conditions d'écoulement

4.1.1 Objectifs

L'objectif est de qualifier, le long des axes du Rancure et du Puimichel, les configurations hydromorphologiques et, pour chacune, d'identifier les méthodes d'analyse et les paramètres à considérer conformément à la note technique RTM-INRAE de 2025 sur les études d'aléa relatives aux cours d'eau torrentiels ([47]). Cette étape sert notamment à sectoriser le linéaire, à prioriser les lois d'écoulement/résistance et à cibler les zones sensibles à l'érosion/débordement.

Dans l'ensemble de l'approche, l'analyse distingue systématiquement deux entités principales :

- Le **chenal actif** : correspond à l'espace actuellement mobilisé par les écoulements fréquents.
- Le **corridor alluvial** : correspond aux **anciennes terrasses identifiées**, qui représentent l'extension historique potentielle du lit, parfois confondue avec la bande active passée (orthophoto 1950).

Travailler simultanément sur ces deux entités est important pour :

- Identifier les tendances évolutives du comportement du cours d'eau, notamment les contrastes entre secteurs incisés, confinés, semi-confinés et divaguants ;
- Déterminer, pour chaque tronçon, quelles méthodes d'analyse hydraulique privilégier (prise en compte de la largeur écoulee, scénarios de divagation...) ;
- Mettre en évidence les écarts entre le fonctionnement hydraulique actuel du chenal actif et l'espace de mobilité ancien, afin d'anticiper les secteurs à risque de réactivation.

Cette double approche, intégrant le fonctionnement hydraulique actuel et l'héritage morphologique des anciennes terrasses, permet d'appréhender le comportement global du Rancure et du Puimichel et de définir des stratégies adaptées dans la modélisation hydraulique et la caractérisation des aléas.

4.1.2 Classification hydro-morphologique au regard de l'analyse hydraulique

4.1.2.1 Indicateurs calculés le long de l'axe du Rancure et du Puimichel

Le long du linéaire du Rancure et du Puimichel, les indicateurs suivants sont extraits et lissés (médiane glissante) :

- **Contrainte de capacité hydraulique** : Q_{ref}/Q_{cap}

Le débit capacitif Q_{cap} correspond au débit maximal potentiellement transmissible sans débordement dans le chenal actif et dans le corridor alluvial (anciennes terrasses identifiées). Il est calculé pour chaque point de l'axe à partir des profils en travers et des courbes hauteur-débit issues de la loi de Fergusson (2007) [48], en tenant compte de la géométrie réelle et de la pente locale. Les débits sollicitants proviennent de l'analyse hydrologique menées à la partie 2.2.2.1, et sont estimés à partir des débits pseudo-spécifiques identifiés pour différentes périodes de retour (T2, T5) et de la taille des bassins versants drainés le long de l'axe du

Rancure et du Puimichel. On compare ensuite Q_{ref} (débit lié à une période de retour fréquente T2 ou T5) à Q_{cap} via le ratio Q_{ref}/Q_{cap} .

Deux valeurs de Q_{ref}/Q_{cap} sont calculées pour chaque profil en travers :

- Q_{ref}/Q_{ca_actif} calculé sur le chenal actif (lit mineur) ;
- $Q_{ref}/Q_{cap_terrasses}$ calculé sur le corridor alluvial.

- **Rapport d'aspect L/h :**

Le rapport d'aspect L/h est calculé au plein bord, c'est-à-dire lorsque le plan d'eau atteint la berge la plus basse de la section considérée. La largeur L est déterminée à partir d'un rectangle hydraulique équivalent, calculé selon : $L = S_{mouillée} / h_{moy}$

Deux valeurs de L/h sont calculées pour chaque profil en travers :

- L/h_{actif} calculé sur le chenal actif (lit mineur) ;
- $L/h_{terrasses}$ calculé sur le corridor alluvial.

Un L/h faible traduit un chenal étroit et profond alors qu'un L/h élevé correspond à un chenal large et peu profond.

- **Ouverture latérale : $R_{cor} = W_{corridor} / W_{actif}$**

- $W_{corridor}$ est issu de l'enveloppe maximale entre la largeur de la bande active visible sur l'orthophoto de 1950 et la largeur des anciennes terrasses identifiées ;
- W_{actif} est la largeur du chenal actif.

Cet indice mesure l'espace de mobilité latérale disponible (divagation possible), qu'il y ait ou non des berges franches identifiées au niveau du corridor alluvial (anciennes terrasses identifiées).

- **Hauteur de la ligne d'eau / Hauteur relative des berges : h_{ref}/h_{berges}**

L'atteignabilité des berges est évaluée en comparant la ligne d'eau h_{ref} déterminée en fixant un rapport L/h égale à 15 et avec une hypothèse de régime critique ([47]) (hauteur d'eau simulée pour une période de retour fréquente T2 ou T5, ramenée au fond moyen du lit) aux hauteurs de berge du chenal actif et des corridor alluvial.

Pour faciliter la lecture, l'évolution des sept indicateurs le long de l'axe du Rancure a été lissée à l'aide de la méthode LOESS (Locally Estimated Scatterplot Smoothing) : voir Figure 130. Cette approche ajuste localement une régression pondérée pour dégager une tendance continue sans imposer de forme globale. Le paramètre span contrôle le degré de lissage : faible, il suit les variations fines ; élevé, il produit une courbe plus régulière. Les indicateurs ainsi lissés constituent la base de la classification hydromorphologique.

4.1.2.2 Classification hydro-morphologique

Les indicateurs ci-dessus sont corrélés et varient simultanément : pour en tirer des familles lisibles, on réduit d'abord l'information via une ACP (analyse en composantes principales) sur les variables standardisées[49]. L'ACP¹² condense la variabilité dominante en 2–3 axes indépendants (composantes) qui captent les contrastes morpho-hydrauliques majeurs. Dans cet espace réduit, on applique un clustering GMM¹³ (modèles de mélange gaussiens) qui détecte automatiquement le nombre de groupes pertinents (critère BIC) et gère des formes/variances différentes entre groupes[49]. On obtient ainsi des clusters "statistiquement" cohérents sur les indicateurs détaillés au paragraphe 4.1.2.1.

Classification pour le Rancure

Les clusters sont regroupés en quatre (4) familles opérationnelles pour garantir la continuité spatiale et intégrer les verrous et héritages non captés par les seuls indicateurs : voir Figure 126 et Figure 127. La

¹² L'ACP est une méthode statistique de réduction de dimension qui transforme des variables corrélées en un petit nombre de composantes indépendantes. Elle permet de résumer l'essentiel de la variabilité du jeu de données tout en conservant la structure des relations entre variables.

¹³ Les GMM sont une approche de classification probabiliste qui regroupe les observations en plusieurs sous-populations supposées suivre des lois normales distinctes. Chaque point est associé à un groupe selon une probabilité d'appartenance, ce qui permet de représenter des clusters de formes et de dispersions variées.

typologie ainsi obtenue permet de distinguer quatre familles de secteurs aux fonctionnements hydrauliques et hydromorphologiques potentiellement différents, présentées ci-après :

- **Cluster 1 (rouge)**

Le rapport L/h est relativement élevé, en particulier pour les terrasses (30–50), tandis que le chenal actif oscille entre 20 et 30. Il s'agit de portions où le lit divague au sein d'un large corridor alluvial, traduisant une dynamique latérale potentiellement marquée. La capacité hydraulique du chenal actif y est modeste, ce qui est cohérent avec un fonctionnement en chenal mobile et peu contraint.

- **Cluster 2 (vert)**

Le cluster correspond au secteur de traversée d'Oraison, caractérisé par des rapports de forme plus faibles (L/h entre 10 et 20 pour le chenal actif comme pour le corridor alluvial). On y observe un lit confiné, avec un gabarit hydraulique important lié à la capacité du lit majeur/corridor alluvial à contenir les débits. Ces caractéristiques traduisent un encaissement local, lié aux contraintes anthropiques et urbaines.

- **Cluster 3 (bleu)**

Le lit est aggradé, en toit, avec un corridor alluvial peu marqué ou peu visible. Ce type de configuration favorise les débordements, voire l'avulsion avec la création de nouveaux chenaux. Les rapports h_{ref}/h_{berges} y sont très élevés, traduisant la faible efficacité du chenal actif à contenir les débits. Ce secteur se distingue également par un adoucissement de la pente longitudinale, qui accroît la propension aux dépôts préférentiels, entretient la tendance à l'aggradation et favorise encore la tendance à l'avulsion (cf. paragraphe 3.3.3.4).

- **Cluster 4 (violet)**

Concerne principalement l'amont du Rancure, où le lit est un peu plus encaissé avec un rapport L/h relativement faible (<20). La capacité hydraulique y est importante au regard des débits sollicitants pour les périodes de retour fréquentes. Ces secteurs sont plus stables, dominés par la pente longitudinale, avec moins de divagation latérale.

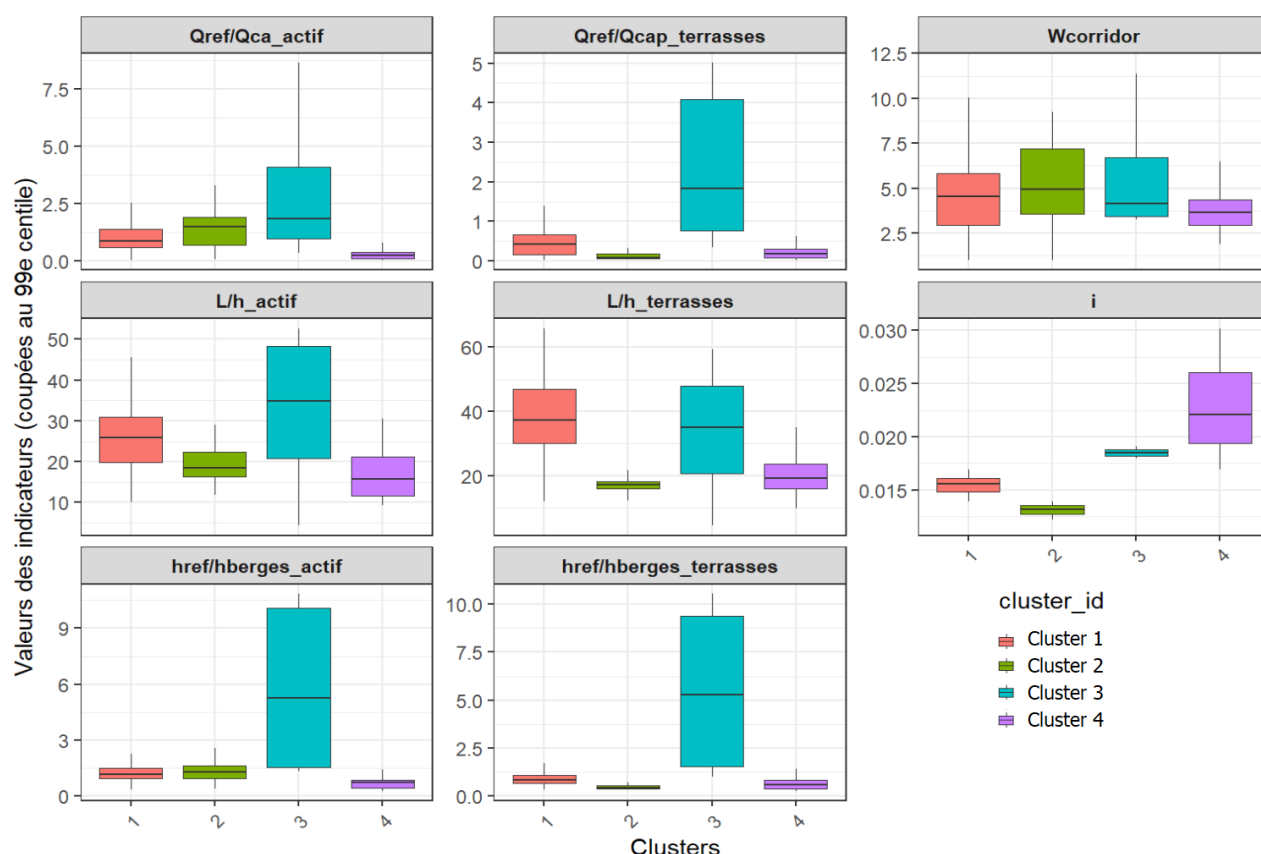


Figure 126 Caractéristiques des 4 clusters hydromorphologiques identifiés sur le Rancure

- **Cluster 2 (vert) — Lit confiné à capacité modérée**

Ce second cluster directement à l'amont de la confluence avec le Rancure correspond à un tronçon confiné, notamment en raison de la présence d'une mur/digue en rive droite, avec des rapports L/h plus faibles (environ 10–20). Contrairement au cluster 2 du Rancure, la capacité hydraulique n'y est pas particulièrement élevée.

Le fonctionnement de ce cluster est fortement conditionné par le passage à gué de la RD 101 en amont, avec une charge solide qui tend à se bloquer au droit de l'ouvrage, accentuant le caractère confiné du secteur.

- **Cluster 3 (bleu) — Lits aggradés, faible capacité**

Le fond est aggradé et la morphologie en "toit" réduit l'empreinte du corridor alluvial. Cette configuration favorise les débordements et peut conduire à des avulsions. Les rapports h_{ref}/h_{berges} sont élevés, signe d'une capacité faible du chenal à contenir les débits. Ces situations apparaissent préférentiellement là où la pente s'adoucit, ce qui accroît la sédimentation préférentielle et entretient le rehaussement du fond.

Ce cluster rassemble deux tronçons qui présentent des caractères hydrauliques proches (efficacité modérée du chenal pour contenir les débits sollicitants, sensibilité aux contrôles locaux), mais dont la configuration morpho-sédimentaire diffère :

Sous-secteur « Ubac (amont–médian du Puimichel) ».

La charge grossière disponible y est faible (dominance des fines). Le chenal fonctionne sous déficit relatif en matériaux grossiers.

Sous-secteur « Amont du passage de la RD 101 ».

La capacité de transport se réduit sous l'effet du gué/étranglement et du confinement, alors même que le Puimichel arrive chargé en matériaux grossiers. Le bilan sédimentaire devient positif : accumulations, barres et lit aggradé en "toit" se mettent en place, abaissant l'efficacité hydraulique. La configuration est analogue à celle observée sur le Rancure en amont du gué de la route d'Entrevennes.

- **Cluster 4 (violet) — Lits incisés/encaissés**

Le quatrième cluster représente un linéaire important du Puimichel (sur la partie amont essentiellement). Il concerne des lits encaissés, caractérisés par des rapports L/h faibles (inférieurs à 20) et, de ce fait, par une capacité relativement bonne au regard des débits fréquents.

L'incision reflète un déficit de charge grossière — les fines dominant — si bien qu'au fil des crues, le profil s'abaisse et l'encaissement se renforce. Ce type de fonctionnement est particulièrement marqué en amont de la confluence avec le ravin du Maucues, où la pente longitudinale et la pauvreté en matériaux grossiers contrôlent l'ajustement morphologique.

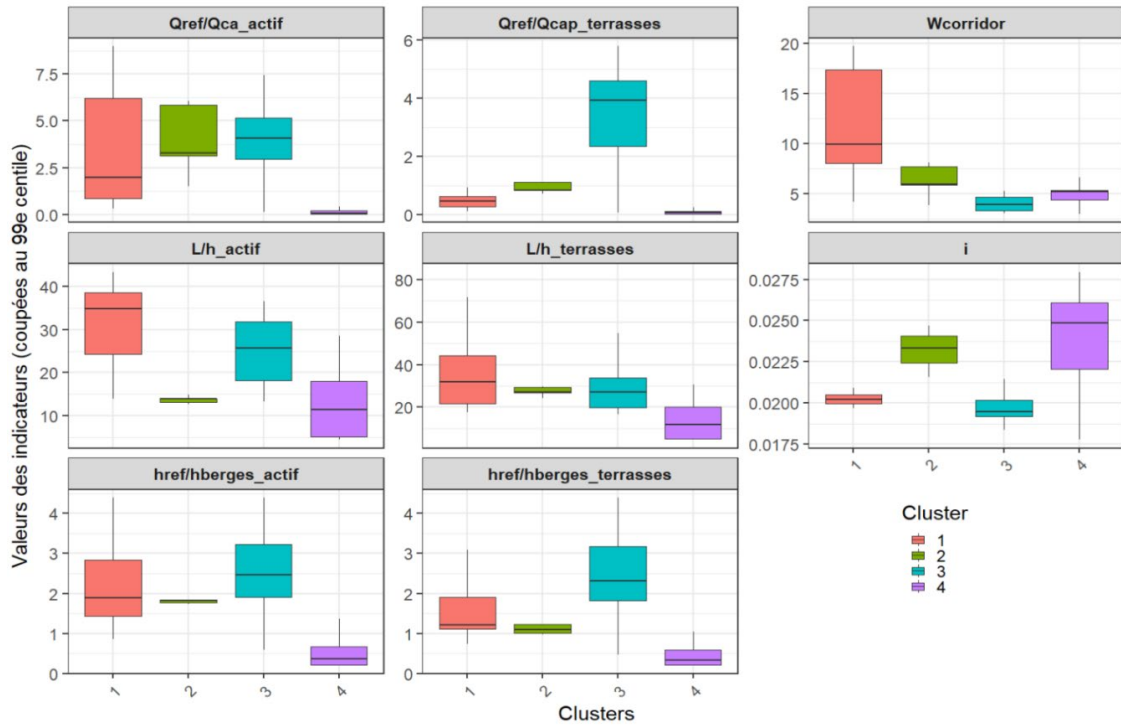


Figure 128 Caractéristiques des 4 clusters hydromorphologiques identifiés sur le Puimichel

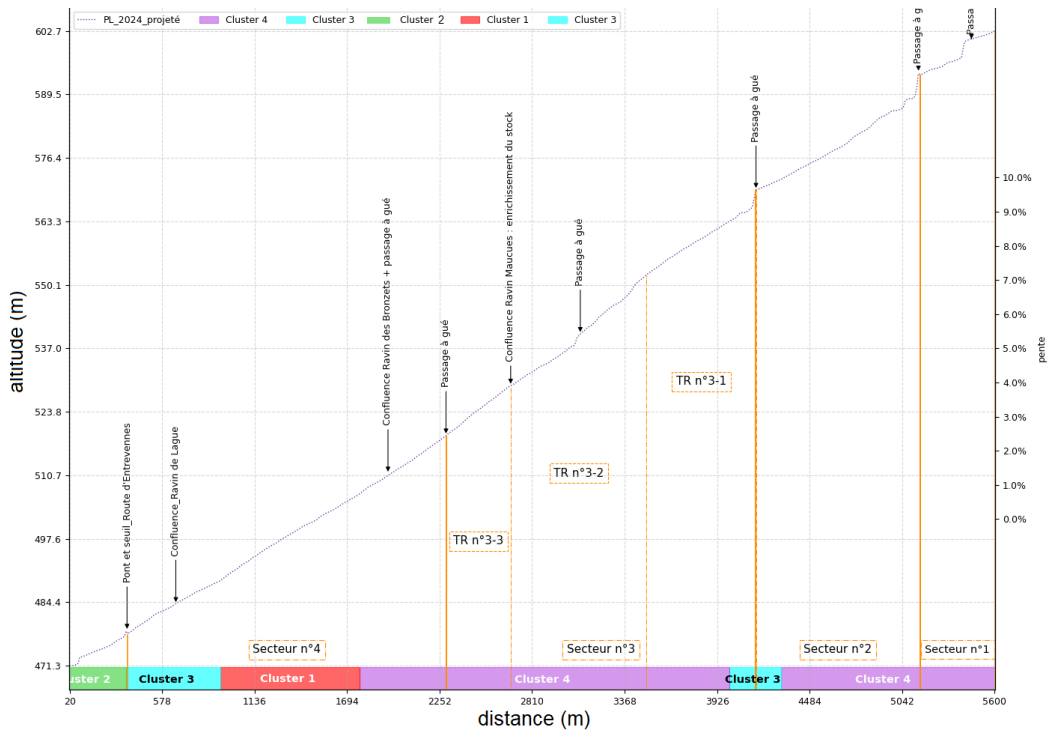


Figure 129 Positionnement des clusters hydromorphologiques du Puimichel, interprétés au regard de l'analyse hydraulique, le long du profil en long.

4.1.3 Stratégie calculatoire par type de cluster hydromorphologique

L'approche générale consiste à relier la typologie issue de la classification en clusters aux méthodes de calcul proposées par la note RTM–INRAE (2025) pour l'estimation des niveaux d'eau et de l'érosion des berges en contexte torrentiel ([47]). L'objectif est de définir, pour chaque type de configuration, les hypothèses de travail, en combinant systématiquement trois niveaux de lecture : (i) l'évolution systématique du lit et ses respirations torrentielles, (ii) le calcul hydraulique adapté au contexte (contraint ou divagant), et (iii) la mise en perspective géomorphologique et historique. Il est important de préciser que les débits capacitatifs des ouvrages hydrauliques (ponts, buses, seuils, etc.) et autres points singuliers ne sont pas intégrés dans cette analyse. L'évaluation repose exclusivement sur la

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

capacité intrinsèque du lit naturel à véhiculer les débits de référence, indépendamment des contraintes locales imposées par les aménagements. Ces éléments feront, le cas échéant, l'objet d'une analyse spécifique complémentaire.

- **Clusters 2 et 4 (verts et violets – lits confinés ou encaissés) du Rancure et du Puimichel**

Ces secteurs correspondent aux lits contraints, où les mouvements latéraux sont limités par des berges naturelles ou anthropiques. La note RTM-INRAE (2025) recommande :

- d'utiliser des lois de frottement adaptées aux conditions torrentielle (Ferguson 2007 [48], Rickenmann & Recking 2011 [50]), car la loi de Manning-Strickler au sens de (Strickler, 1923 [51]) est peu fiable en cas de faible submersion relative ($h/D < 7$) ;
- de recourir à l'hypothèse d'écoulement proche du régime critique uniquement si la gamme de rugosité est intermédiaire, et en évitant les zones de remous sous influence d'ouvrages ;
- de considérer, dans certains cas singuliers, la charge hydraulique plutôt que la seule hauteur d'eau, en ajoutant un terme cinétique ($V^2/2g$) pour intégrer l'énergie instationnaire.

Dans ces contextes, l'érosion latérale est généralement limitée, mais l'analyse doit porter sur l'affouillement local, la fragilité des protections et le recul éventuel des têtes de berges.

- **Cluster 1 (rouge – lit divagant au sein du corridor alluvial) du Rancure et du Puimichel**

Le lit est peu ou pas contraint, et le chenal actif se déplace dans un large corridor. La note RTM-INRAE (2025) indique que les écoulements doivent être analysés à l'échelle du chenal actif, et non en répartissant le débit sur toute la largeur disponible. La stratégie calculatoire repose sur un système de trois équations à trois inconnues :

- Hypothèse d'un rapport d'aspect réaliste (L/h compris entre 15 et 40),
- Hypothèse d'écoulement critique ($Fr = 1$) [52],
- Hypothèse que la totalité du débit de pointe s'écoule dans ce chenal actif ($Q = V \cdot L \cdot h$).

La résolution de ce système fournit une enveloppe de hauteurs et vitesses probables.

L'approche peut être consolidée par la méthode du chenal à l'équilibre, qui borne les largeurs et hauteurs maximales à partir du nombre de Shields (τ^*), en considérant que le lit s'élargit tant que l'érosion latérale est active.

Dans ces configurations, l'érosion des berges et la divagation constituent le processus dominant, et les analyses géomorphologiques (traces de chenaux anciens, terrasses, largeur du fond de vallée) sont importantes.

- **Cluster 3 (bleu – lit aggradé, avec débordements/avulsion) du Rancure et du Puimichel**

Ce cluster illustre les situations où le lit s'exhausse et perd sa capacité à contenir les débits, favorisant les débordements et les avulsions. La note recommande d'appliquer les mêmes bases calculatoires que pour les lits contraints (lois adaptées, évolution systématique + respiration torrentielle), mais en majorant l'hypothèse d'engrèvement pour tenir compte de la boucle de rétroaction : dépôts → débordements → réduction de capacité → dépôts supplémentaires. L'évaluation doit cibler en priorité les points de débordement préférentiels car ils déclenchent l'emballement. Ici, la cartographie historique et la simulation de scénarios d'avulsion (débordements qui s'installent en nouveau chenal) sont importantes.

Dans tous les cas, l'évolution systématique du fond et la respiration torrentielle doivent être intégrées, car elles conditionnent la variabilité instantanée des hauteurs d'eau et la probabilité d'atteinte des berges. Les lits contraints (clusters 2 et 4) appellent un calcul hydraulique précis avec lois adaptées et analyse d'affouillement. Les lits divagants (cluster 1) nécessitent de reconstruire un chenal actif fictif via les rapports d'aspect et l'hypothèse critique. Les lits aggradés (cluster 3) imposent une attention particulière aux dépôts régressifs et au risque d'avulsion.

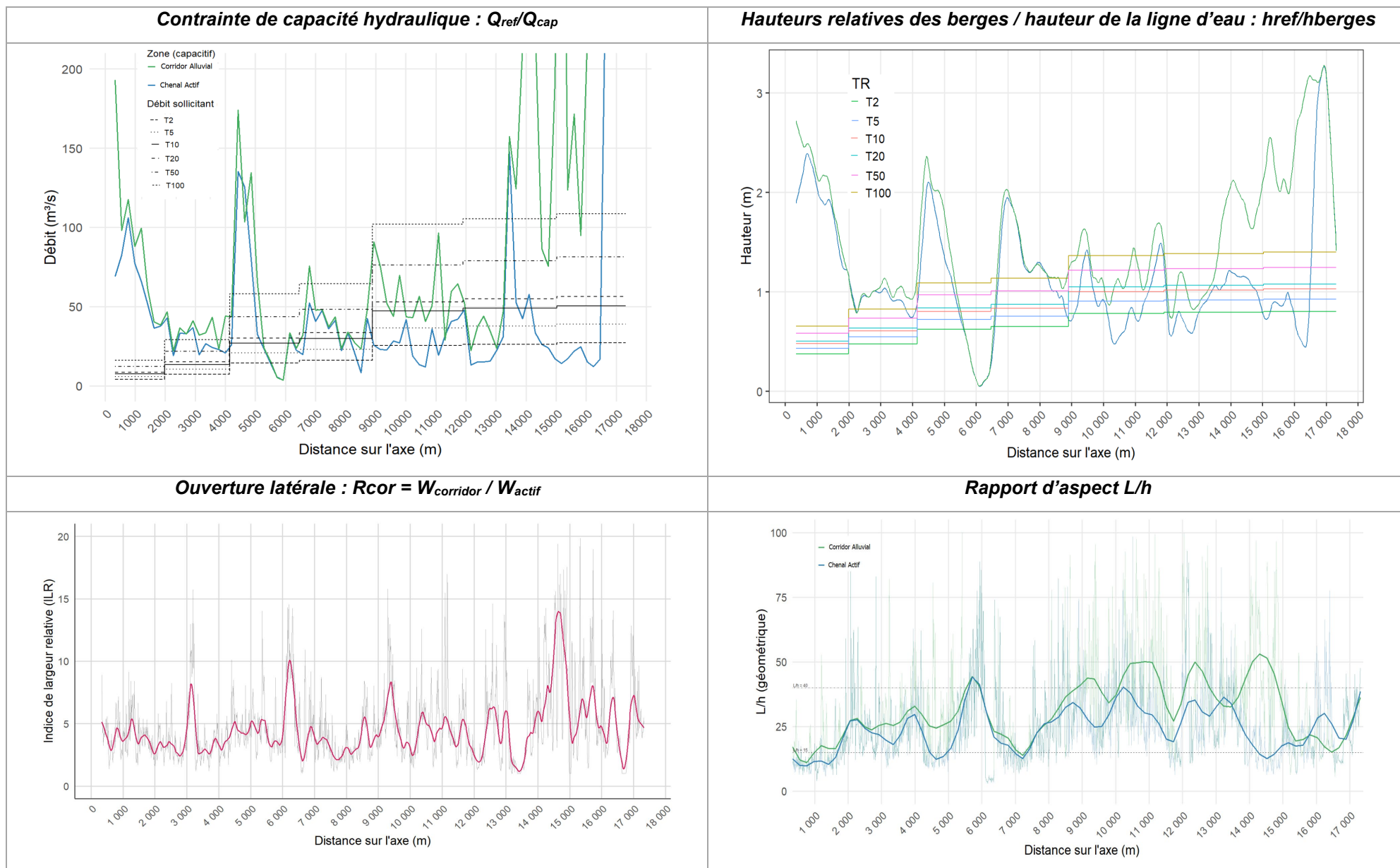


Figure 130 Évolution des Indicateurs hydromorphologiques (au regard de l'analyse hydraulique) le long du Rancure

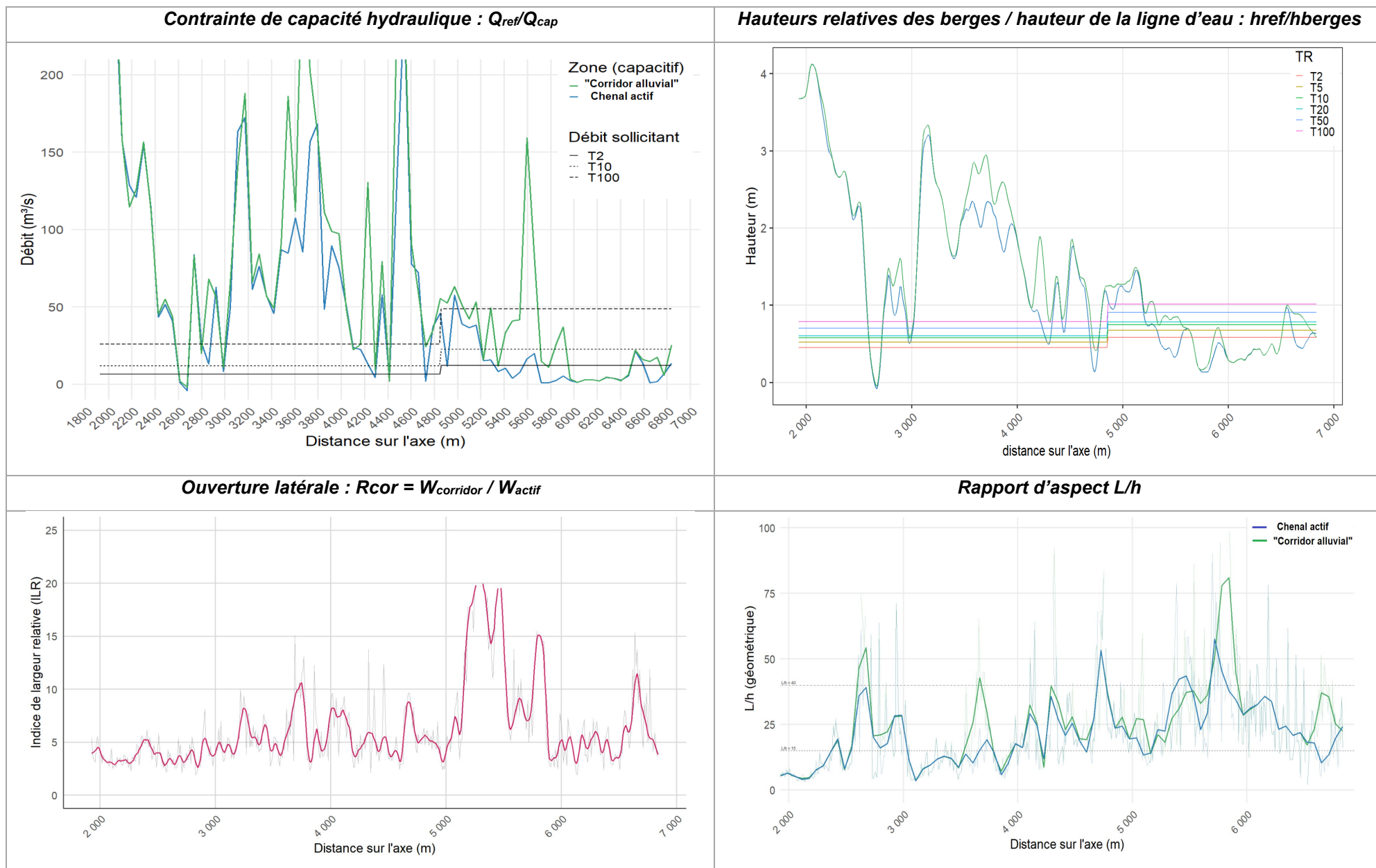


Figure 131 Evolution des Indicateurs hydromorphologiques (au regard de l'analyse hydraulique) le long du Puimichel

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

4.1.4 Évaluation des niveaux d'eau et des points de débordement

Conformément à la classification hydromorphologique menée dans la partie précédente (§ 4.1.2), l'évaluation des niveaux d'eau est conduite selon deux grilles de lecture complémentaires, pondérées par type de cluster :

- Secteurs divaguants (cluster 1) et plus généralement les tronçons à ouverture latérale importante : la méthode L/h est privilégiée pour estimer la ligne d'eau au plein bord du chenal actif puis du corridor alluvial :
 - Hypothèses retenues : $L/h = 15$ (valeur réaliste pour un chenal actif torrentiel) et régime critique ($Fr \approx 1$), en cohérence avec la note RTM-INRAE (2025).
 - La hauteur d'eau h_{ref} est comparée aux hauteurs de berges du corridor alluvial. Le dépassement des berges du corridor alluvial est l'indicateur d'un risque de débordement vers les premiers enjeux situés hors bande active actuelle et ancienne.
- Secteurs plus confinés/encaissés (clusters 2 et 4) : la comparaison s'appuie prioritairement sur la méthode de comparaison entre les débits capacitifs Q_{cap} (estimés à partir de la loi de Frottement de Fergusson 2007 [48]) au plein bord du chenal actif et du corridor alluvial (géométrie réelle + pente locale) et les débits sollicitants.

Cette stratégie "à deux clés" permet d'être fidèle aux processus dominants : divagation/élargissement dans les secteurs ouverts (L/h) et capacité/encaissement dans les secteurs contraints (Fergusson_2007).

4.1.4.1 Niveaux d'eau avec le fonds actuel pour les crues de référence

Dans cette étape, les niveaux d'eau sont évalués sur le fonds actuel.

Crue de Novembre 2019_AMC2 / Rancure

La Figure 132 et Figure 133 présentent, pour la crue de novembre 2019 (AMC2), deux lectures complémentaires des niveaux d'eau sur fonds actuel. La Figure 132 compare la hauteur d'eau aux hauteurs de berges du chenal actif et du corridor alluvial. La Figure 133 compare le débit sollicitant 2019_AMC2 aux débits capacitifs calculés au plein bord (chenal actif et corridor alluvial). La convergence de ces deux approches, pondérée par la typologie (méthode L/h pour les secteurs ouverts, Q_{cap}/Q_{sol} pour les secteurs contraints), permet d'identifier les zones de débordement préférentiel (voir Figure 134).

Globalement, les tronçons identifiés recoupent de manière satisfaisante les débordements effectivement observés lors de l'évènement (Figure 134), avec toutefois quelques écarts locaux attendus au regard des incertitudes (non prise en compte de la modification des fonds, MNT/hauteurs de berge, pente locale, choix $L/h = 15$ et $D84 = 49$ mm).

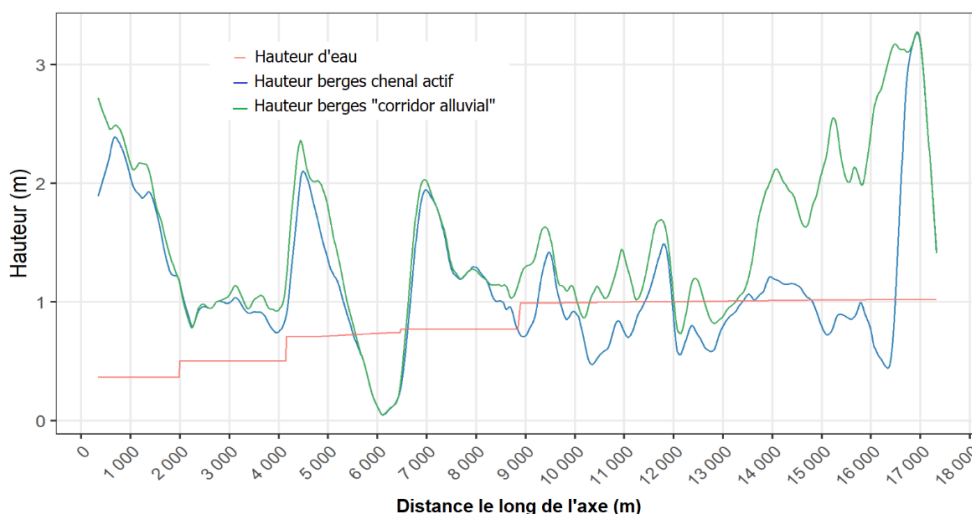


Figure 132 Hauteurs d'eau vs hauteurs de berges (crue de novembre 2019_AMC2) : profil longitudinal des hauteurs (m) le long de l'axe du Rancure. La forme en « marches d'escalier » résulte de l'augmentation des débits sollicitants au fil des confluences le long du cours d'eau.

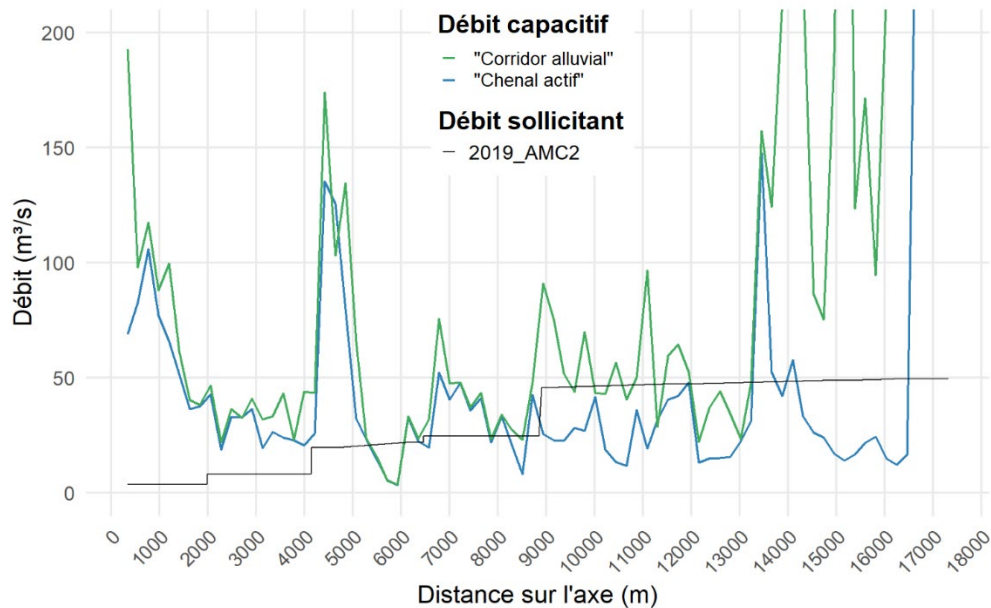


Figure 133 Débits capacitifs vs débit sollicitant (crue de novembre 2019 AMC2) : débits (m³/s) le long de l'axe du Rancure.

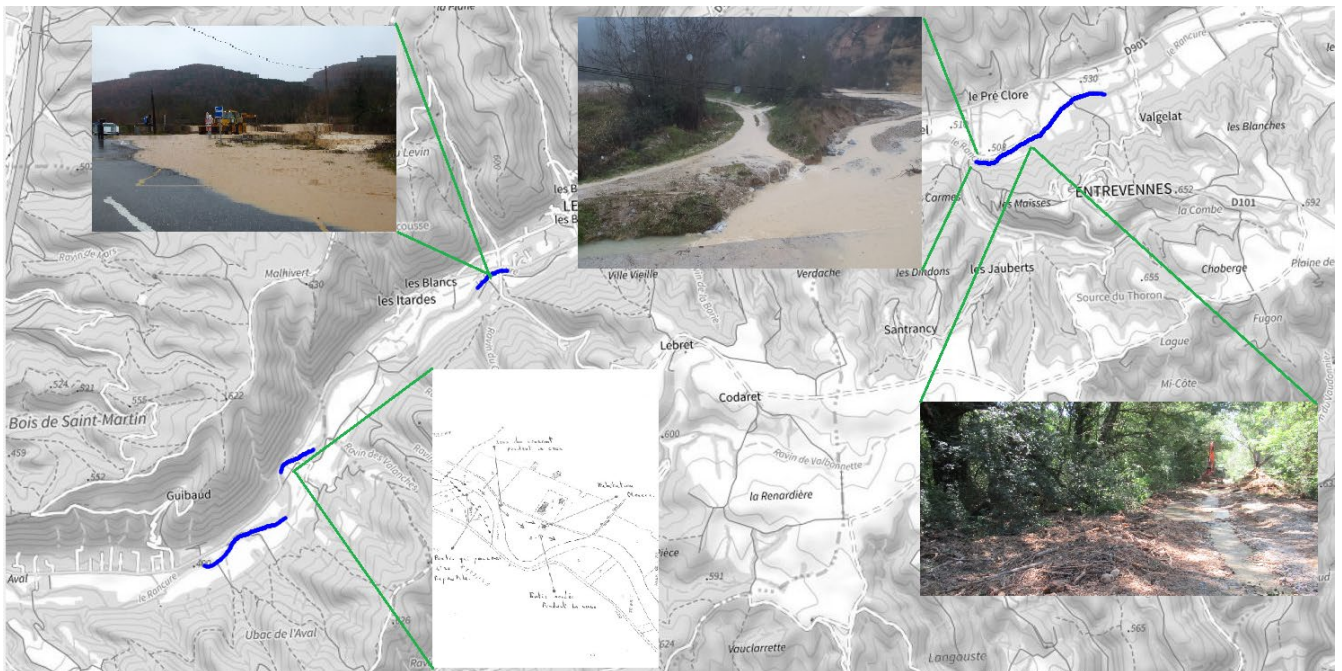


Figure 134 Zones de débordement préférentiel sur le Rancure, identifiées par l'analyse des écoulements pour la crue de novembre 2019 (AMC2) sur fonds actuel ; les vignettes photographiques géolocalisées illustrent des débordements effectivement observés lors de l'événement.

Crue de Novembre 2019_AMC2 / Puimichel

Comme pour le Rancure, la lecture conjointe des deux profils (Figure 135 et Figure 136) fait ressortir des secteurs de dépassement cohérents avec les retours d'évènement (Figure 137) :

- Partie aval : débordements répétés en amont de la confluence avec la Lague, notamment sur la RD 12 confirmés par les clichés.
- Amont du passage à gué de la RD 101 : dépassements en rives gauche et droite.

Dans l'ensemble, la cartographie (Figure 137) retrouve les zones effectivement inondées lors de l'épisode, notamment RD 12 – Lague et amont RD 101. Les écarts ponctuels s'expliquent par les incertitudes usuelles (non prise en compte de la modification des fonds, MNT et hauteurs de berge dérivées, pente locale, effets d'ouvrages/embâcles).

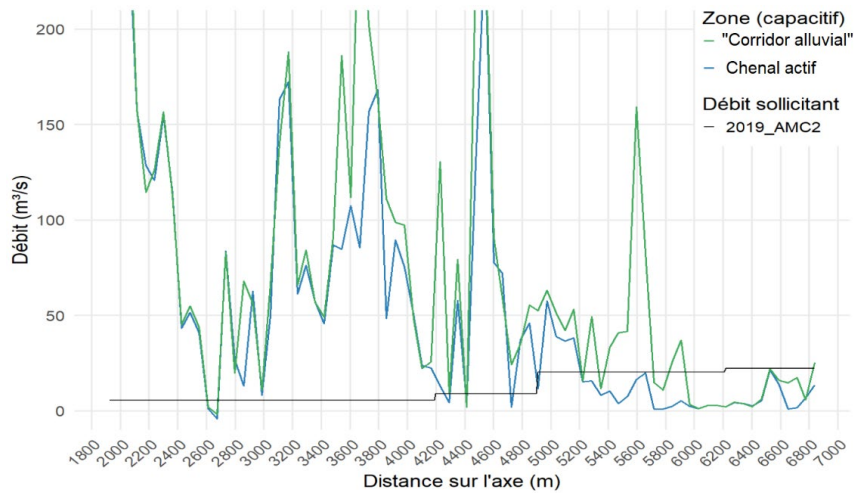


Figure 135 Débits capacitifs vs débit sollicitant (crue de novembre 2019 AMC2) : débits (m^3/s) le long de l'axe du Puimichel.

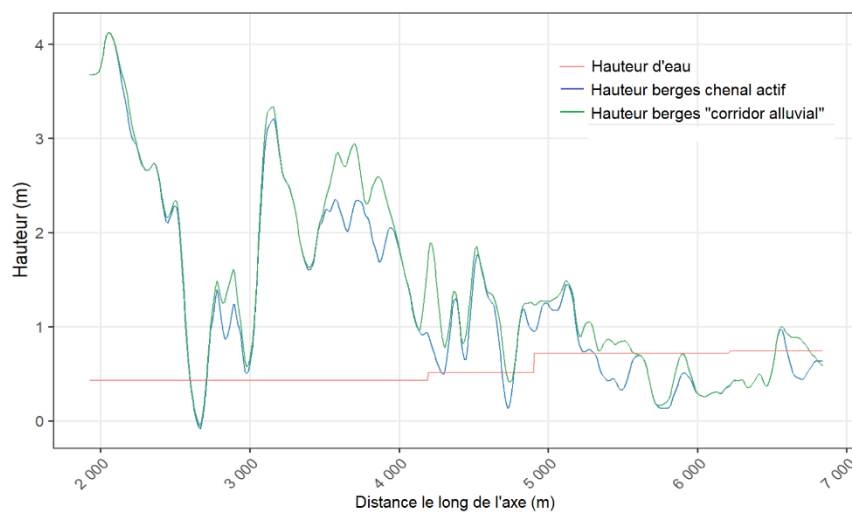


Figure 136 Hauteurs d'eau vs hauteurs de berges (crue de novembre 2019_AMC2) : profil longitudinal des hauteurs (m) le long de l'axe du Puimichel.

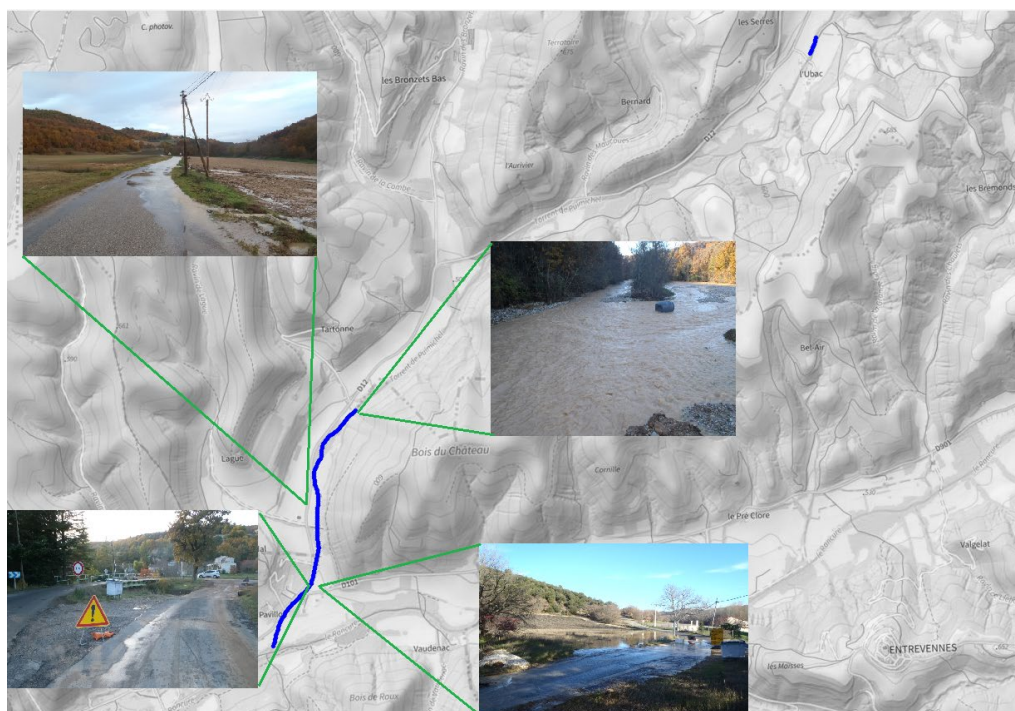


Figure 137 Zones de débordement préférentiel sur le Puimichel, identifiées par l'analyse des écoulements pour la crue de novembre 2019 (AMC2) sur fonds actuel ; les vignettes photographiques géolocalisées illustrent des débordements effectivement observés lors de l'événement.

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

Crue issue de l'analyse bivariable des pluies P100 (période de retour centennale) / Rancure

Pour la crue issue de l'analyse bivariable des pluies de période centennale (BivP100), l'évaluation des niveaux d'eau a été menée avec la même logique que pour la crue de novembre 2019 : dans les secteurs ouverts (divaguants), la ligne d'eau est obtenue par la méthode L/h (hypothèses : $L/h = 15$ et régime critique) cf. Figure 138 ; dans les secteurs confinés/encaissés, la comparaison porte sur les débits capacitifs Q_{cap} (loi de Ferguson, géométrie et pente locales) au plein bord du chenal actif et du corridor alluvial et le débit sollicitant $Q_{sol,BivQ100}$ (voir Figure 139).

Par rapport à la crue de novembre 2019 (AMC2) — que l'on peut rapprocher d'un événement décennal en termes de débit de pointe et de volume — l'analyse de la crue BivP100 met en évidence une extension nette des débordements. Outre les secteurs déjà repérés pour 2019, des débordements récurrents apparaissent depuis l'amont du gué d'Entrevennes jusqu'à l'entrée d'Oraison, notamment dans les tronçons divaguants (Figure 140). On observe notamment des débordements au droit de la traversée du Castellet, en particulier sur l'aval de cette traversée. À l'inverse, dans la traversée d'Oraison où le lit est plus encaissé/confiné, la capacité du corridor alluvial demeure globalement supérieure au débit sollicité, mais la marge Q_{cap}/Q_{sol} devient faible entre le pont Roman et le pont des Notaires, et notamment inférieure à l'incertitude sur le débit de crue centennale (Figure 141).

Enfin, on rappelle que ces analyses ont été menées sur fonds actuel ; la section suivante estime les niveaux d'eau et zones de débordement potentielles en considérant l'évolution systématique des fonds.

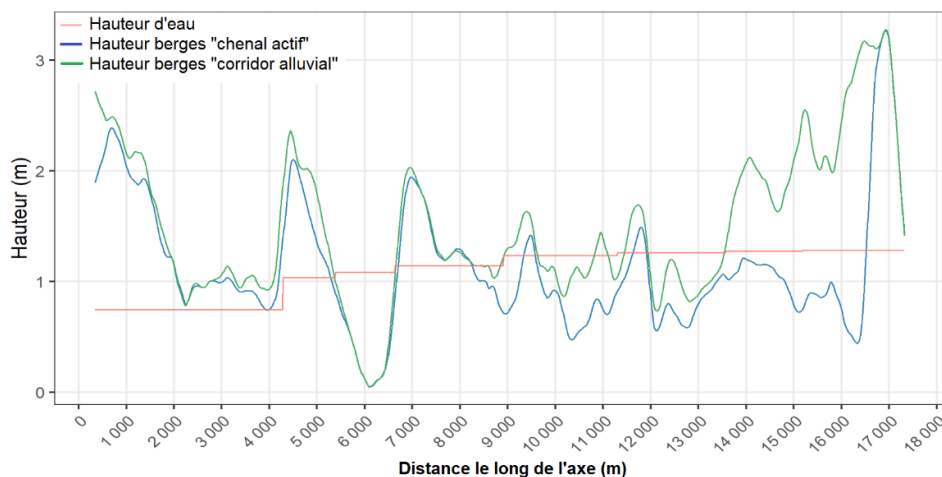


Figure 138 Hauteurs d'eau vs hauteurs de berges (crue issue de l'analyse bivariable des pluies BivP100) : profil longitudinal des hauteurs (m) le long de l'axe du Rancure

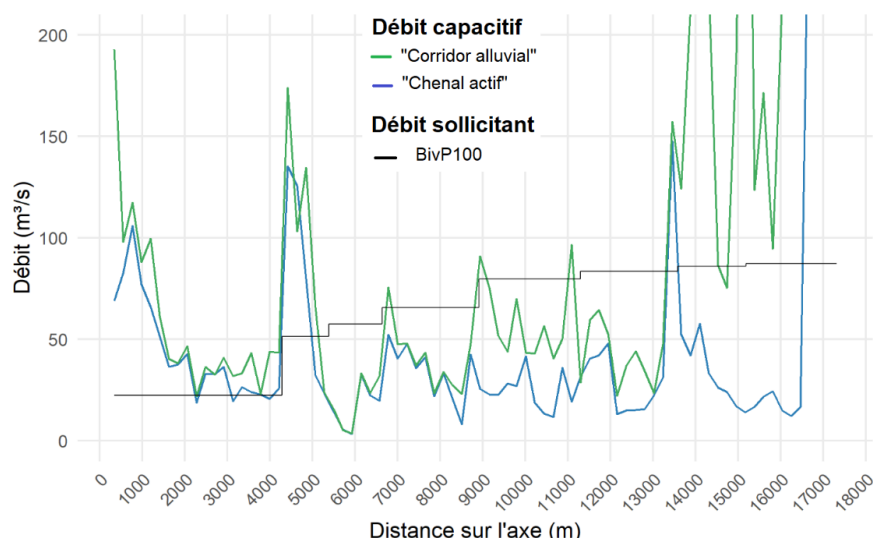


Figure 139 Débits capacitifs vs débit sollicitant (crue issue de l'analyse bivariable des pluies BivP100) : débits (m³/s) le long de l'axe du Rancure.

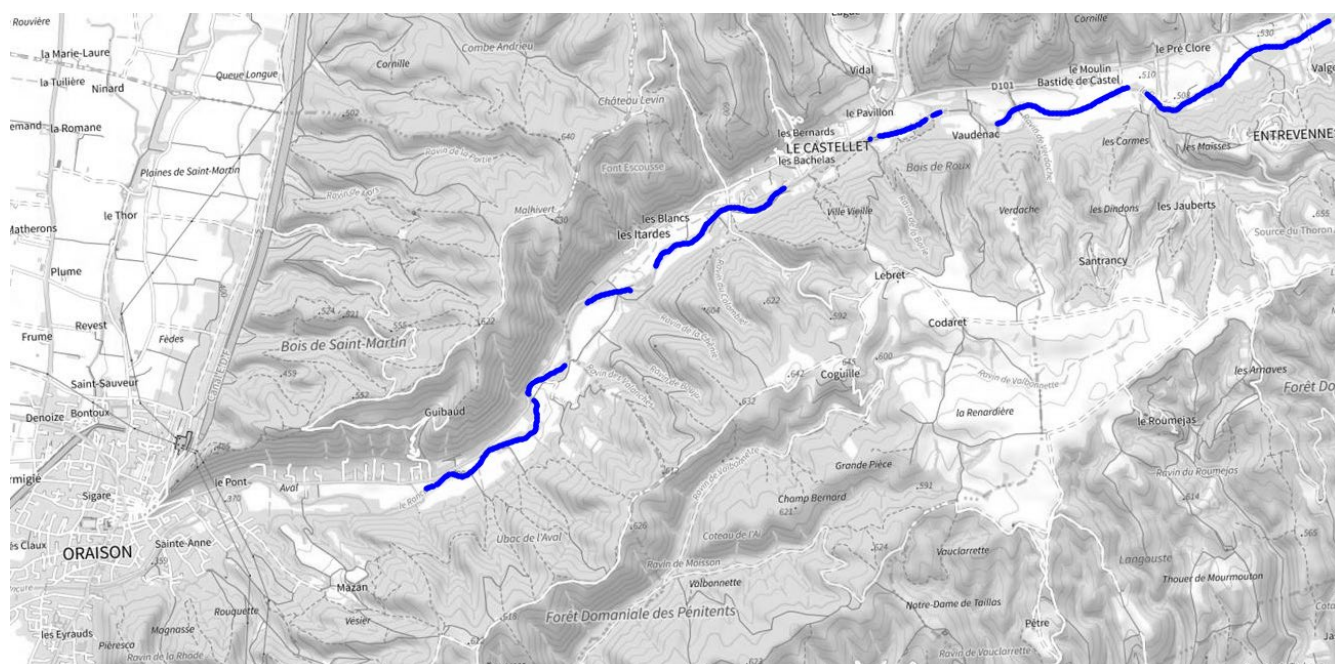


Figure 140 Zones de débordement préférentiel sur le Rancure, identifiées par l'analyse des écoulements pour la crue issue de l'analyse bivariée des pluies BivP100 sur fonds actuel.



Figure 141 Zones où le rapport entre le débit capacitif du corridor alluvial et le débit sollicitant issu de l'analyse bivariée des pluies BivP100 est supérieur à 1 mais avec une faible marge.

Crue issue de l'analyse bivariée des pluies P100 (période de retour centennale) / Puimichel

En appliquant la même lecture croisée que sur le Rancure (hauteurs d'eau vs hauteurs de berges et comparaison Q_{cap}/Q_{sol}), les profils (Figure 142 et Figure 143) et la carte présentés ci-après (Figure 144) mettent en évidence, par rapport à 2019_AMC2, une augmentation nette des zones de débordement potentiel sur le Puimichel.

Le secteur post-confluence du ravin des Bronzets jusqu'à la confluence avec le Rancure est le secteur le plus sensible où les zones de débordements observées en 2019 s'étendent à la fois vers l'amont et vers l'aval avec des débordements quasi généralisés sur cette portion.

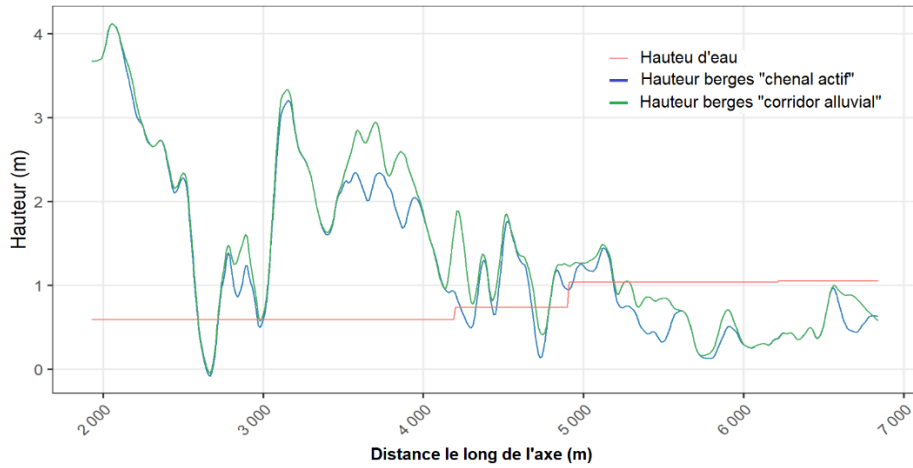


Figure 142 Hauteurs d'eau vs hauteurs de berges (crue issue de l'analyse bivariable des pluies BivP100) : profil longitudinal des hauteurs (m) le long de l'axe du Puimichel

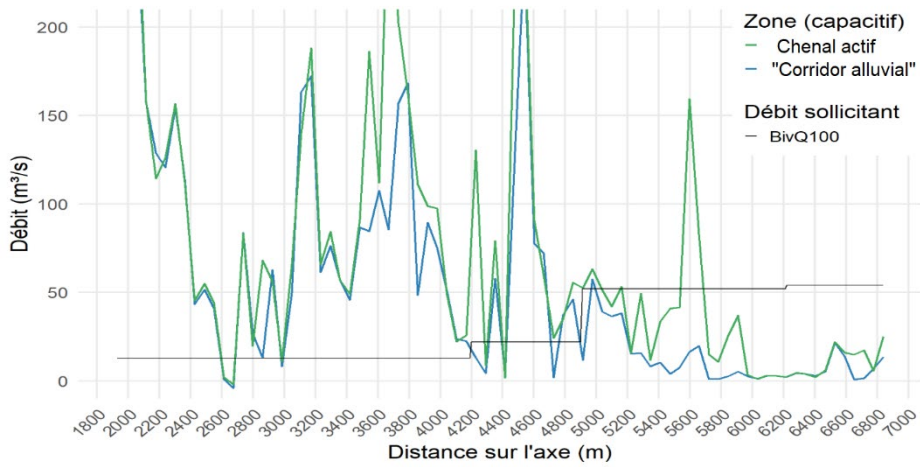


Figure 143 Débits capacitifs vs débit sollicitant (crue issue de l'analyse bivariable des pluies BivP100) : débits (m^3/s) le long de l'axe du Puimichel



Figure 144 Zones de débordement préférentiel sur le Puimichel, identifiées par l'analyse des écoulements pour la crue issue de l'analyse bivariable des pluies BivP100 sur fonds actuel.

4.1.4.2 Niveaux d'eau en considérant l'évolution systématique des fonds pour les crues de référence

Dans un contexte torrentiel, l'hypothèse de fonds fixes constitue une limite importante pour l'analyse hydraulique. Les crues morphogènes du Rancure et du Puimichel peuvent entraîner des dépôts ou des reprises de matériaux susceptibles de modifier localement la capacité hydraulique du lit. Afin d'intégrer cet effet sans recourir à une modélisation morphodynamique complète, une approche simplifiée a été mise en œuvre à partir des résultats de transport solide calculés avec BedloadWeb.

La méthode appliquée repose sur trois étapes (voir Figure 145) :

- Dans un premier temps, un exhaussement théorique du fond, noté Δz , est déterminé par tronçon. Lorsque la capacité de transport du tronçon aval est inférieure à celle du tronçon amont, le différentiel positif est interprété comme un volume potentiellement déposable. Ce volume est réparti sur la surface active du lit mineur, en tenant compte de la largeur du fond mineur et du pas longitudinal de calcul. L'exhaussement obtenu est plafonné par la hauteur disponible jusqu'au haut de berge afin d'éviter des valeurs physiquement incompatibles avec la géométrie du chenal.
- Dans un second temps, un traitement spécifique est appliqué au droit des ouvrages ou secteurs susceptibles de bloquer le transit. Dans ces secteurs, le dépôt n'est pas réparti de manière uniforme : un prisme d'engravement amont est ajouté pour représenter l'effet de remous solide induit par l'ouvrage. Ce prisme est décroissant vers l'amont et sa longueur d'influence dépend de la pente locale et d'un coefficient de réduction de pente, traduisant l'adoucissement progressif du profil de dépôt.
- Dans un troisième temps, les profils en travers sont reconstruits à partir du MNT. Le fond du lit mineur est relevé de la valeur Δz déterminée aux étapes précédentes, puis raccordé aux berges afin d'obtenir une géométrie modifiée cohérente avec la topographie réelle. Cette étape permet d'estimer un volume réellement déposé par intégration des surfaces modifiées sur les profils en travers.

Une marge de respiration torrentielle de 0,20 m est intégrée afin de tenir compte de la variabilité morphologique intra-crue.

La capacité hydraulique est ensuite réévaluée sur ces fonds modifiés selon la même logique que celle utilisée pour les fonds actuels. Pour les secteurs ouverts, l'analyse repose sur le critère RTM fondé sur le rapport largeur/hauteur critique. Pour les secteurs plus contraints ou encaissés, la capacité au plein bord est recalculée à partir de la géométrie modifiée et de la loi de frottement de Ferguson.

Crue de Novembre 2019_AMC2 / Rancure

Pour la crue de novembre 2019, l'analyse sur fonds actuels identifiait déjà plusieurs zones de débordement préférentiel sur le Rancure, en cohérence avec les observations de terrain disponibles pour cet événement. La Figure 146 montre que les secteurs de débordement préférentiel obtenus avec fonds modifiés s'inscrivent dans la continuité des zones observées ou identifiées sur fonds actuels, mais avec une extension plus importante du linéaire concerné. La prise en compte des fonds modifiés conduit à identifier environ 3,4 km supplémentaires de linéaire nouvellement débordant, portant le linéaire total sensible à environ 5,4 km.

Crue issue de l'analyse bivariée des pluies P100 (période de retour centennale) / Rancure

La prise en compte des fonds modifiés pour la crue BivP100 conduit également à une aggravation de la réponse hydraulique du Rancure. Les secteurs déjà identifiés comme débordants sur fonds actuels sont confirmés, mais les linéaires concernés deviennent plus continus et s'étendent sur plusieurs tronçons supplémentaires (voir Figure 147).

À l'aval, dans la traversée d'Oraison, le caractère plus encaissé et confiné du lit limitait les débordements généralisés dans l'analyse sur fonds actuels. Toutefois, cette analyse montrait déjà des

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

marges de sécurité hydraulique faibles entre le pont Roman et le pont des Notaires, avec des valeurs de capacité proches du débit sollicitant et parfois inférieures à l'incertitude associée au débit de crue centennale.

La prise en compte des fonds modifiés fait basculer ces secteurs limites en secteurs débordants. L'exhaussement du fond réduit la section hydraulique disponible et diminue la revanche jusqu'au haut de berge, ce qui suffit à rendre débordants des tronçons qui restaient encore contenus sur fonds actuels.

Ces résultats ne doivent pas être interprétés comme une prévision déterministe de l'évolution morphologique du lit lors des crues considérées. Ils constituent une analyse de sensibilité morpho-hydraulique, destinée à identifier les secteurs où la combinaison entre débit liquide, transport solide, dépôts potentiels et réduction de capacité hydraulique peut produire une aggravation des débordements.

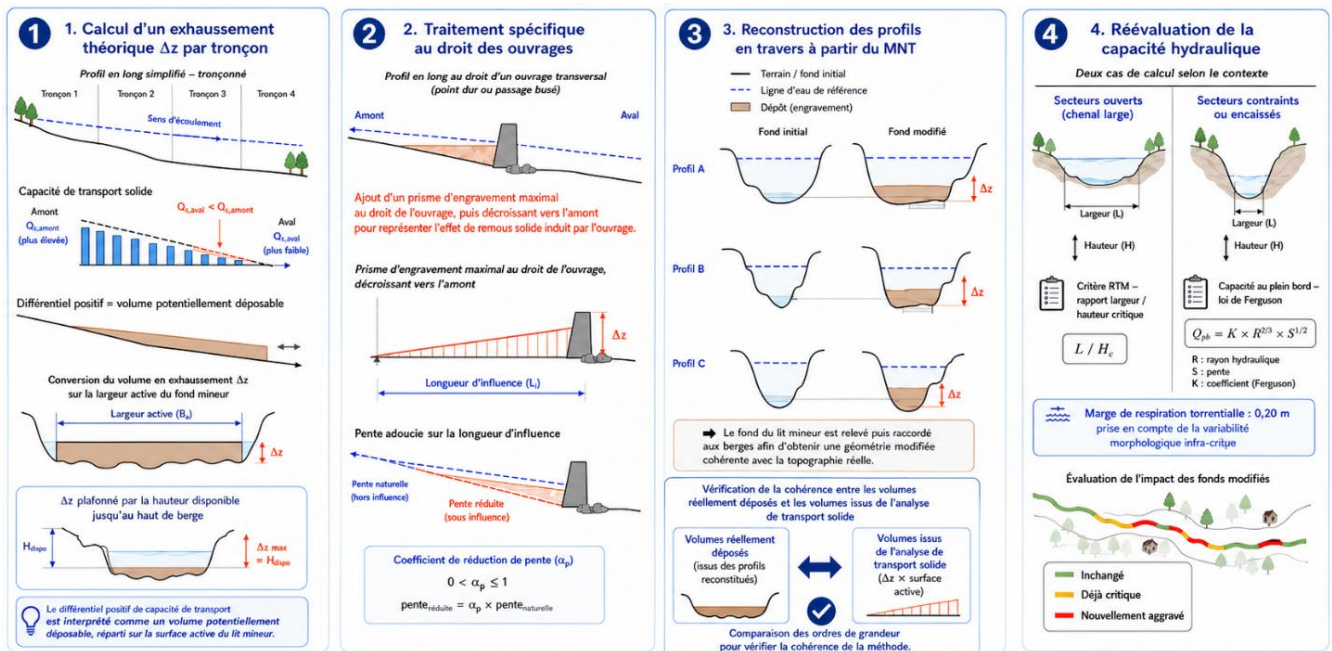


Figure 145 Méthode retenue pour l'analyse hydraulique en fonds modifiés

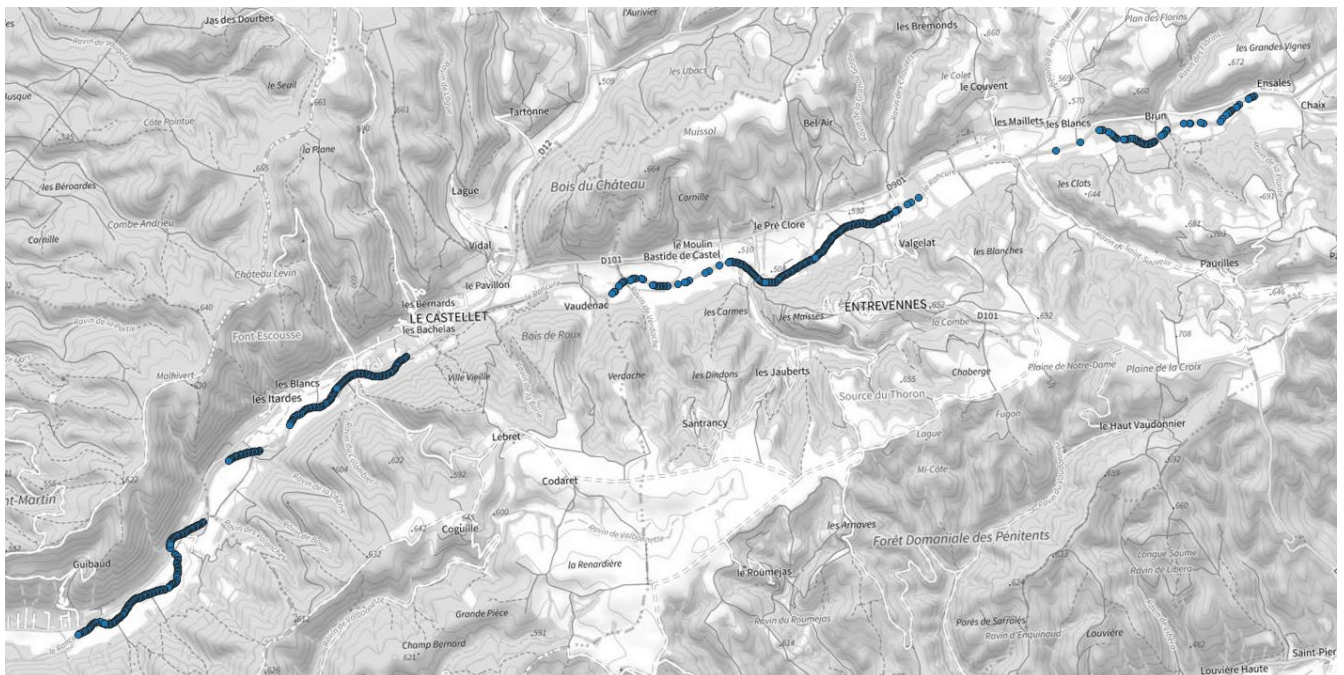


Figure 146 Zones de débordement préférentiel sur le Rancure, identifiées par l'analyse des écoulements pour la crue de novembre 2019 (AMC2) avec fonds modifiés.

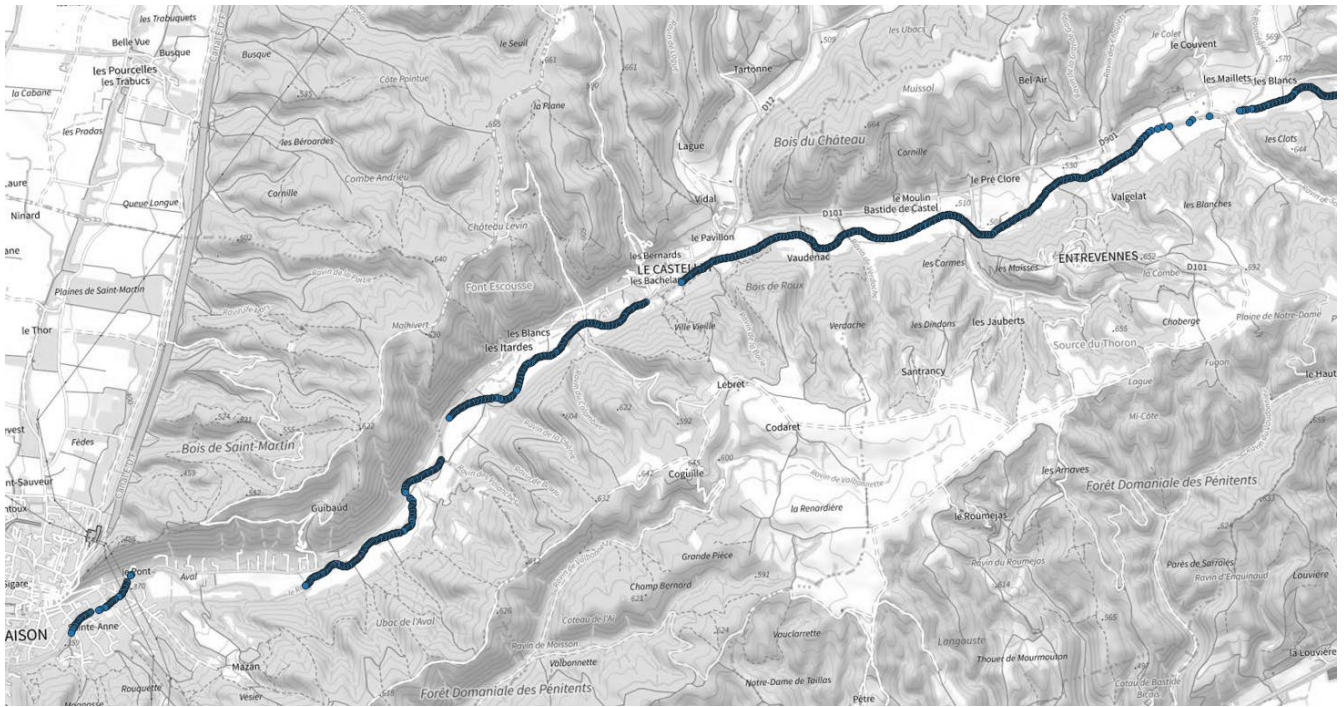


Figure 147 Zones de débordement préférentiel sur le Rancure, identifiées par l'analyse des écoulements pour la crue issue de l'analyse bivariée des pluies BivP100 sur fonds modifiés.

4.1.5 Synthèse sur les conditions d'écoulement

L'évaluation des conditions d'écoulement a permis de qualifier les configurations hydromorphologiques le long du Rancure et du Puimichel afin d'identifier les processus dominants et les zones sensibles aux débordements. L'approche a consisté à analyser conjointement le chenal actif actuel et le corridor alluvial hérité (terrasses anciennes) à l'aide d'indicateurs clés tels que la contrainte de capacité hydraulique (Q_{ref}/Q_{cap}), le rapport d'aspect (L/h) ou encore l'ouverture latérale.

Cette analyse a abouti à une classification du linéaire en quatre grands clusters hydromorphologiques aux comportements distincts :

- Cluster 1 (rouge) : lits divaguants, larges et peu contraints, à dynamique latérale potentiellement marquée.
- Cluster 2 (vert) : lits confinés, plus étroits et encaissés, notamment dans les traversées urbanisées comme Oraison.
- Cluster 3 (bleu) : lits aggradés "en toit", où la faible capacité du chenal favorise les dépôts et les débordements précoces.
- Cluster 4 (violet) : lits incisés ou encaissés, plus stables et dominés par la pente longitudinale.

En appliquant des stratégies de calcul adaptées à chaque cluster (méthode L/h pour les secteurs ouverts, Débit Capacitif/Débit Sollicitant pour les secteurs contraints), cette classification a permis d'identifier les points de débordement préférentiels pour les crues de référence (novembre 2019/décennale et centennale), en cohérence avec les observations historiques.

4.2 Apport de la modélisation hydraulique 2D

La modélisation hydraulique 2D vient consolider la lecture en profil longitudinal et spatialiser les écoulements lorsque le lit déborde : chemins préférentiels, interactions avec les voiries, réservoirs latéraux, points bas urbains. Elle est ici conduite sur fonds fixe. Cette démarche n'a pas vocation à reproduire la dynamique morphologique torrentielle ; elle fournit, en revanche, une cartographie des zones d'écoulement potentielles après débordement

4.2.1 Intérêts et limites de la modélisation hydraulique 2D à fonds fixe

4.2.1.1 Limites intrinsèques du « fonds fixe » en contexte torrentiel

Absence d'ajustement morphologique :

Le modèle 2D fonctionne sur un relief figé : il n'intègre ni l'incision, ni l'aggradation, ni le ravinement ou l'auto-chenalisation (fréquents pour des vitesses $V \geq 2$ m/s sur sols érodables), ni l'érosion/recul de berge ou les contournements d'obstacles. En pratique, là où la dynamique torrentielle pourrait concentrer rapidement sur de fortes pentes les écoulements à forte énergie dans des chenaux naissants, le modèle a tendance à les étaler sur des largeurs excessives.

Transports solides et embâcles non représentés :

Les effets du transit sédimentaire (pertes de capacité, colmatage local, rehaussement de talweg) et la formation d'embâcles aux ouvrages (ponts, gués) ne sont pas modélisés de manière dynamique ; ils ne sont qu'indirectement pris en compte via la topographie initiale ou modifiée. Or ces effets peuvent modifier en quelques minutes le régime d'écoulement et redistribuer les hauteurs. En conséquence, le modèle peut sous-estimer les surcotes amont d'un bouchon ou, à l'inverse, surestimer des débordements là où un curage/érosion créerait une concentration effective des flux.

4.2.1.2 Intérêts

En complément de l'analyse morpho-hydraulique en profil longitudinal, la modélisation 2D à fonds fixe est mobilisée pour affiner les points sensibles repérés : elle peut être utile pour reconstituer la continuité spatiale des débordements dans le fond de vallée, en suivant les connexions entre champs, fossés, chemins et voiries.

En outre, la modélisation hydraulique 2D permet d'anticiper les chemins préférentiels et les zones d'accumulation (points bas, dépressions, cuvettes). Elle est particulièrement pertinente en contexte urbain et périurbain, où la micro-topographie des voiries structure fortement les écoulements de surface et gouverne les mises en charge locales, ainsi que dans les larges plaines alluviales à faible pente.

4.2.2 Présentation de Cartino 2D et de la stratégie de modélisation

4.2.2.1 Méthode Cartino 2D

Le principe de la méthode Cartino2D [18] est de réaliser de manière semi-automatique des modélisations hydrauliques à surface libre basées sur l'outil Telemac2D, sur des secteurs en utilisant divers forçages (pluie et/ou des débits).

La procédure Cartino2D s'appuie sur plusieurs étapes successives automatisées permettant in fine d'obtenir une cartographie de l'aléa inondation « ruissellement » et « débordement de cours d'eau » sur l'ensemble d'un territoire donné. Ces notions internes à la méthode Cartino2D ne sont pas à confondre avec leur définition réglementaire en termes d'aléa inondation. Ces étapes sont résumées dans le Tableau 27.

La procédure Cartino2D s'appuie notamment sur la bibliothèque PPUtills [53] utilisant le mailleur GMSH [54]. Le traitement des données vecteurs et raster est effectué avec les logiciels R [55] et GRASS [56].

Concernant les calculs hydrauliques réalisés via Telemac 2D, les paramètres à renseigner sont les suivants :

- Cartographie des Curve Number_CN (modèle SCS_USDA) pour la partie « fonction de production » de la modélisation. Il est également possible d'injecter une pluie déjà abattue (le CN est alors égal à 100). La méthode SCS-CN (Soil Conservation Service - Curve Number), intégrée dans le module d'infiltration distribué de TELEMAC 2D, est détaillé à la partie 2.2.2.2.
- Cartographie des coefficients de Strickler pour la partie « fonction de transfert » de la modélisation.

Les rasters Strickler (rugosité hydraulique) et CN (Curve Number SCS) sont produits à partir de l'occupation des sols :

- OCS GE® (Occupation du Sol Grande Échelle) : base principale pour le CN et certaines classes de Strickler.
- BD TOPO® (IGN) : réseaux et emprises (routes, ferroviaire, bâti, plans d'eau) utilisés notamment pour la rugosité.

Un jeu de règles d'affectation associe à chaque classe d'occupation du sol ou objet linéaire (routes, voies ferrées, etc.) une valeur de paramètre. Ces règles définissent aussi une hiérarchie de priorité (superposition) afin que les objets les plus structurants (ex. emprises routières tamponnées) prévalent sur le fond d'occupation diffuse. Les données sont normalisées, projetées et rasterisées à une résolution cible, puis agrégées pour former un champ continu.

Les cartographies des Curve Numbers (CN) et des coefficients de frottement (Strickler) utilisées pour la modélisation hydraulique 2D du bassin versant du Rancure sont présentées à la Figure 148 et Figure 149. Pour le CN, le type de sol considéré dans la méthode est le C.

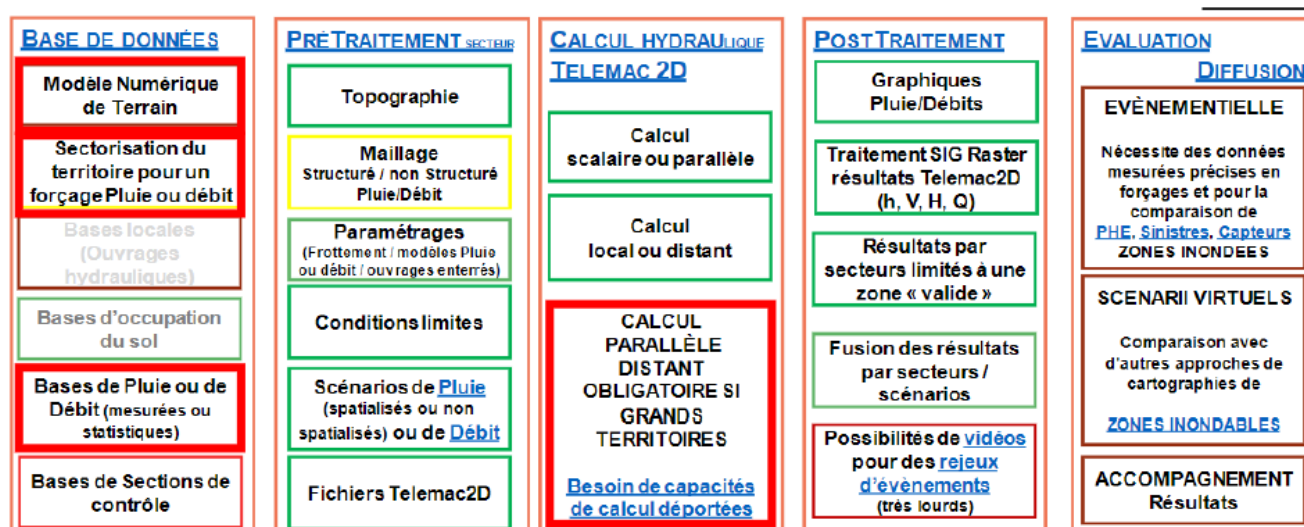


Tableau 27 Principes de la procédure Cartino2D (Pons et al., 2024)

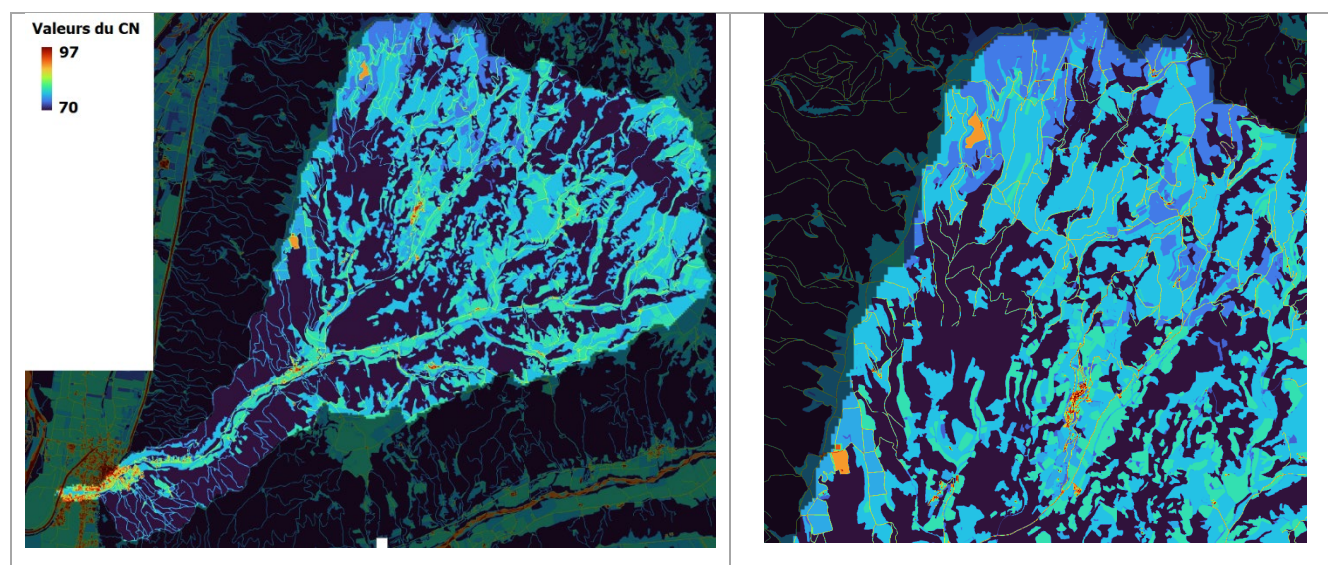


Figure 148 Cartographie du Curve Number : bassin versant du Rancure (à gauche) ; zoom sur l'amont du bassin versant du Puimichel (à droite)

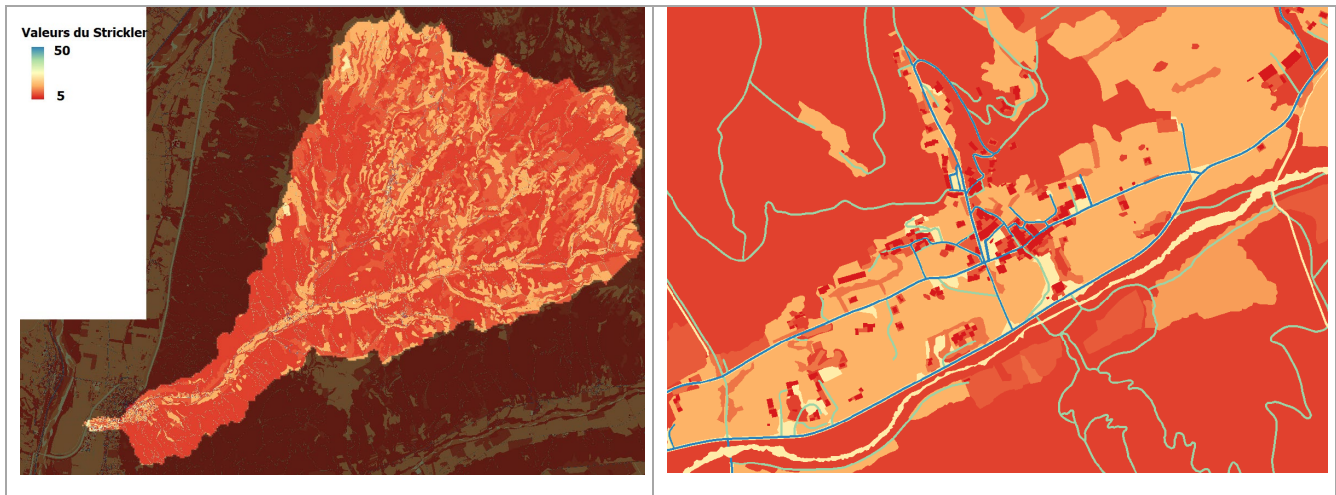


Figure 149 Cartographie du coefficient de frottement (Strickler) : bassin versant du Rancure (à gauche) ; zoom sur le village du Castellet (à droite)

4.2.2.2 Description des modèles

Dans le cadre de l'analyse du bassin versant du Rancure, trois modèles 2D complémentaires ont été développés :

- **Modèle 25 m (échelle bassin versant)**

Modèle hydraulique-hydrologique construit sur un MNT rééchantillonné au pas de 25 m (voir Figure 150), couvrant tout le bassin versant du Rancure. Faute de station hydrométrique sur le Rancure, la calibration a été réalisée sur la station de l'Asse à Chabrières, disposant de chroniques fiables (cf. § 2.2.2.2). L'objectif est d'estimer les débits en différents points du bassin. La calibration a permis d'établir une relation probabiliste entre l'indice SWI de la chaîne SIM de Météo France et les classes d'humidité initiale AMC1/2/3 : une régression logistique multinomiale fournit, à partir du SWI, la probabilité d'appartenir à chaque classe, utilisée ensuite pour paramétrer les épisodes simulés.

- **Modèle fin complet (échelle bassin versant)** : maillage fin déstructuré (3 m dans les axes d'écoulement / 25 m ailleurs)

Ce modèle intègre conjointement le ruissellement et le débordement des cours d'eau. Les zones d'affinement_3 m (voir Figure 150) sont définies à partir des résultats du modèle 25 m sur un scénario de pluie extrême (type événement millénaire). Le modèle est d'abord confronté à des événements documentés. Il sert ensuite de référence détaillée pour l'évaluation de scénarios.

- **Modèle fin en forçage débit (focalisé Rancure + affluent Puimichel)**

Centré sur les tronçons principaux (voir Figure 151), il réduit l'emprise et donc le temps de calcul. Les hydrogrammes aux limites proviennent du modèle 25 m (calé), ce qui permet de tester rapidement différents forçages sans re-simuler l'infiltration. Le couplage "25 m calé → forçage débit" diminue l'incertitude par rapport à un unique modèle fin intégral, qui ne peut pas être calibré à l'échelle du grand bassin de l'Asse.

Chaque scénario est ainsi examiné en double approche : (i) via le modèle fin complet, et (ii) via la chaîne "25 m calé + modèle en forçage débit". Cette redondance fournit une fourchette d'emprises inondables et de résultats (débits/vitesses/niveaux), permettant d'encadrer l'incertitude.

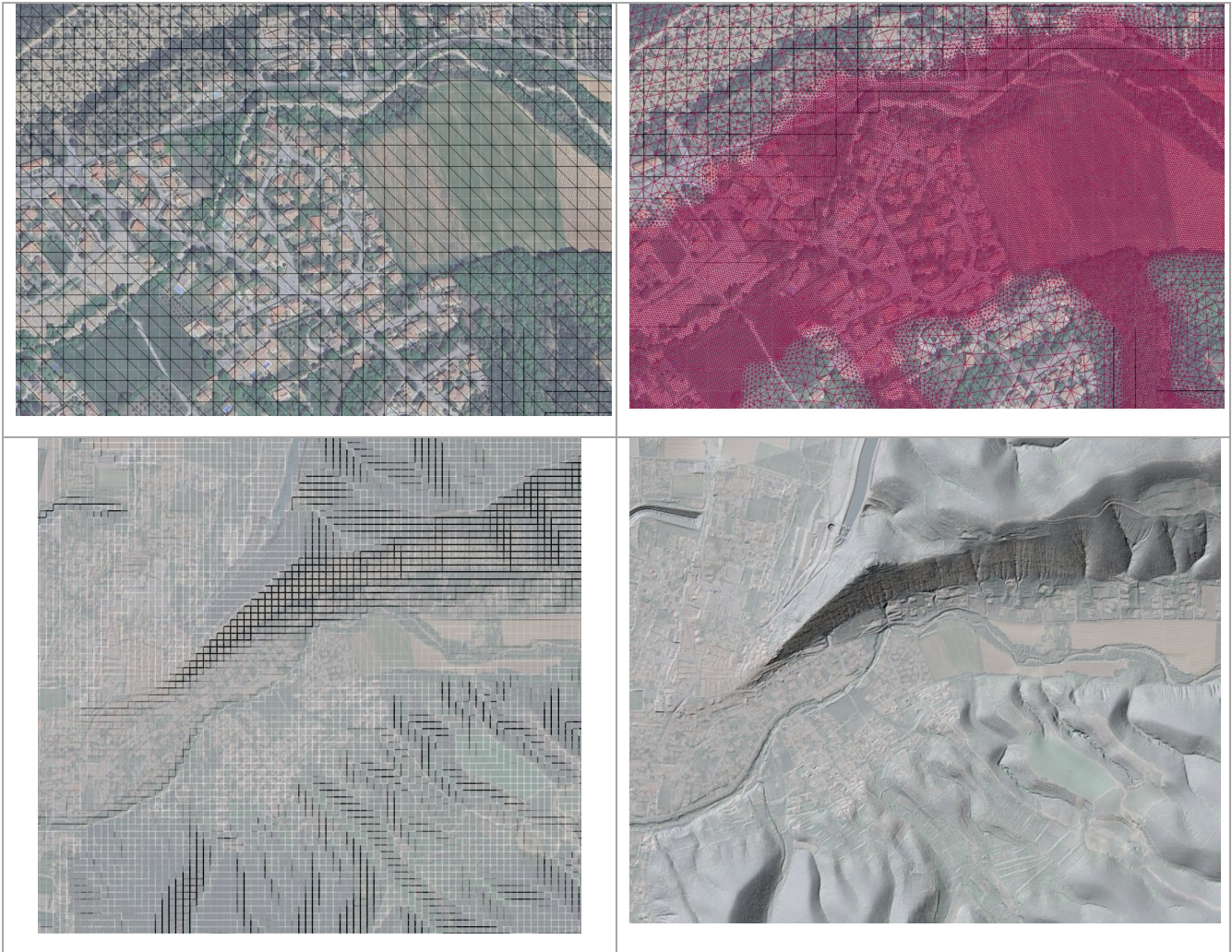


Figure 150 Exemples de maillage (en haut) et d'échantillonnage du MNT (en bas) sur le Rancure à l'entrée d'Oraison : maillage et échantillonnage du MNT à 25 m (à gauche) ; maillage et échantillonnage du MNT fin et déstructuré (à droite)

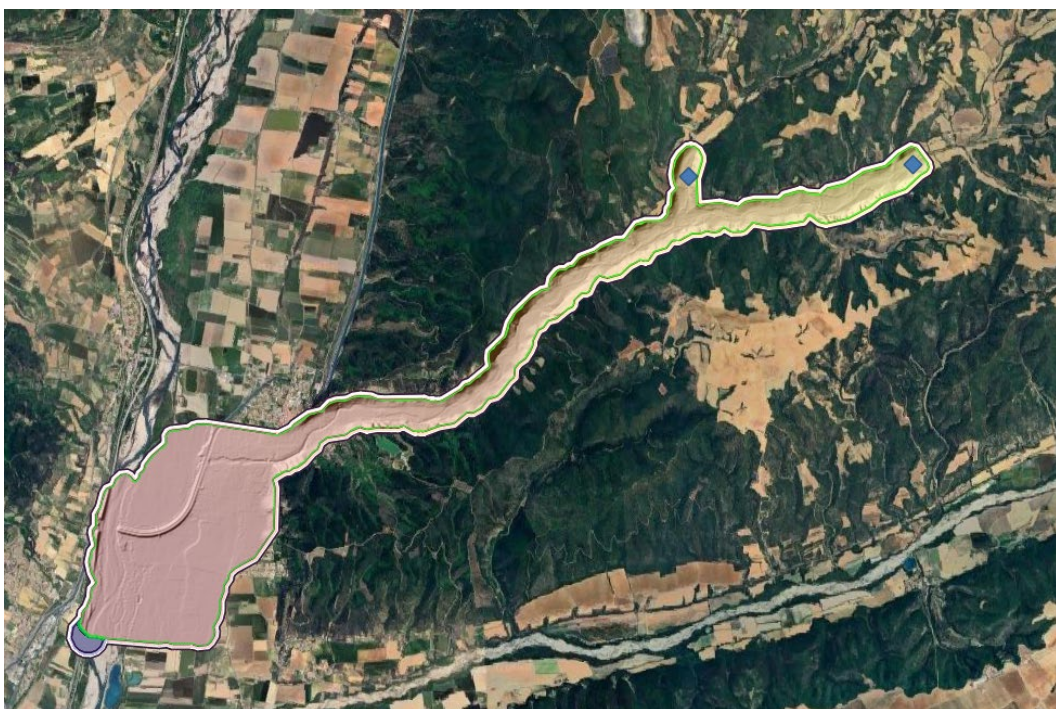


Figure 151 Emprise du modèle fin en forçage débit (Rancure et Puimichel)

4.2.2.3 Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été établi à partir du nuage de points classifiés du LiDAR HD de l'IGN (<https://geoservices.ign.fr/lidarhd>).

Dans certaines zones avec une végétation dense, la densité de points qualifiés de « sol » du LiDAR HD de l'IGN est insuffisante, ce qui peut dégrader la qualité du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Pour pallier ces manques, la chaîne FILINO ([57]) intègre des points sol issus de campagnes LiDAR plus anciennes, notamment le produit NUALID de l'IGN (<https://geoservices.ign.fr/nualid>), lorsque ces données sont disponibles sur le secteur. Les données issues des anciens levés LiDAR présentent généralement une densité de points brute plus faible que celle du LiDAR HD. Toutefois, ces acquisitions ayant été réalisées en période hivernale, le couvert végétal y était moins dense, ce qui permet d'obtenir un nombre de points « sol » plus important dans les zones fortement boisées.

Lorsque les données NUALID recouvrent ces zones, les points « sol » correspondants sont extraits et reclassés pour constituer des points virtuels. Ces points viennent compléter le nuage LiDAR HD dans les zones où les retours « sol » sont rares.

Le MNT final est ensuite construit par interpolation TIN en combinant les points LiDAR HD et les points virtuels. Cette approche améliore la continuité topographique, limite les artefacts liés au manque de points « sol » et permet d'obtenir un modèle de terrain plus précis et plus fiable, en particulier dans les secteurs avec une végétation dense.

La Figure 152 illustre l'amélioration apportée par la chaîne FILINO sur la précision du Modèle Numérique de Terrain (MNT) dans deux zones : confluence entre le Rancure et le Puimichel ainsi que la confluence entre le Lague et le Puimichel. L'utilisation des points sol issus des anciens jeux LiDAR (produit NUALID) permet de mieux restituer la topographie dans les zones de berges fortement végétalisées, où le LiDAR HD présentait des lacunes. L'amélioration est également visible sur certains champs cultivés où la classification initiale du LiDAR HD pouvait conduire à des surestimations d'altitude.





Figure 152 Différence d'altitude entre le MNT issu du traitement FILINO et le mNT issu d'une interpolation TIN uniquement à partir des points « sol » du LIDAR HD

4.2.2.4 Lignes de contrainte et points singuliers

Afin de représenter de manière réaliste les zones de débordement potentielles dans la modélisation hydraulique, des lignes de contrainte ont été introduites dans le maillage. Ces contraintes visent à assurer une bonne prise en compte des structures naturelles et anthropiques qui conditionnent l'écoulement.

En premier lieu, des lignes de contrainte ont été placées le long des hauts de berges des terrasses anciennes, correspondant aux limites de l'espace de divagation. Ce choix répond à une logique de représentativité hydraulique, car ce sont au-delà de ces berges que se situent les principaux enjeux (zones urbanisées, infrastructures, terrains agricoles). La précision apportée sur ces éléments permet donc de mieux caractériser les débordements et leurs conséquences.

Dans une logique de comparaison des résultats des simulations numériques par rapport aux observations réalisées sur les événements historiques rejoués et documentés, des contraintes supplémentaires ont été intégrées afin de traduire certains ouvrages structurants en place lors des crues passées. Il s'agit notamment des murs de protection relevés par géomètre (cf. § 3.2.4.2), dont l'influence et le comportement ont été observés lors des crues de 1998, 2014 et 2019 : ils ont tenu face aux sollicitations, et leur prise en compte permet de reproduire fidèlement les emprises d'inondation constatées. Ce choix ne préjuge cependant pas de leur résistance future, en particulier pour des événements plus intenses que ceux déjà observés.

Enfin, les lignes de contrainte intègrent également les hauts des talus routiers, lorsque ceux-ci ont été relevés, ainsi que les ouvrages de franchissement (ponts et passerelles), dont la présence structure localement l'écoulement.

L'ensemble de ces éléments est illustré à la Figure 153, où les différentes catégories de contraintes sont représentées par un code couleur (orange : hauts de berges, bleu : murs de protection, rouge : ponts, mauve : talus routiers relevés).

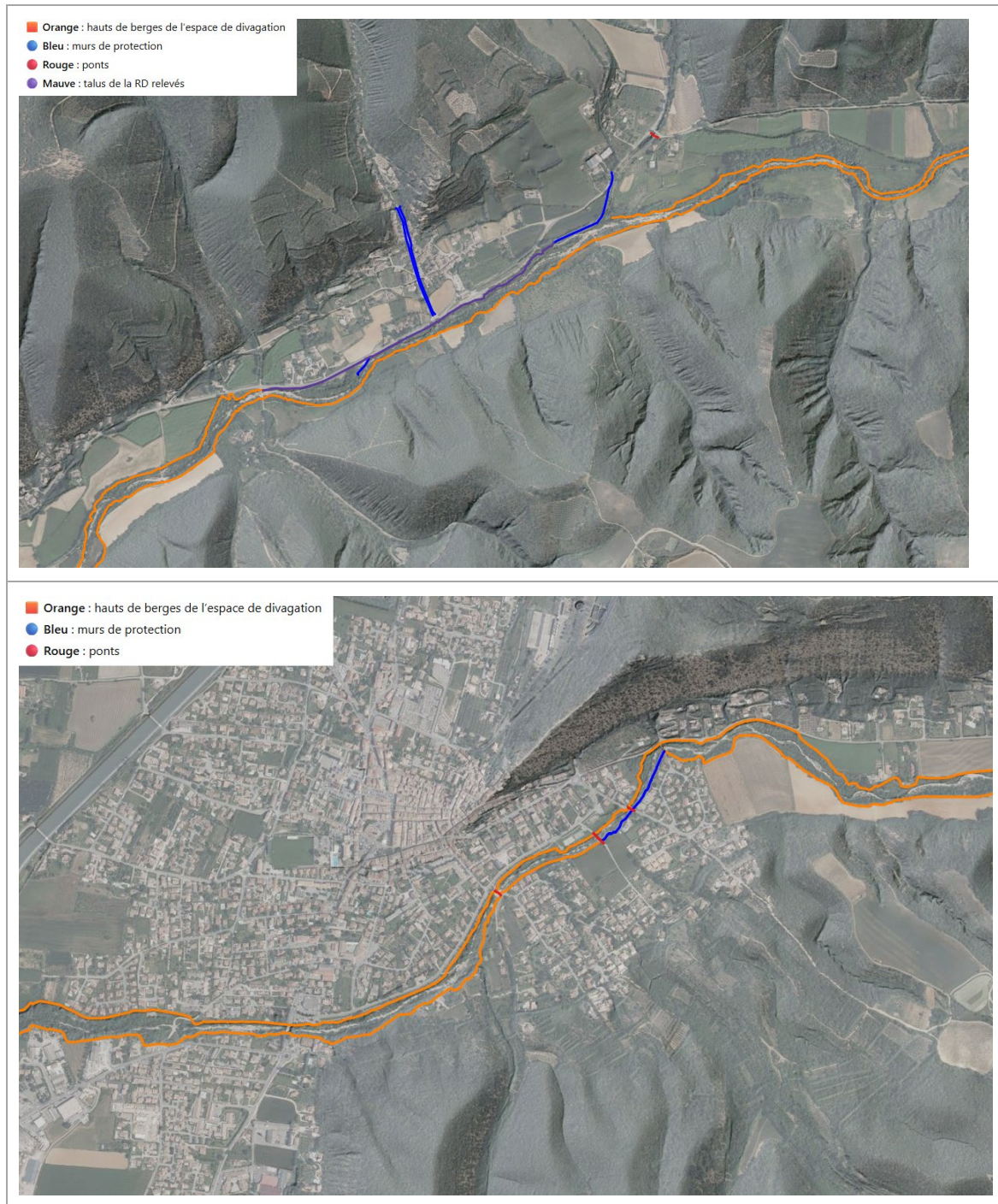


Figure 153 Localisation des lignes de contrainte intégrées dans le modèle hydraulique.

4.2.3 Simulation d'événements historiques documentés

Il est nécessaire, dans un premier temps, de confronter les modèles développés à des événements historiques documentés. La sélection des épisodes s'appuie sur (i) la disponibilité de lames d'eau spatialisées de précision suffisante — base COMEPHORE (disponible depuis janvier 1997) — et (ii) l'existence d'observations de terrain adéquates (cf. §2.2.2.3).

Les événements retenus sont :

- 16 août 1998 : épisode intense et de courte durée (< 6 h), touchant principalement le bassin du Puimichel ;
- Mi-janvier 2014 : épisode long (> 24 h) d'intensité modérée, affectant surtout l'aval du Rancure et la commune d'Oraison ;
- Fin novembre 2019 : épisode long (> 48 h) d'intensité modérée, impactant de manière relativement homogène l'ensemble du bassin du Rancure.

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

Pour chacun de ces épisodes, nous disposons des champs de pluie COMEPHORE ainsi que d'observations de terrain (cf. §2.2.2.3).

4.2.3.1 *Caractérisation de l'aléa pluviométrique des événements sélectionnés*

L'analyse de l'aléa pluviométrique associé aux trois événements choisis porte principalement sur l'exploitation des données issues du produit COMEPHORE de Météo-France, au pas de temps horaire, complétée par une mise en regard avec les valeurs de référence du référentiel SHYREG. Ce croisement permet de qualifier les niveaux d'excès pluviométrique atteints pendant l'épisode, en termes de périodes de retour.

Les données COMEPHORE sont compilées pour reconstituer la dynamique temporelle des précipitations au cours des trois épisodes. Une analyse par pas de temps glissant est mise en œuvre pour différentes durées caractéristiques (de 1h à 48 h), correspondant aux pas de temps utilisés dans les référentiels SHYREG. Cette méthode consiste à calculer, pour chaque pixel, le cumul maximal de pluie obtenu sur une fenêtre temporelle mobile de durée donnée, permettant d'identifier les intensités maximales effectivement atteintes sur le territoire.

Ces cumuls sont ensuite interpolés sur la grille des données SHYREG pour permettre une comparaison directe. Pour chaque durée, les cumuls observés sont confrontés aux quantiles SHYREG disponibles pour plusieurs périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50, 100, 500 et 1000 ans). À partir de cette confrontation, une cartographie des périodes de retour associées aux intensités observées est produite pour chaque durée d'analyse : voir un exemple à la Figure 155, et pour les trois épisodes retenus. L'objectif est de traduire spatialement l'intensité et l'extension de l'aléa pluviométrique à travers des cartes de période de retour.

Une seconde analyse permet de compléter l'approche cartographique par une analyse à l'échelle du bassin versant du Rancure et de ses sous-bassins. Pour chaque bassin versant considéré (cf. §2.2.1), les données pluviométriques sont intégrées sur l'ensemble de chaque épisode pour reconstituer des chroniques horaires de pluie moyenne. Ces chroniques sont ensuite traitées par pas de temps glissant afin d'identifier, pour chaque durée de référence SHYREG (1 h à 24 h), le cumul maximal effectivement observé dans le bassin.

Parallèlement, les valeurs de pluie SHYREG de référence sont extraites pour chaque bassin à partir de leur centroïde, puis corrigées à l'aide de la méthode d'abattement Neppel (2003) [58], en tenant compte de la surface du bassin et de la durée considérée. Ce traitement fournit, pour chaque durée et période de retour (2 à 1000 ans), les valeurs de référence abattues et non abattues, ainsi que le coefficient d'abattement appliqué : voir un exemple à la Figure 156, et pour chacun des épisodes.

Evènement du 16 août 1998

Les Figure 154, Figure 155 et Figure 156 illustrent successivement : (i) la répartition spatiale des cumuls maximaux pour différentes durées, (ii) leur traduction en termes de périodes de retour, et (iii) l'analyse hydrologique associée réalisée à partir des pluies de bassin.

L'épisode pluvieux du 16 août 1998 constitue l'un des événements marquants pour le bassin versant du Rancure. D'après les données issues du produit COMEPHORE et les observations disponibles, il s'agit d'un orage intense de courte durée, principalement localisé sur le bassin amont du Puimichel et du Rancure. L'événement se distingue par des cumuls horaires très élevés et des intensités maximales concentrées sur un laps de temps restreint (moins de 6 heures).

Cet épisode se caractérise par des pluies intenses et localisées, atteignant 50 à 80 mm en 1h, plus de 90 mm en 3h et jusqu'à 130 mm en 6h sur les secteurs amont. Les cartes des périodes de retour confirment le caractère exceptionnel de l'événement, avec des TR atteignant localement plus de 100 ans sur 1h, 3h et 6h. Ces résultats mettent en évidence une forte hétérogénéité spatiale et une intensité extrême sur le haut du bassin versant du Puimichel, générant des apports rapides et concentrés susceptibles d'amplifier la réponse hydrologique.

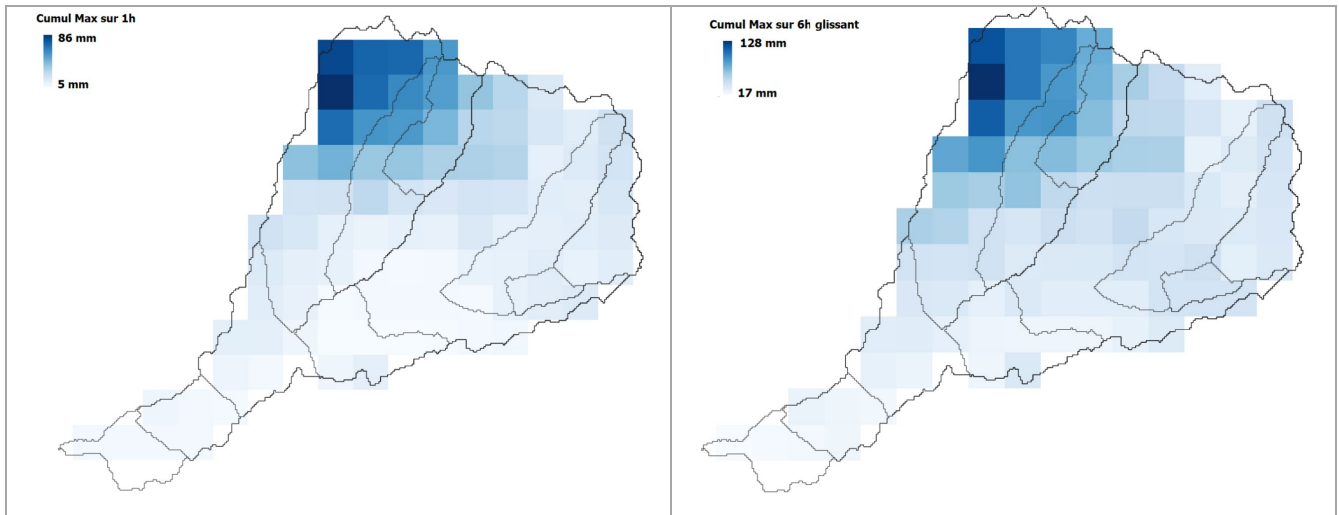


Figure 154 Cartographie des cumuls maximaux de précipitations enregistrés lors de l'épisode du 16 août 1998, calculés sur des pas de temps glissants de 1h (à gauche) et 6h (à droite)

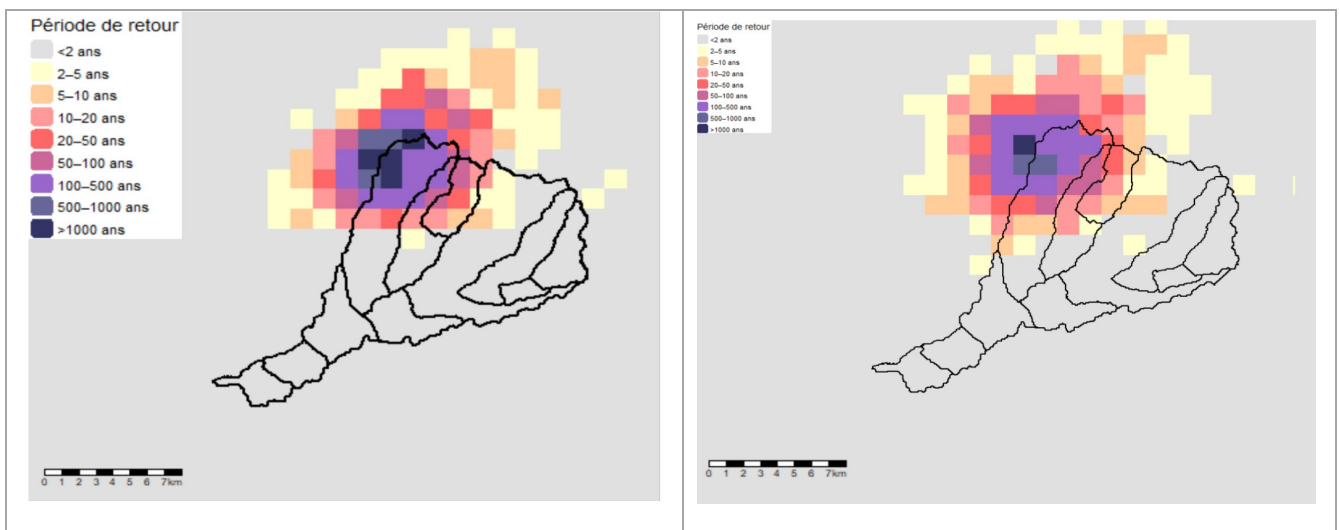


Figure 155 Cartographie des périodes de retour associées aux cumuls maximaux de précipitations de l'épisode du 16 août 1998, pour des pas de temps de 1h (à gauche) et 6h (à droite)

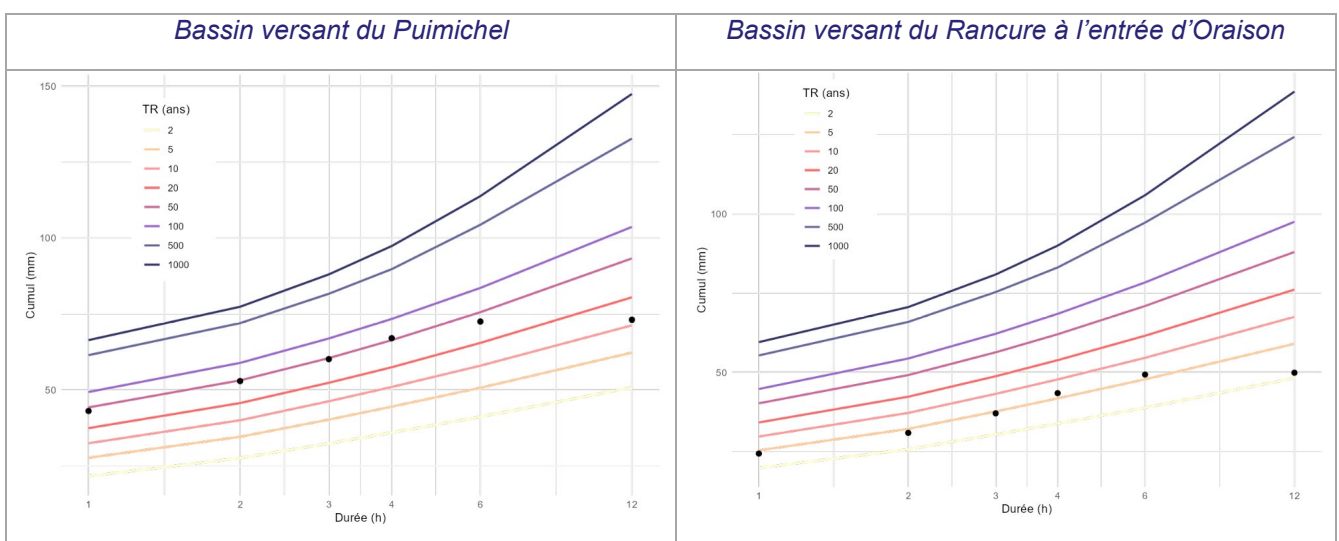


Figure 156 Comparaison des pluies de bassin observées (points noirs) pour l'épisode du 16 août 1998 avec les courbes de quantiles issues de la méthode SHYREG, sur le bassin du Puimichel (à gauche) et sur le bassin du Rancure à l'entrée d'Oraison (à droite)

Le hyétogramme horaire à l'échelle des bassins du Puimichel et de la Rancure à l'entrée d'Oraison est présenté à la Figure 157. Dans le cadre de la modélisation hydraulique 2D avec le modèle fin complet,

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

il est nécessaire de disposer de données de pluie à un pas de temps infra-horaire, notamment pour analyser la problématique du ruissellement. Pour l'épisode du 16 août 1998, les données radar Panthère de Météo-France n'étant pas disponibles, les chroniques horaires ont été désagrégées au pas de temps 15 minutes à l'aide de la méthode d'Ormsbee ([59], [60]).

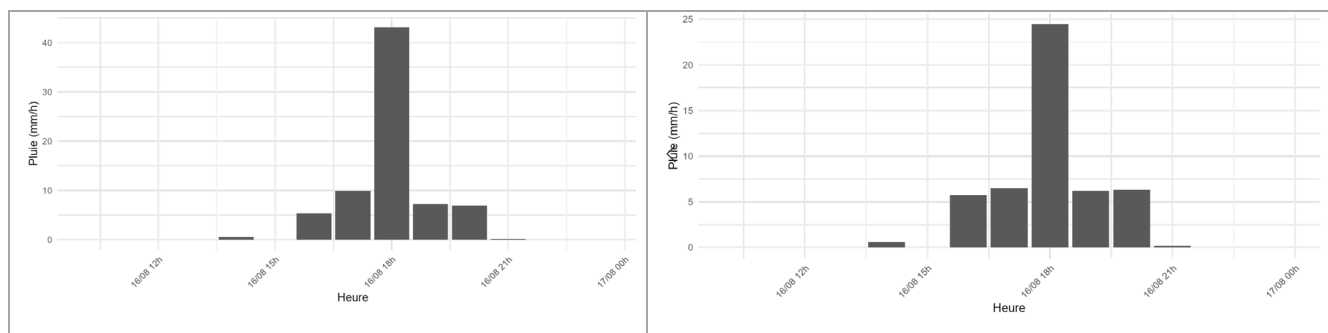


Figure 157 Hyétogramme horaire pour l'épisode du 16 août 1998 sur le bassin du Puimichel (à gauche) et sur le bassin du Rancure à l'entrée d'Oraison (à droite)

Evènement du 18/19 janvier 2014

Les Figure 158, Figure 159 et Figure 160 illustrent successivement : (i) la répartition spatiale des cumuls maximaux pour différentes durées, (ii) leur traduction en termes de périodes de retour, et (iii) l'analyse hydrologique associée réalisée à partir des pluies de bassin.

L'épisode pluvieux des 18 et 19 janvier 2014 se caractérise par un événement long et soutenu, marqué par des cumuls importants sur 24h, particulièrement sur l'aval du bassin versant (secteur d'Oraison). Contrairement à l'épisode du 16 août 1998, de nature orageuse et localisée, cet épisode résulte d'une perturbation associée à un système pluvieux étendu, entraînant près de 24 heures de précipitations continues. Les cumuls sur 24h, compris entre 50 et 121 mm, ont concerné l'ensemble du bassin du Rancure, avec des maxima sur l'aval et une répartition plus homogène qu'en 1998. Localement, les périodes de retour sur 24h dépassent 20 ans, confirmant le caractère notable de cet épisode.

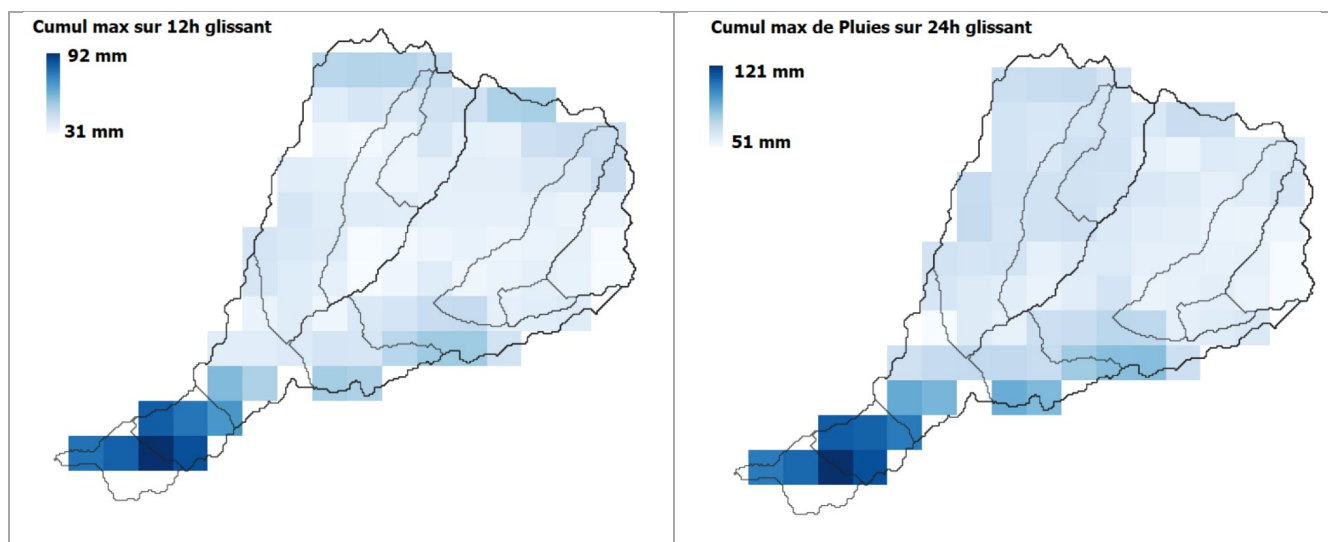


Figure 158 Cartographie des cumuls maximaux de précipitations enregistrés lors de l'épisode du 18/19 janvier 2014, calculés sur des pas de temps glissants de 12h (à gauche) et 24h (à droite)

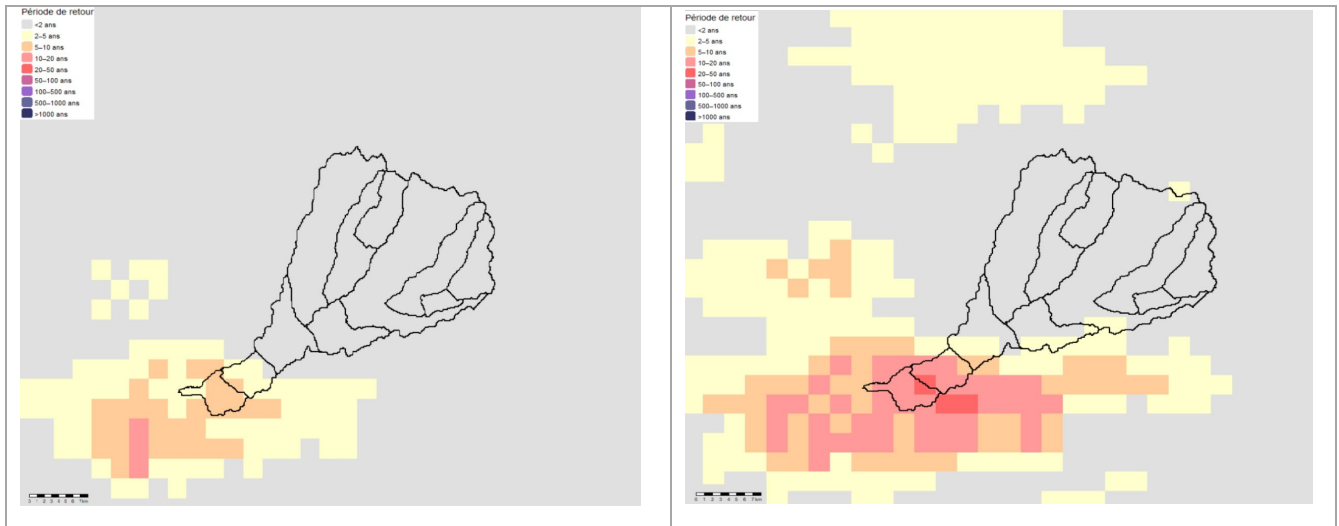


Figure 159 Cartographie des périodes de retour associées aux cumuls maximaux de précipitations de l'épisode du 18/19 janvier 2014, pour des pas de temps de 12h (à gauche) et 24h (à droite)

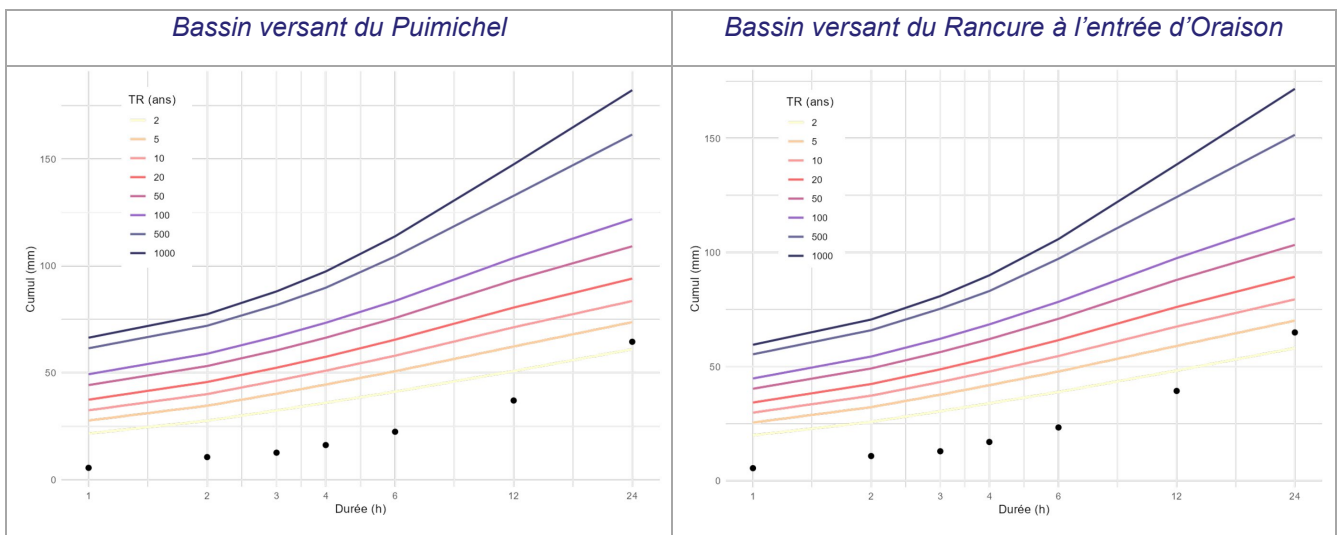


Figure 160 Comparaison des pluies de bassin observées (points noirs) pour l'épisode du 18/19 janvier 2014 avec les courbes de quantiles issues de la méthode SHYREG, sur le bassin du Puimichel (à gauche) et sur le bassin du Rancure à l'entrée d'Oraison (à droite)

Le hyétogramme horaire à l'échelle des bassins du Puimichel et de la Rancure à l'entrée d'Oraison est présenté à la Figure 161. L'épisode des 18 et 19 janvier 2014 est précédé, deux jours plus tôt, par un premier épisode pluvieux notable sur une durée d'environ 24 heures. Cette succession d'événements a entraîné un taux de saturation des sols relativement élevé, favorisant ainsi une réactivité hydrologique accrue du bassin lors des précipitations principales des 18 et 19 janvier.

Les données Panthère de Météo-France étant disponibles pour cet événement, les pluies horaires ont été désagrégées au pas de temps de 15 minutes en s'appuyant sur la distribution spatiale issue des données Panthère, tout en garantissant que le cumul horaire reste cohérent avec les précipitations issues de COMEPHORE.

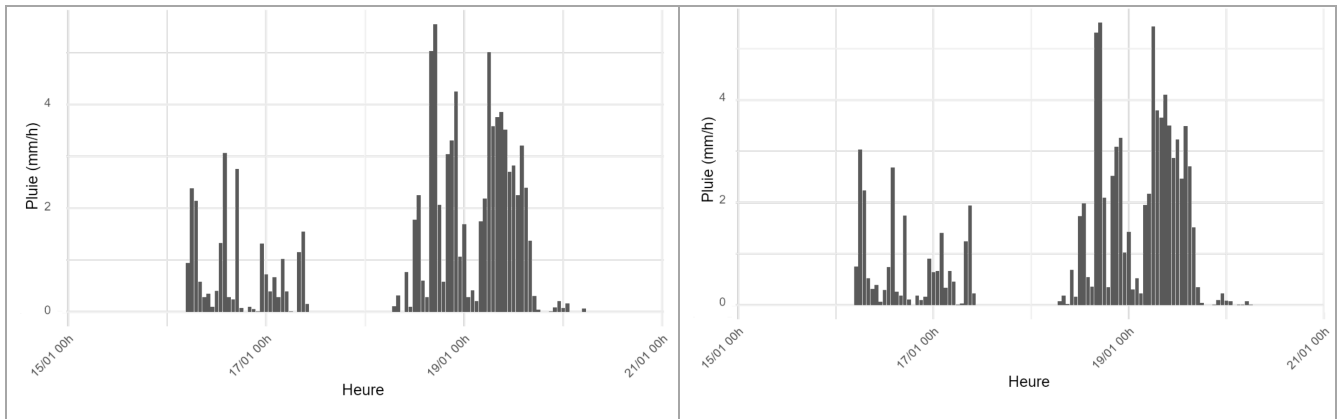


Figure 161 Hyétogramme horaire pour l'épisode du 18/19 janvier 2014 sur le bassin du Puimichel (à gauche) et sur le bassin du Rancure à l'entrée d'Oraison (à droite)

Evènement du 22/24 novembre 2019

Les Figure 162, Figure 163 et Figure 164 illustrent successivement : (i) la répartition spatiale des cumuls maximaux pour différentes durées, (ii) leur traduction en termes de périodes de retour, et (iii) l'analyse hydrologique associée réalisée à partir des pluies de bassin.

L'épisode pluvieux des 22 au 24 novembre 2019 se caractérise par un événement long et soutenu, marqué par des cumuls importants et une répartition relativement homogène à l'échelle du bassin du Rancure. Contrairement à l'épisode du 16 août 1998, de nature orageuse et localisée, et à celui des 18 et 19 janvier 2014, centré principalement sur l'aval, cet épisode résulte d'une perturbation généralisée et persistante, liée à une succession de cellules pluvieuses dynamiques qui ont affecté l'ensemble du bassin pendant près de 48 heures.

L'épisode se caractérise par des cumuls sur 24h compris entre 60 et 80 mm, atteignant localement jusqu'à 110 mm sur 48h, ce qui traduit la persistance du système pluvieux. La répartition des précipitations apparaît globalement homogène à l'échelle du bassin. Les périodes de retour sont majoritairement comprises entre 2 et 10 ans sur 24h et dépassent ponctuellement 20 ans sur 48h. À l'échelle du bassin versant, les pluies de bassin atteignent une période de retour d'environ 10 ans sur 48h.

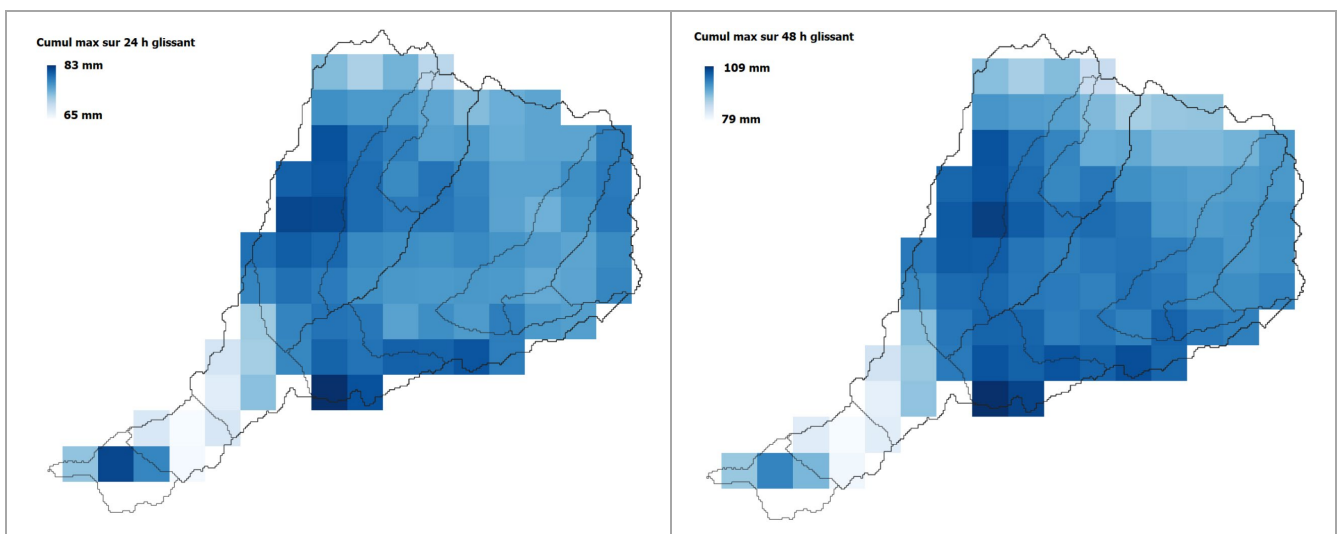


Figure 162 Cartographie des cumuls maximaux de précipitations enregistrés lors de l'épisode du 22/24 novembre 2019, calculés sur des pas de temps glissants de 24h (à gauche) et 48h (à droite)

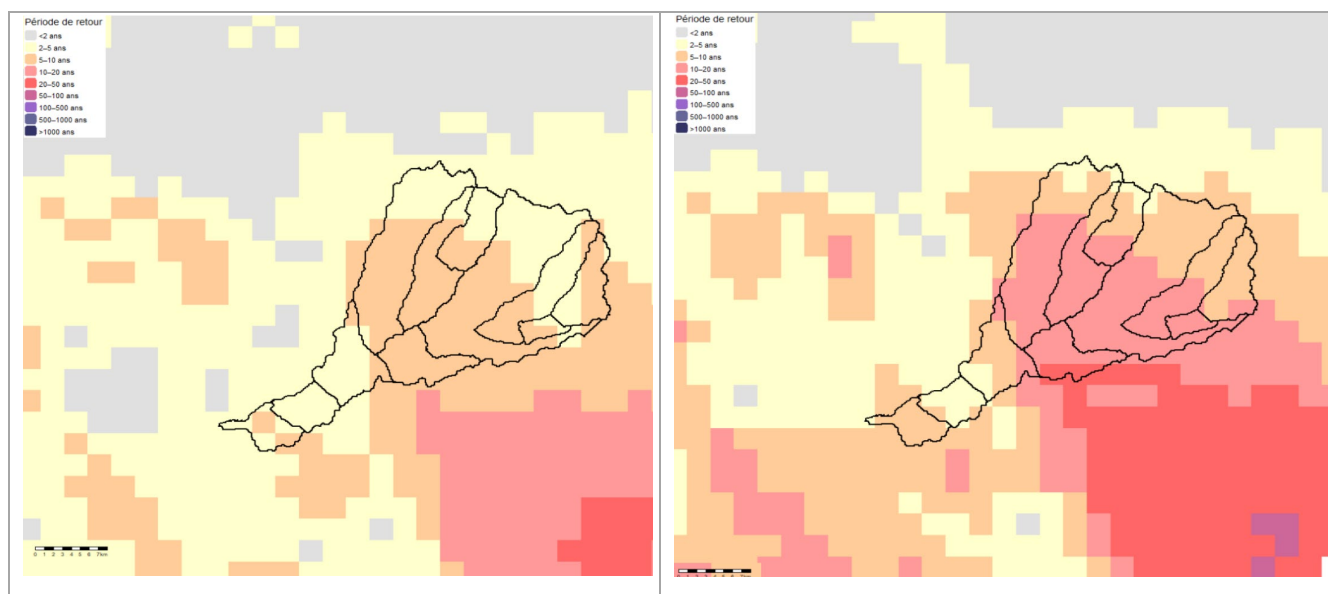


Figure 163 Cartographie des périodes de retour associées aux cumuls maximaux de précipitations de l'épisode du 22/24 novembre 2019, pour des pas de temps de 24h (à gauche) et 48h (à droite)

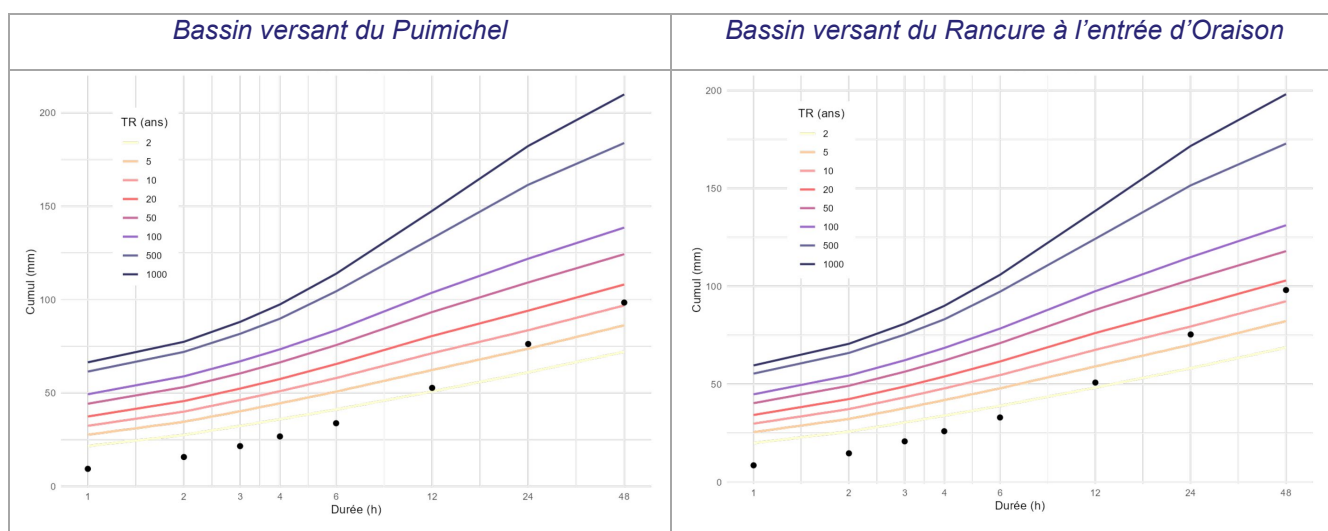


Figure 164 Comparaison des pluies de bassin observées (points noirs) pour l'épisode du 22/24 novembre 2019 avec les courbes de quantiles issues de la méthode SHYREG, sur le bassin du Puimichel (à gauche) et sur le bassin du Rancure à l'entrée d'Oraison (à droite)

Le hyétogramme horaire à l'échelle des bassins du Puimichel et de la Rancure à l'entrée d'Oraison est présenté à la Figure 165.

Comme pour l'épisode du 18 janvier 2014, les données Panthère de Météo-France étant disponibles pour cet événement, les pluies horaires ont été désagrégées au pas de temps de 15 minutes en s'appuyant sur la distribution spatiale issue des données Panthère, tout en garantissant que le cumul horaire reste cohérent avec les précipitations issues de COMEPHORE.

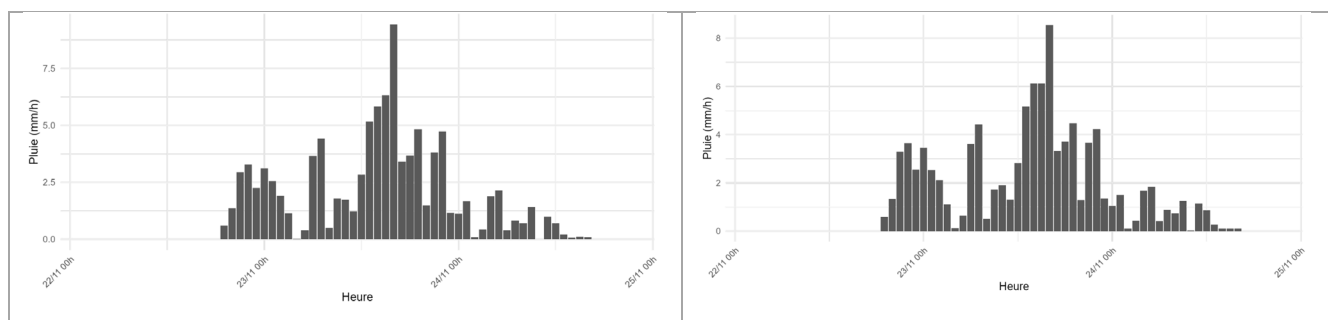


Figure 165 Hyétogramme horaire pour l'épisode du 22/24 novembre 2019 sur le bassin du Puimichel (à gauche) et sur le bassin du Rancure à l'entrée d'Oraison (à droite)

4.2.3.2 Résultats de la modélisation et comparaison aux observations

Les simulations hydrauliques 2D réalisées sur fonds fixe ont été confrontées aux trois événements historiques retenus (16 août 1998, 18-19 janvier 2014 et 22-24 novembre 2019), en s'appuyant sur les forçages de pluie décrits précédemment. Le tableau ci-après (Tableau 28) synthétise l'ensemble des configurations testées : pour chaque événement, plusieurs combinaisons ont été mises en œuvre, variant à la fois les conditions initiales d'humidité des sols (AMC 1 à 3) et le type de maillage (régulier 25 m ou déstructuré 3/15 m). Les débits maximaux obtenus sur les sections de contrôle principales (Puimichel, Rancure amont, entrée Oraison) sont reportés dans le tableau.

Afin de confronter ces résultats, une double analyse a été menée :

- d'une part, la comparaison aux quantiles de débits estimés dans l'analyse hydrologique (§2.2.2.1), permettant de vérifier la cohérence statistique des crues modélisées ;
- d'autre part, la mise en regard avec l'aléa pluviométrique caractérisé pour chaque épisode (§2.2.2.3), notamment en termes de périodes de retour des pluies observées et des dommages recensés sur le terrain.

Dans ce cadre, toutes les simulations issues de l'AMC1 ont été écartées : quel que soit l'événement, les débits maximaux modélisés sont systématiquement trop faibles au regard des intensités de pluie et des dégâts observés. Ce constat reflète une sous-estimation de la réactivité hydrologique y compris pour l'épisode d'août 1998 dont le faible SWI calculé suggère des sols secs au début de l'événement.

Concernant l'épisode de novembre 2019, les simulations basées sur AMC3 (tant en maillage régulier 25 m qu'en maillage fin déstructuré) ont également été écartées. Les débits maximaux générés correspondent à des périodes de retour trop élevées au regard des cumuls pluviométriques observés (principalement compris entre 2 et 10 ans sur 24-48 h) et des dommages enregistrés. De même, pour l'événement de janvier 2014, les configurations AMC3 appliquées au maillage fin surestiment nettement les débits et sont jugées non représentatives.

Ainsi, les conditions de forçage retenues pour la poursuite de l'analyse reposent sur une approche encadrée, consistant à définir une borne inférieure et une borne supérieure des débits mobilisateurs pour chaque événement :

- **Août 1998 : les simulations AMC2 sont retenues**, avec le maillage régulier 25 m en borne inférieure et le maillage fin déstructuré (3/15 m) en borne supérieure.
- **Janvier 2014 : les simulations AMC2 et AMC3 en maillage régulier 25 m constituent respectivement la borne inférieure et la borne supérieure**. La simulation AMC2 en maillage fin déstructuré représente une valeur intermédiaire.
- **Novembre 2019 : les simulations AMC2 sont retenues**, avec le maillage régulier 25 m en borne inférieure et le maillage fin déstructuré (3/15 m) en borne supérieure.

Pour rappel, les hydrogrammes issus des simulations en maillage régulier 25 m (forçage pluie) sont ensuite utilisés comme conditions de forçage en débit dans un second modèle hydraulique

Les valeurs retenues comme représentatives pour l'analyse hydraulique sont indiquées sur le Tableau 28, en rouge (débits retenus comme conditions de forçage du second modèle hydraulique) et en vert (forçages considérés crédibles sur le maillage fin déstructuré).

En définitive, chaque épisode est encadré par une emprise d'inondation correspondant à une borne inférieure et une borne supérieure du débit sollicitant. Cette approche permet de représenter l'incertitude inhérente au choix des conditions initiales (humidité des sols) et du maillage, tout en garantissant une cohérence avec l'aléa pluviométrique caractérisé et les observations de terrain.

Événement	Maillage	AMC	SWI	Débit maximal (m ³ /s)		
				Puimichel	Rancure amont	Entrée Oraison
Août 1998	Régulier 25m	1	42	0	0	0

		2		25	0	0
		3		66	0	66
	Déstructuré 3/15 m	1		6	0	4
		2		44	0	35
Janvier 2014	Régulier 25m	1	95	0	0	1
		2		9	5	15
		3		22	23	50
	Déstructuré 3/15 m	2		12	13	30
		3		36	44	88
Novembre 2019	Régulier 25m	1	94	2	3	5
		2		22	25	49
		3		52	55	121
	Déstructuré 3/15 m	2		25	33	63

Tableau 28 Résultats des simulations 2D (forçage pluie) pour les événements d'août 1998, janvier 2014 et novembre 2019 : débits maximaux simulés aux principales sections de contrôle (Puimichel, Rancure amont, entrée Oraison) selon le type de maillage (régulier 25 m ou déstructuré 3/15 m) et la condition initiale d'humidité des sols (AMC).

Les cartes détaillées par tronçon sont reportées en Annexe 3 ; les principaux enseignements sur les secteurs « sensibles » sont présentés ci-dessous :

- Puimichel
 - RD amont de la confluence avec le Lague – Les débordements en rive droite sont bien simulés : l'écoulement quitte le lit, emprunte la route départementale, puis revient au Puimichel à proximité de la confluence avec le Lague, conformément aux témoignages et relevés de traces.
 - Aval de la confluence avec le Lague / amont du gué RD101 – Les débordements rive gauche et rive droite apparaissent dans toutes les simulations crédibles (AMC2 à minima), avec une dynamique cohérente entre événements : débordement initial rive gauche, puis mise en charge ponctuelle rive droite lorsque la route fait seuil.
- Puimichel/Rancure : Secteur du Castellet – RD12
 - Les débordements vers les habitations situées en contre-bas de la RD12, non observés lors des crues de 1988, 2014 et 2019, apparaissent dans le modèle uniquement lorsque les murs de protection latéraux ne sont pas intégrés : le mur en L en rive droite à la confluence Puimichel–Rancure et le mur de protection en rive droite au niveau de Combe Croix.
- Rancure – amont du gué de la route d'Entrevennes
 - Le modèle reproduit les débordements généralisés en amont du gué, signature d'une capacité hydraulique limitée (secteurs de cluster 3 de la classification hydromorphologique menée à la partie 4.1.2.2).
 - Limite du modèle à fonds fixe : pour des vitesses > 2 m/s, on attend en réalité des déclenchements de ravinement et des phénomènes d'auto-chenalisation sur sols meubles, qui concentrent les écoulements. Le modèle à relief fixe tend au contraire à étaler les zones de débordement. Cette limite est à garder en tête pour l'interprétation fine des largeurs inondées.
- Rancure : Aval du Castellet → gué de la déchetterie → STEP
 - Les sorties du modèle montrent un débordement rive droite qui s'étend jusqu'à la STEP. Or, les observations de terrain indiquent que, sur ce linéaire, les débordements concernent surtout la rive gauche : un mur merlonné en rive droite (partiellement

recouvert par la végétation) canalise les écoulements et limite la sortie vers l'extérieur. Ce talus/mur n'est pas entièrement restitué par le MNT, ce qui explique la surestimation des écoulements rive droite dans les simulations.

- Rancure : Traversée d'Oraison
 - Les sorties du modèle montrent un débordement rive droite au droit du pont du Vésier conformément aux observations de terrain.

4.2.4 Simulation des crues de référence avec fonds actuels

Les deux crues de référence ont été simulées sur fonds fixe à partir des hydrogrammes retenus au § 2.2.2.4. Les résultats sont présentés sous forme de cartographies de hauteurs d'eau :

- Crue de novembre 2019 (AMC2) : Figure 166 ;
- Crue issue de l'analyse bivariée des pluies (BivP100) de période centennale : Figure 167.

Pour 2019_AMC2, le modèle restitue les débordements déjà documentés : en rive droite du Puimichel en amont de la confluence avec le Lague (écoulements empruntant la RD puis rejoignant le cours principal), part et d'autre en aval du Lague jusqu'au gué de la RD 101, ainsi que les mises en charge récurrentes en amont du gué d'Entrevennes. La traversée d'Oraison reste majoritairement contenue dans le lit/corridor, avec seulement des débordements ponctuels au droit du pont Vésier (8 mai 1945) sur la rive droite.

Pour la crue issue de l'analyse bivariée des pluies BivP100, l'emprise inondée s'étend nettement par rapport à 2019, conformément à l'augmentation du débit sollicitant :

- des débordements quasi continus apparaissent depuis l'amont du gué d'Entrevennes jusqu'à l'entrée d'Oraison, notamment dans les secteurs à forte ouverture latérale ;
- au Castellet, la traversée présente des sorties de lit récurrentes avec une inondation des habitations en contre-bas de la RD12 malgré la pris en compte des murs existants ;
- dans la traversée d'Oraison, une nouvelle zone de débordement apparaît en amont du pont Roman sur la rive gauche entraînant une arrivée d'eau au niveau de la rue des Oliviers et de la rue du Pont Roman.

De manière générale, les cartographies issues de la modélisation hydraulique 2D (Figure 166 et Figure 167) confirment la lecture issue de l'analyse morpho-hydraulique (Figure 134, Figure 140, Figure 137 et). Dans les secteurs divaguants, de l'amont du gué d'Entrevennes jusqu'à l'entrée d'Oraison, la méthode fondée sur $L/h = 15$ sous régime critique annonçait le dépassement des berges du corridor ; les simulations 2D matérialisent effectivement des débordements étendus et récurrents au sein du corridor alluvial. Sur la traversée du Castellet, la vulnérabilité pressentie en aval de la traversée apparaît également sur les résultats 2D par des sorties de lit localisées. À l'inverse, dans la traversée d'Oraison, les deux approches convergent vers une tenue globale ; toutefois, la marge entre $Q_{cap_corridor}$ et $Q_{sol_BivP100}$ devient faible entre le pont Roman et le pont des Notaires, ce que la 2D traduit par des niveaux proches du plein bord et une forte sensibilité aux détails topographiques et aux ouvrages.

De façon factuelle, l'analyse morpho-hydraulique en profil longitudinal met généralement en évidence moins de zones de débordement que la modélisation hydraulique 2D à fonds fixe.

Point de vigilance sur le fonds fixe — Les résultats 2D sont obtenus sur relief figé : dans les secteurs à vitesses $> \approx 2$ m/s, la réalité peut évoluer vers du ravinement/auto-chenalisation qui concentre les écoulements, là où le modèle a tendance à les étaler. Inversement, de petits ouvrages latéraux (murets, merlons végétalisés) parfois mal restitués par le MNT peuvent conduire à surestimer localement les débordements d'une rive. **Ces limites invitent à une lecture prudente des emprises.**

Les simulations Cartino 2D avec fonds modifiés n'ont pas été retenues dans l'analyse finale, compte tenu des incertitudes associées à la représentation des évolutions morphologiques dans un modèle hydraulique 2D à fonds fixes, sur des secteurs divaguants, en tresses. L'évaluation de l'effet des fonds modifiés est traitée dans le paragraphe 4.1.4.2 à partir d'une approche simplifiée couplant les résultats de transport solide BedloadWeb, une reconstruction géométrique des profils et une réévaluation hydraulique selon les critères RTM/Ferguson.



Figure 166 Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de novembre 2019 (forçage débit_AMC2_fonds actuel) : secteur en amont du gué de la route d'Entrevennes (haut_gauche), secteur de Castellet (haut_droite), secteur de la ferme Bondil (bas_gauche), traversée d'Oraison (bas_droite)

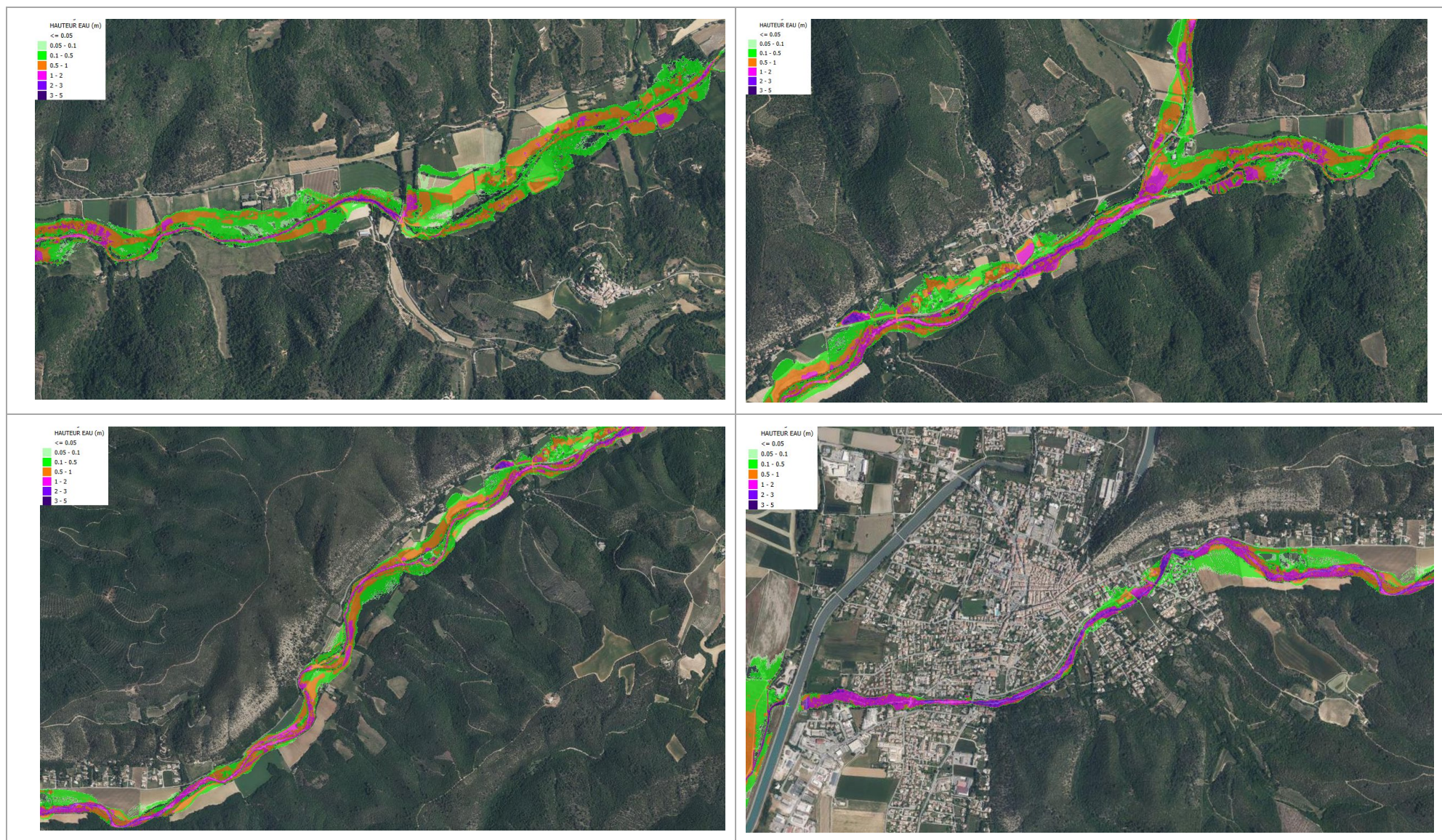


Figure 167 Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue issue de l'analyse bivariable des pluies BivP100 (fonds actuel) : secteur en amont du gué de la route d'Entrevennes (haut_gauche), secteur de Castellet (haut_droite), secteur de la ferme Bondil (bas_gauche), traversée d'Oraison (bas_droite)

4.2.5 Synthèse sur l'apport de la modélisation hydraulique 2D

La modélisation hydraulique 2D à fonds fixe, réalisée avec l'outil Cartino2D, a été mobilisée pour consolider l'analyse en profil longitudinal et spatialiser les écoulements hors du lit mineur. Bien que cette approche ne reproduise pas les ajustements morphologiques (érosion, dépôt), elle permet de cartographier les chemins d'écoulement préférentiels, les zones d'expansion et les points d'accumulation dans la plaine inondable.

La démarche a d'abord consisté à confronter le modèle à trois événements historiques documentés (1998, 2014 et 2019). La bonne correspondance entre les emprises inondées simulées et les observations de terrain a permis de valider la pertinence du modèle et de ses paramétrages, notamment en retenant des conditions d'humidité des sols (AMC) crédibles pour chaque épisode.

Par la suite, les deux crues de référence (novembre 2019/décennale et centennale BivP100) ont été simulées sur la topographie actuelle. Les cartographies des hauteurs d'eau et des vitesses obtenues confirment et détaillent les zones de débordement identifiées par l'analyse morpho-hydraulique. Elles apportent une information spatiale essentielle pour localiser précisément les enjeux exposés et comprendre la dynamique des inondations, notamment au droit des secteurs sensibles comme le Castellet, le gué d'Entrevennes ou la traversée d'Oraison.

4.3 Érosion des berges

Après avoir évalué les conditions d'écoulement au niveau du chenal actif et les zones de débordement (parties 4.1 et 4.2), cette section se concentre sur l'aléa connexe de l'érosion des berges. L'analyse est menée selon une double approche : d'une part, une estimation de l'élargissement effectif du lit constaté lors des crues récentes de 2014 et 2019, basée sur une analyse diachronique des orthophotographies ; d'autre part, une évaluation de l'élargissement potentiel du lit pour des crues de référence, en appliquant une méthode prédictive basée sur le concept de "chenal à l'équilibre".

4.3.1 Estimation de l'élargissement effectif du lit lors des crues de 2014 et 2019

L'analyse diachronique des orthophotographies et des bandes actives permet d'estimer les élargissements effectifs du lit du Rancure lors des deux crues récentes les plus marquantes (janvier 2014 et novembre 2019).

4.3.1.1 Méthodologie

L'approche repose sur la comparaison géométrique de la bande active avant et après chaque crue, selon une procédure en plusieurs étapes :

- ***Transects perpendiculaires le long de l'axe***
À partir de l'axe de projection déjà défini (cf. profil en long : paragraphe 3.2.4.2), des transects perpendiculaires de 400 m ont été générés à pas régulier (~10 m) sur l'ensemble du linéaire.
- ***Mesure des largeurs de bande active par millésime***
En croisant chaque transect avec les bandes actives déjà digitalisées (cf. analyse diachronique en plan : 3.2.4.1), on obtient, pour chaque année de référence (2012, 2015, 2018, 2021), un segment dont la longueur représente la largeur du lit actif ; les deux extrémités sont affectées à RG (rive gauche) ou RD (rive droite) selon leur proximité aux rives correspondantes.
- ***Reculs de berge et élargissement effectif par crue***
Entre les couples 2012→2015 (crue 2014) et 2018→2021 (crue 2019), le déplacement des deux extrémités est projeté sur la normale à l'axe au droit de chaque transect, fournissant des reculs signés (positifs ou négatifs) de RG et RD.
- ***Lissage spatial et élargissement effectif par crue***

Les séries brutes de reculs RG et RD sont d'abord lissées par une régression LOESS (span = 0,03), afin d'atténuer le bruit local et de restituer une tendance continue à l'échelle du linéaire. L'élargissement effectif ΔW au transect est ensuite déduit par une règle de synthèse :

- si $RG > 0$ et $RD > 0 \rightarrow \Delta W = RG + RD$;
- si une seule rive recule $\rightarrow \Delta W = \text{recul de la rive concernée}$;
- sinon $\rightarrow \Delta W = 0$.

4.3.1.2 Résultats

L'application de la méthodologie décrite précédemment permet de restituer, pour chaque transect, les reculs de berges associés aux crues de janvier 2014 et de novembre 2019. La Figure 168 et la Figure 169 présentent respectivement l'évolution spatiale des principaux élargissements du lit du Rancure lors des crues de 2014 et 2019, ainsi que des exemples illustratifs sur des secteurs représentatifs. Cette analyse des variations de largeur du lit actif met en évidence plusieurs secteurs d'élargissement marqués, dont l'intensité et la localisation diffèrent selon les crues de 2014 et 2019.

En 2014, l'élargissement le plus notable est observé à la confluence avec les ravins Rouméguière et Saint-Sauveur. Cet accroissement de largeur est lié d'une part à l'alimentation en charge solide provenant du ravin Saint-Sauveur, et d'autre part à l'effet du seuil qui conditionne le transport solide pour les crues fréquentes. La crue de 2014 a contribué à une rectification locale du lit : en aval du seuil, le Rancure présentait une largeur inférieure à celle qu'il aurait eue en l'absence de cet ouvrage. Un second élargissement marqué est identifié à la confluence avec le Puimichel, où l'augmentation de largeur résulte de l'apport en débit liquide venant de cet affluent, qui accentue les contraintes hydrauliques au point de confluence.

En 2019, les élargissements les plus intenses concernent d'autres secteurs. Un maximum est relevé au niveau du pont de la route d'Entrevennes, où la contraction imposée par l'ouvrage, combinée à l'effet du seuil, a généré une surconcentration des écoulements favorisant le recul des berges à l'aval et un remous solide à l'amont. Un autre élargissement marqué est situé à proximité de la station d'épuration (STEP) en aval du Castellet. Historiquement, la construction de murs en rive droite a réduit l'espace du lit, favorisant ainsi un recul préférentiel de la rive gauche lors de la crue.

De manière générale, les zones d'élargissement ne sont pas strictement les mêmes en 2014 et 2019. Cela s'explique par le fait que les élargissements intervenus en 2014 ont déjà conduit à un gabarit hydraulique supérieur pour les crues suivantes. En l'absence de crues fréquentes entre 2014 et 2019 qui auraient pu remodeler le lit, ces secteurs se sont trouvés moins vulnérables lors de la crue de 2019, le potentiel d'élargissement y étant partiellement épuisé. À l'inverse, de nouveaux secteurs contraints (ponts, ouvrages, zones anthropisées) se sont révélés plus sensibles à l'élargissement en 2019.

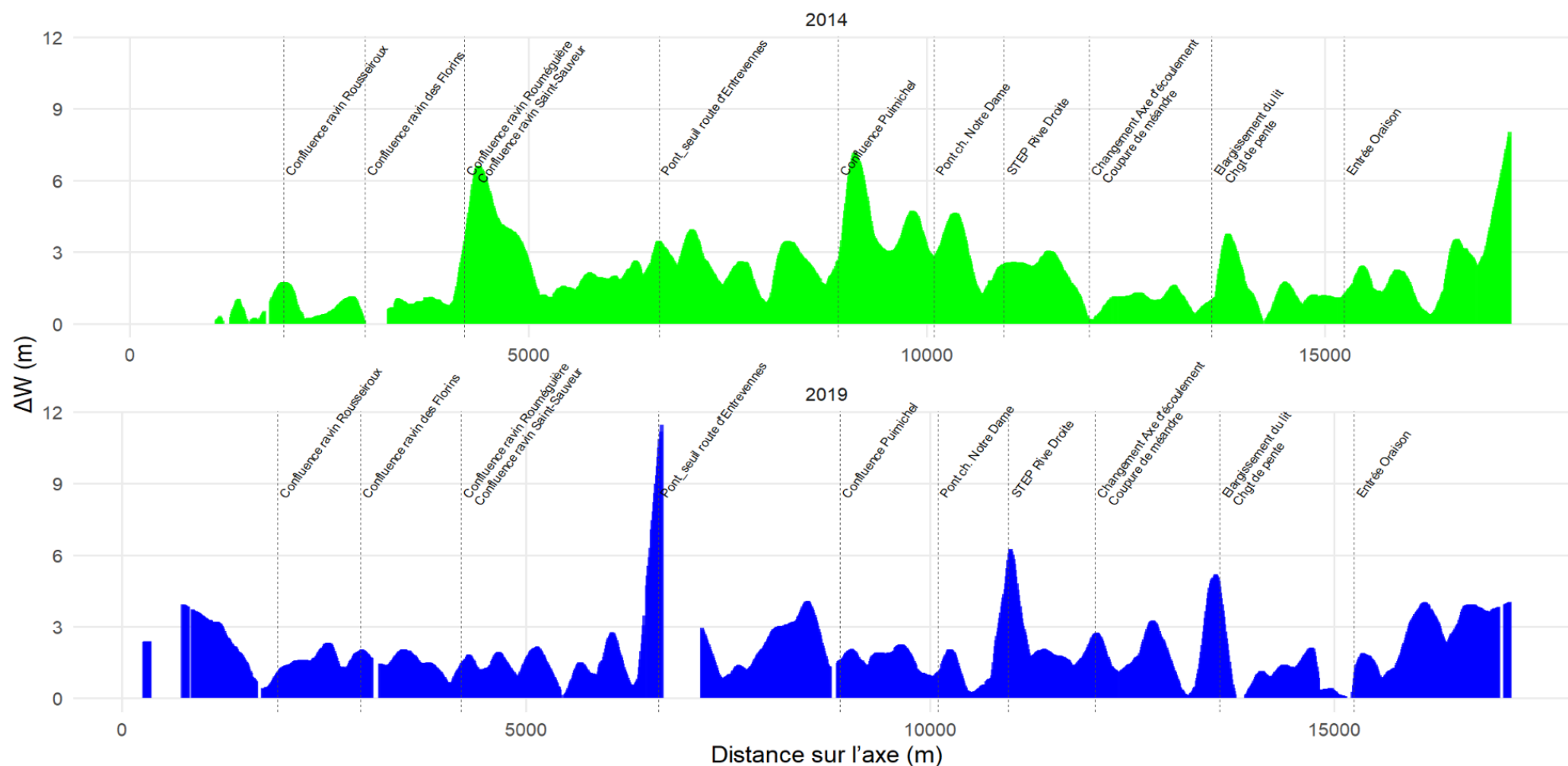


Figure 168 Évolution spatiale de la variation de largeur du lit actif (ΔW) le long de l'axe de la Rancure pour les crues de 2014 (en vert) et 2019 (en bleu)..

Confluence avec les Ravins Roumeguiere/St-Sauveur (avant/après crue 2014)



Pont de la roue d'Entrevennes (avant/après crues 2019)



Confluence avec le Puimichel (avant/après crue 2014)



Oraison_Pont des Notaires (avant/après crue 2019)



Figure 169 Illustrations diachroniques de secteurs représentatifs du Rancure (avant et après les crues 2014 et 2019)

4.3.2 Évaluation de l'élargissement potentiel du lit via le « chenal à l'équilibre »

Au-delà de l'analyse des élargissements passés, il est nécessaire d'évaluer l'érosion potentielle des berges pour des crues futures. La méthodologie utilisée ici est adaptée de celle de (Jakob et al., 2022) [61] et repose sur le principe physique selon lequel l'érosion des berges est un processus auto-limitant. Le déclenchement de l'érosion majeure survient lorsque la puissance de l'écoulement est suffisante pour mobiliser les plus gros matériaux du lit (le D84), ce qui se produit quand la hauteur d'eau dépasse une hauteur critique (h_{crit}). Une fois ce seuil atteint, le lit se déstabilise, entraînant l'affouillement des pieds de berges et leur effondrement. Le chenal s'élargit alors, ce qui, pour un débit donné, provoque une diminution de la hauteur d'eau. Le processus d'érosion s'arrête lorsque la hauteur d'eau redescend sous la valeur critique, stabilisant à nouveau le fond du lit.

4.3.2.1 Principe et cadre physique

La méthodologie de prédiction d'élargissement du lit décrite par (Jakob et al., 2022) [61] a été adaptée dans le cadre de cette étude pour évaluer l'érosion potentielle des berges du Rancure et du Puimichel. Cette méthode, qui se base sur des observations en laboratoire (notamment à l'Université de la Colombie-Britannique), repose sur l'idée centrale que l'érosion des berges est un processus auto-limitant.

Les hypothèses clés sont les suivantes :

- **Déclenchement de l'érosion** : L'érosion majeure des berges commence lorsque le flot a suffisamment de puissance (contrainte de cisaillement) pour mobiliser les plus gros matériaux sur le lit du chenal, en particulier le granulat D84 (la taille de particule pour laquelle 84% des sédiments du lit sont plus petits). La mobilisation de ces gros éléments déstabilise l'ensemble du lit, ce qui entraîne l'affouillement des pieds de berges et leur effondrement rapide.
- **Seuil critique** : Ce seuil de mobilisation peut être défini par une hauteur d'écoulement critique ($d_c = h_c$). Tant que la profondeur du flot est inférieure à d_c , le lit du chenal reste stable. Lorsque la profondeur dépasse d_c , le lit devient instable et l'érosion s'amorce.
- **Processus auto-limitant** : L'érosion se poursuit, élargissant le chenal. Pour un débit donné, un chenal plus large entraîne une profondeur d'écoulement plus faible. L'érosion s'arrête lorsque le chenal s'est suffisamment élargi pour que la profondeur de l'écoulement redescende à la valeur critique (d_c). À ce stade, le lit se re-stabilise, empêchant toute érosion supplémentaire. Le schéma présenté à la Figure 170 illustre ce concept.

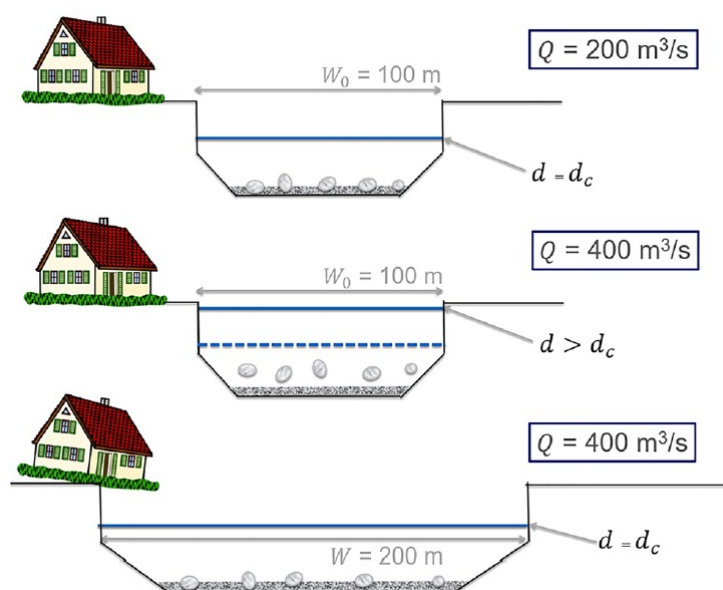


Figure 170 Schéma conceptuel montrant l'élargissement du chenal pour maintenir une profondeur d'écoulement égale à la valeur critique durant une crue ([61])

4.3.2.2 Adaptation de la méthode

La méthodologie développée par Jakob et al. (2022) a été reprise comme cadre conceptuel et adaptée aux conditions locales / données disponibles du Rancure et de son affluent le Puimichel. Les ajustements concernent à la fois la formulation du seuil de mise en mouvement, la définition de la hauteur critique et la calibration du rapport de contrainte de cisaillement supra-critique β calibré par comparaison avec les élargissements diachroniques observés :

- **Le seuil de mise en mouvement** : la contrainte de Shields critique τ_c^* est décrite à partir de la relation empirique proposée par Recking (2009) [62], établie sur un large jeu de données expérimentales intégrant à la fois des effets de tri granulométrique et une gamme de pentes comprises entre 0,1 % et 10 % (la majorité des mesures se situant entre 0,1 % et 2 %) :

$$\tau_c^* = 0.56 i + 0.021, \quad i \text{ pente (m/m)}$$

Cette formulation permet de relier la valeur critique de mise en mouvement à la pente du chenal. Il convient toutefois de noter que d'autres relations existent dans la littérature pour estimer ce seuil, avec des écarts pouvant atteindre ± 50 % par rapport à l'équation de Recking ([47]).

- **Profondeur critique** : à partir du rapport $\beta = \tau_c^* / \tau_c^*$ (compris entre 1 et 3 [47]) on déduit la profondeur critique de mobilisation h_{crit} (hauteur d'eau au-dessus de laquelle le lit devient instable) :

$$h_{crit} = \beta \tau_c^* \frac{(s-1) D_{84}}{i}, \quad \text{avec } s \text{ (densité des sédiments), } D_{84} \text{ en m}$$

- **Processus auto-limitant** : à débit donné Q , si $h > h_{crit}$ l'érosion élargit le lit, ce qui abaisse la profondeur. Le processus cesse lorsque h retombe en-dessous de h_{crit} . Ce principe est repris en faisant l'hypothèse d'une section rectangulaire équivalente (largeur équivalente initiale L_0) et d'un écoulement critique qui se justifie dans le cas des chenaux divagants ([47], [52]) :

$$Q = \sqrt{g} L_0 h^{(3/2)} \quad \text{d'où } L_{req} = \frac{Q}{\sqrt{g} h_{crit}^{3/2}}$$

La largeur L_0 est déterminée à partir d'un rectangle hydraulique équivalent, calculé selon :

$$L_0 = S_{mouillée} / h_{moy} \text{ et } W_0 = L_0 / M_{W0} \text{ avec } W_0 = \text{largeur du chenal actif visible sur l'orthophoto}$$

La largeur équivalente requise L_{req} est plafonnée par une largeur maximale « physiquement » disponible L_{max} (maximum entre la largeur de la bande active historique et la largeur des terrasses anciennes). L'élargissement visible « réalisable » est donc :

$$\Delta W = \max(0, \min(L_{req}, L_{max}) - L_0) / M_{W0}$$

4.3.2.3 Calibration du rapport de contrainte de cisaillement supra-critique

Pour transposer le schéma conceptuel auto-limitant aux conditions réelles du Rancure, comme indiqué dans la partie précédente, un paramètre β a été introduit afin de pondérer la profondeur critique. Ce coefficient adimensionnel joue un rôle équivalent à celui du rapport de contrainte de cisaillement supra-critique détaillé par Jakob et al. ([61]). Il est, ici, estimé par calage sur les élargissements observés.

Intégration des incertitudes

Afin de représenter la variabilité naturelle et l'incertitude des mesures, deux familles de paramètres sont considérées comme aléatoires et tirées à chaque itération du simulateur :

- **La largeur initiale W_0** , corrigée par le multiplicateur M_{W0} (permettant de passer à une section rectangulaire équivalente) spécifique à chaque tronçon homogène. Cet intervalle est défini à partir d'un indice de confiance obtenu par confrontation entre largeurs issues de l'orthophotographie (W_0) et largeurs du rectangle équivalent (L_0) calculées à partir du MNT pour l'année 2021 (année où les données du lidar et de l'orthophoto correspondent).
- **La granulométrie caractéristique D_{84}** , supposée uniforme dans un intervalle $[D_{min}, D_{max}]$ au regard des résultats obtenus sur les différents échantillons (cf partie 3.3.2.1).

Les constantes physiques utilisées sont la gravité ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$) et la densité relative des sédiments ($s = 2,65$).

Simulateur Monte-Carlo

A l'image de la méthodologie proposée par Jakob et al. ([61]), pour chaque événement documenté (orthophoto avant/après crues : 2014 et 2019) et pour chaque tronçon homogène, un calcul stochastique est réalisé sur $N = 1500/3000$ itérations. À chaque tirage :

1. Les variables aléatoires M_{W0} et D_{84} sont échantillonnées dans leurs lois uniformes.
2. La pente hydraulique i est convertie en valeur adimensionnelle (m/m).
3. La profondeur critique est calculée via $h_{crit} = \beta \tau_c^* \frac{(s-1) D_{84}}{i}$
4. La largeur requise pour que l'écoulement soit compatible avec h_{crit} est : $L_{req} = \frac{Q}{\sqrt{g} h_{crit}^{3/2}}$
5. L'élargissement disponible est limité par la largeur maximale observée historiquement W_{max} et l'élargissement effectif est alors : $\Delta W = \max(0, \min(L_{req}, L_{max}) - L_0) / M_{W0}$

Pour chaque abscisse, les sorties du simulateur sont résumées par la médiane $\Delta \widetilde{W}_{mod}$ et les quantiles $P10_{mod}$ et $P90_{mod}$. Ces séries sont ensuite lissées (LOESS, span=0,03) afin de produire des profils cartographiques robustes.

Calage du paramètre β

Le paramètre β est estimé séparément **pour chaque tronçon homogène (cluster)** et pour chaque événement (2014 et 2019). Une grille [1 ; 3] (pas 0,05) est explorée, et pour chaque valeur candidate de β , les sorties du simulateur sont comparées aux élargissements observés (ΔW_{obs}) issus des données diachroniques (cf 4.3.1). Trois critères sont considérés :

- la différence relative entre médianes simulées et observées ($\Delta \widetilde{W}_{mod}$ et $\Delta \widetilde{W}_{obs}$),
- la différence relative entre les quantiles 90 % ($P90_{mod}$ et $P90_{obs}$),
- la proportion d'observations comprises dans l'intervalle [P10, P90] simulé (couverture : « cover »).

Ces critères sont combinés dans une fonction « coût » :

$$\mathcal{L}(\beta) = w_{50} \frac{\Delta \widetilde{W}_{mod} - \Delta \widetilde{W}_{obs}}{\Delta \widetilde{W}_{obs} + 0.1} + w_{90} \frac{P90_{mod} - P90_{obs}}{P90_{obs} + 0.1} + w_{cov} (1 - \text{cover}), \text{ avec } \omega_{50} = 0.4, \omega_{90} = 0.4 \text{ et } \omega_{cov} = 0.2.$$

La valeur retenue β^* est celle qui minimise la fonction de coût pour chaque (événement, tronçon). Une fois β^* identifié, une simulation Monte Carlo élargie ($N \approx 3000$) est effectuée afin de produire les profils définitifs ΔW et leurs intervalles de confiance [P10, P90].

4.3.2.4 Comparaison des élargissements modélisés et observés pour les crues de 2014 et 2019

Les résultats issus du simulateur Monte-Carlo, après calage du paramètre β , permettent de comparer directement les élargissements modélisés du lit (ΔW_{mod}) avec les élargissements observés (ΔW_{obs}) pour les crues de janvier 2014 et de novembre 2019. Le paramétrage de β a été réalisé séparément pour chaque « cluster homogène », de manière à optimiser localement la correspondance entre les valeurs médianes simulées, les quantiles supérieurs (P90) et les enveloppes de variabilité [P10–P90] d'une part, et les élargissements observés d'autre part (cf. section 4.3.2.3).

Résultats globaux

La Figure 171, Figure 172 et Figure 173 présentent, pour chaque scénario de calage (2014 AMC2, 2014 AMC3 et 2019 AMC2), l'évolution spatiale du lit du chenal actif ΔW le long de l'axe du Rancure. Les courbes rouges correspondent aux médianes modélisées, les rubans bleus à l'intervalle de confiance [P10, P90], et les courbes noires aux élargissements observés.

On constate globalement que le modèle reproduit correctement les ordres de grandeur et la variabilité longitudinale des élargissements. Les valeurs médianes issues du simulateur se situent généralement dans la même gamme que les observations, tandis que les enveloppes [P10, P90] encadrent une large proportion de valeurs potentielles. La fonction de coût (loss) est minimisée avec des valeurs de β comprises entre environ 1,2 et 2,9 selon les clusters, traduisant à la fois une robustesse relativement limitée du modèle et une certaine variabilité spatiale dans la sensibilité des berges à l'érosion.

Crue de janvier 2014

Pour la crue de janvier 2014, les résultats obtenus avec les scénarios hydrologiques AMC2 et AMC3 montrent des comportements distincts. Le scénario AMC2 conduit à une sous-estimation quasi systématique des élargissements du lit le long de l'axe du Rancure lorsqu'on raisonne en valeur médiane. À l'inverse, le scénario AMC3 restitue une variabilité plus proche des observations : selon les secteurs, le modèle sous-estime ou, au contraire, surestime les élargissements. Dans les deux cas, les zones majeures d'évolution identifiées dans l'analyse diachronique (confluences Roumeguière–Saint-Sauveur et Puimichel) sont correctement reproduites, et l'intervalle de confiance [P10–P90] encadre la majorité des valeurs observées.

Crue de 2019

Pour la crue de novembre 2019 (scénario AMC2), les élargissements observés apparaissent plus intenses et spatialement plus hétérogènes que ceux de 2014. Le modèle restitue une partie des tendances générales, mais avec plusieurs limites :

- Au niveau du pont de la route d'Entrevennes, zone de contraction hydraulique et d'alimentation potentielle en matériaux par le versant rive gauche, la dynamique observée est complexe ; le modèle ne parvient pas à reproduire fidèlement l'élargissement constaté sur le terrain.
- À la confluence Roumeguière–Saint-Sauveur, un élargissement marqué est simulé, probablement surestimé, ce biais pouvant s'expliquer par les incertitudes de calage et par la complexité locale du fonctionnement.
- Dans le secteur de la traversée d'Oraison, les élargissements sont également surestimés par le modèle.

De manière plus générale, les zones affectées en 2019 ne coïncident pas strictement avec celles de 2014. Cela peut s'expliquer en partie par le fait que les élargissements déjà intervenus en 2014 ont conduit à un gabarit hydraulique supérieur pour les crues ultérieures (cf. §4.3.1.2) : le potentiel d'élargissement y était en partie « épuisé » en 2019. À l'inverse, de nouveaux secteurs, plus contraints (ouvrages, zones urbanisées), se sont révélés sensibles à l'érosion lors de cet épisode.

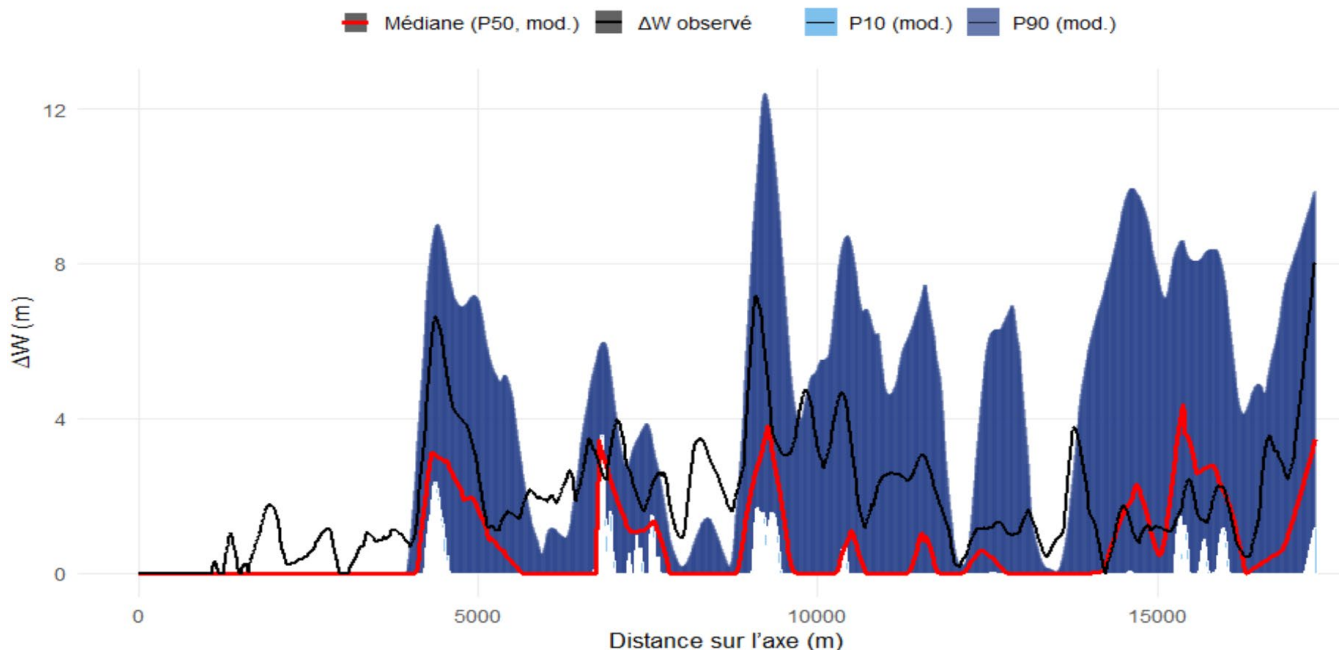


Figure 171 Évolution spatiale de l'élargissement effectif ΔW le long de l'axe du Rancure : comparaison modélisation/observation pour la crue de janvier 2014 (scénario AMC2).

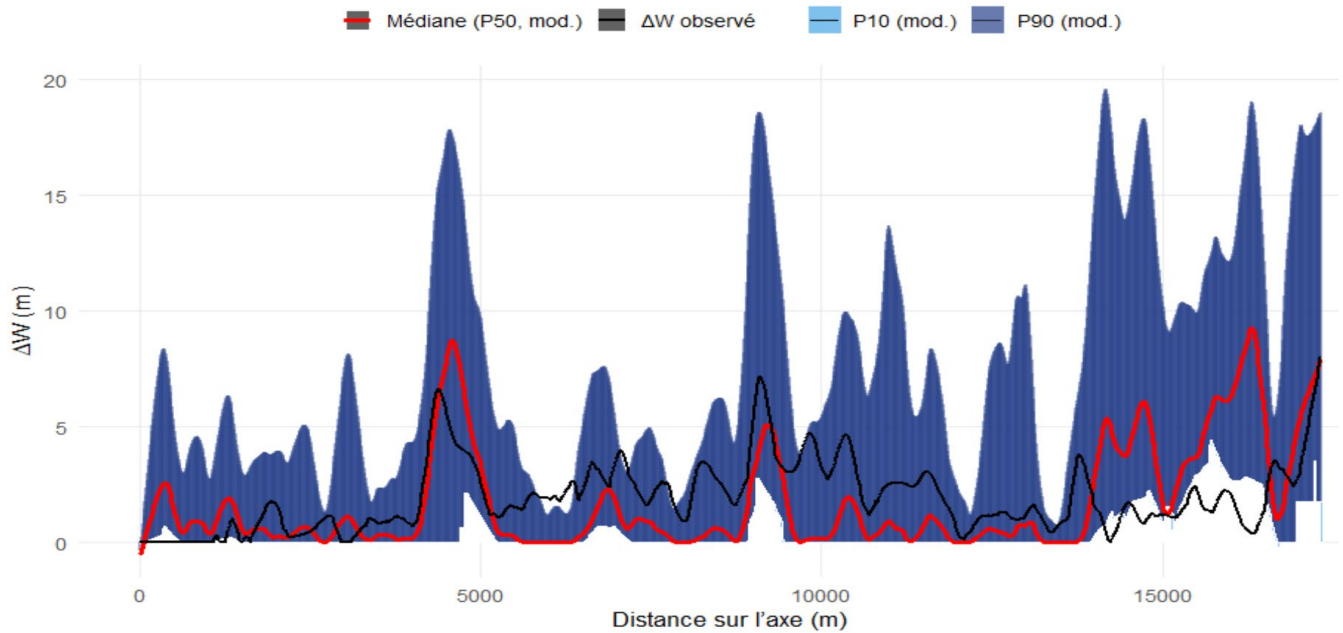


Figure 172 Évolution spatiale de l'élargissement effectif ΔW le long de l'axe du Rancure : comparaison modélisation/observation pour la crue de janvier 2014 (scénario AMC3).

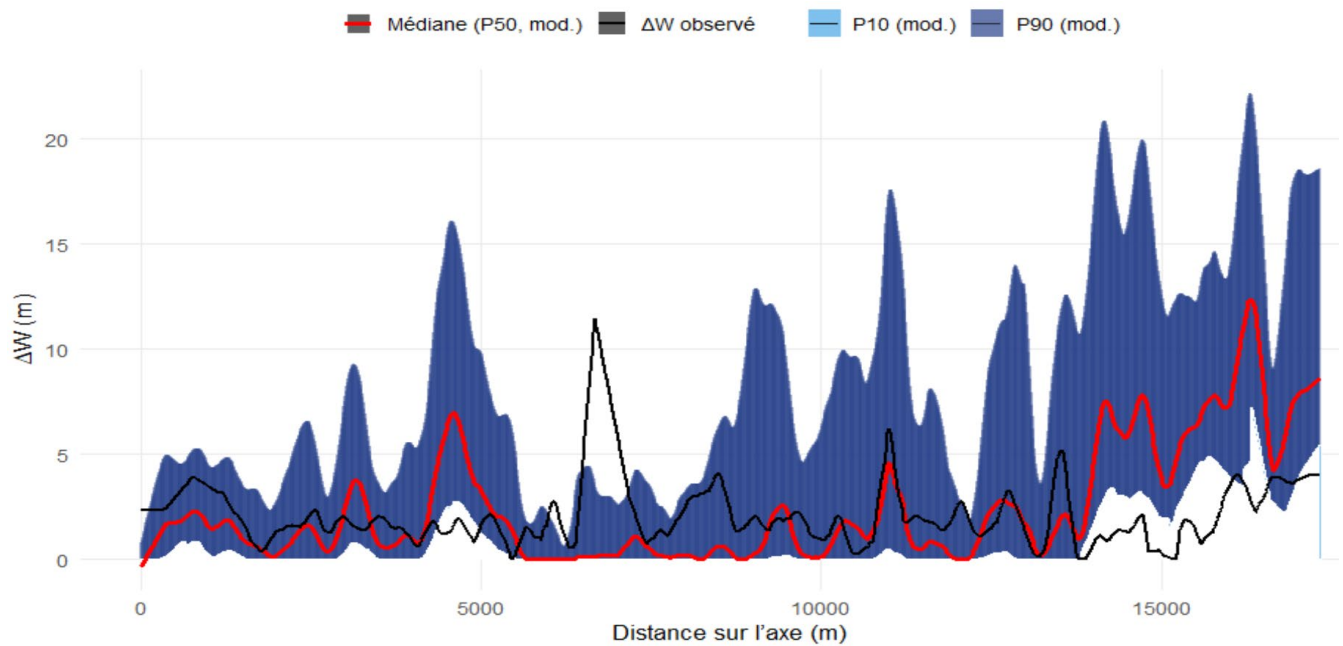


Figure 173 Évolution spatiale de l'élargissement effectif ΔW le long de l'axe du Rancure : comparaison modélisation/observation pour la crue de novembre 2019 (scénario AMC2).

4.3.2.5 Estimation des élargissements pour les crues de référence

À partir du cadre auto-limitant décrit plus haut et du calage de β réalisé sur 2014 et 2019, nous estimons l'élargissement potentiel du chenal actif pour les deux crues de référence déjà considérées dans l'évaluation des niveaux d'eau :

- la crue de novembre 2019 (AMC2),
- la crue issue de l'analyse bivariée des pluies (BivP100).

Pour ces crues de référence (2019 AMC2 et BivQ100), la méthodologie auto-limitante calée sur 2014–2019 est appliquée avec les adaptations suivantes :

- Base géométrique MNT : la largeur rectangulaire équivalente L_{rect} est calculée directement à partir du MNT et combinée à la largeur observée W_0 pour définir le rapport $R = W_0/L_{\text{rect}}$
- Transfert de β : les valeurs de β issues du calage sur 2014 et 2019 sont conservées par tronçon homogène et appliquées aux crues de référence sans recalage.

Schéma directeur de gestion globale du Rancure (plan de gestion de l'espace alluvial)

Phase 1 : Diagnostic

Octobre 2025

- Paramétrage des incertitudes : Un intervalle de $\pm 20\%$ est retenu pour W_0 et D84, centré sur les valeurs de référence issues du MNT et des orthophotos. La largeur initiale étant mieux contrainte par le MNT, on ajoute en complément une incertitude de $\pm 20\%$ sur le paramètre critique de Shields (τ^*_c).
- Sorties : les élargissements prédits (ΔW) sont résumés par médiane et quantiles [P10–P90], lissés pour réduire le bruit d'interpolation, puis ventilés sur chaque rive soit en 50/50 soit selon les parts RG/RD identifiées lors des crues de janvier 2014 et novembre 2019 (moyenne des deux événements).

Cette étape reprend le même schéma conceptuel que le calage, mais en l'ancrant sur la géométrie issue du MNT et avec transfert direct de β . Les résultats pour les deux crues de référence sont présentés à la Figure 174 et à la Figure 175.

Globalement, l'intervalle d'incertitude [P10–P90] se resserre nettement. La raison principale est une largeur initiale mieux contrainte par le MNT, qui réduit la dispersion des tirages.

Pour 2019_AMC2, les élargissements simulés sont globalement supérieurs à ceux issus du calage. Plusieurs facteurs peuvent l'expliquer :

- la géométrie de départ (MNT) est localement plus étroite que la ligne de base implicite du calage : à débit identique, l'accroissement de largeur requis est plus important ;
- le transfert de β sans ré-ajustement fin tronçon par tronçon peut majorer l'érodabilité là où les berges sont en réalité plus cohésives (végétation, armatures locales) ;
- la modulation de τ^*_c ($\pm 20\%$) abaisse dans une fraction des tirages le seuil critique, ce qui gonfle la médiane et P90.

L'écart entre 2019_AMC2 et BivP100 reste notable mais s'avère limité par l'imposition de la borne latérale $W_{\max}$ (définie comme le maximum entre la bande active historique 1950/1965 et les terrasses anciennes). Cette borne est fréquemment atteinte, ce qui traduit une saturation du potentiel d'élargissement : même si l'intensité hydrologique augmente, le chenal ne peut dépasser des marges latérales déjà identifiées.

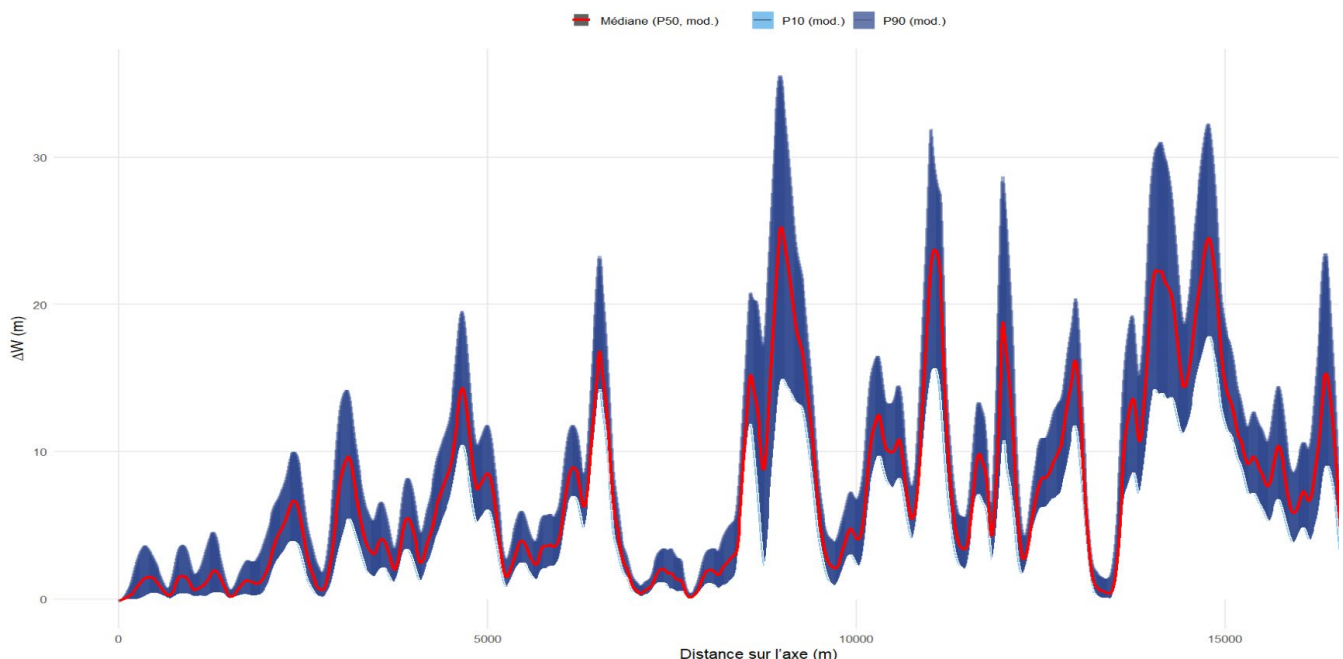


Figure 174 Estimation stochastique des élargissements potentiels de lit pour la crue de référence « 2019_AMC2 »

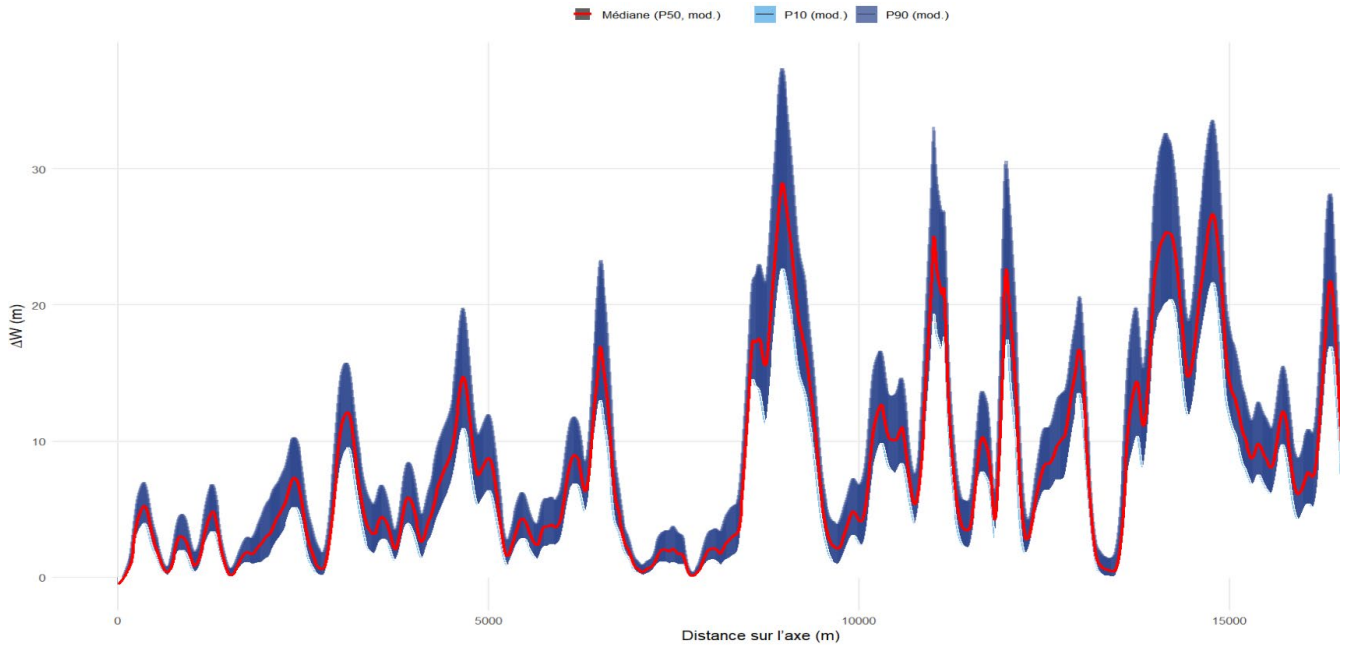


Figure 175 Estimation stochastique des élargissements potentiels de lit pour la crue de référence « BivP100 »

Dans la continuité, les cartes de la traversée d'Oraison (Figure 176) et de la traversée du Castellet (Figure 177) présentent, pour chaque secteur, les rives élargies médianes simulées pour 2019_AMC2 et BivP100 (avec une ventilation « rive droite/rive gauche » identifiée lors des crues de janvier 2014 et novembre 2019), superposées au corridor de mobilité historique (union de la bande active 1950–65 et des terrasses anciennes). Elles illustrent visuellement les zones d'élargissement potentiel du chenal actif ainsi que les zones où une réactivation de l'espace de mobilité est plausible. L'ensemble des planches cartographiques détaillées est fourni en Annexe 4.

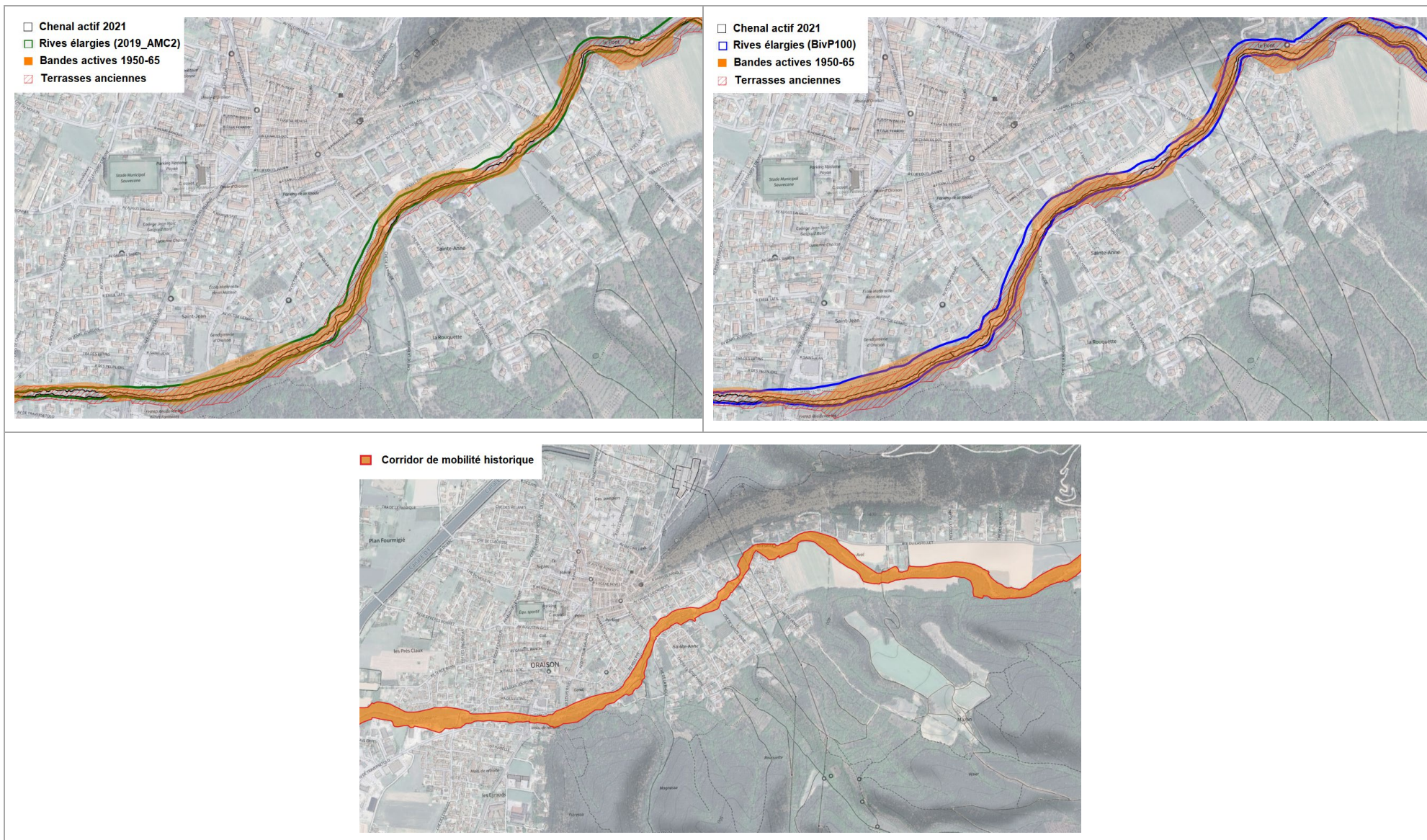


Figure 176 Traversée d'Oraison : Élargissement médian simulé (crue 2019_AMC2), Élargissement médian simulé (BivP100) et Corridor de mobilité historique

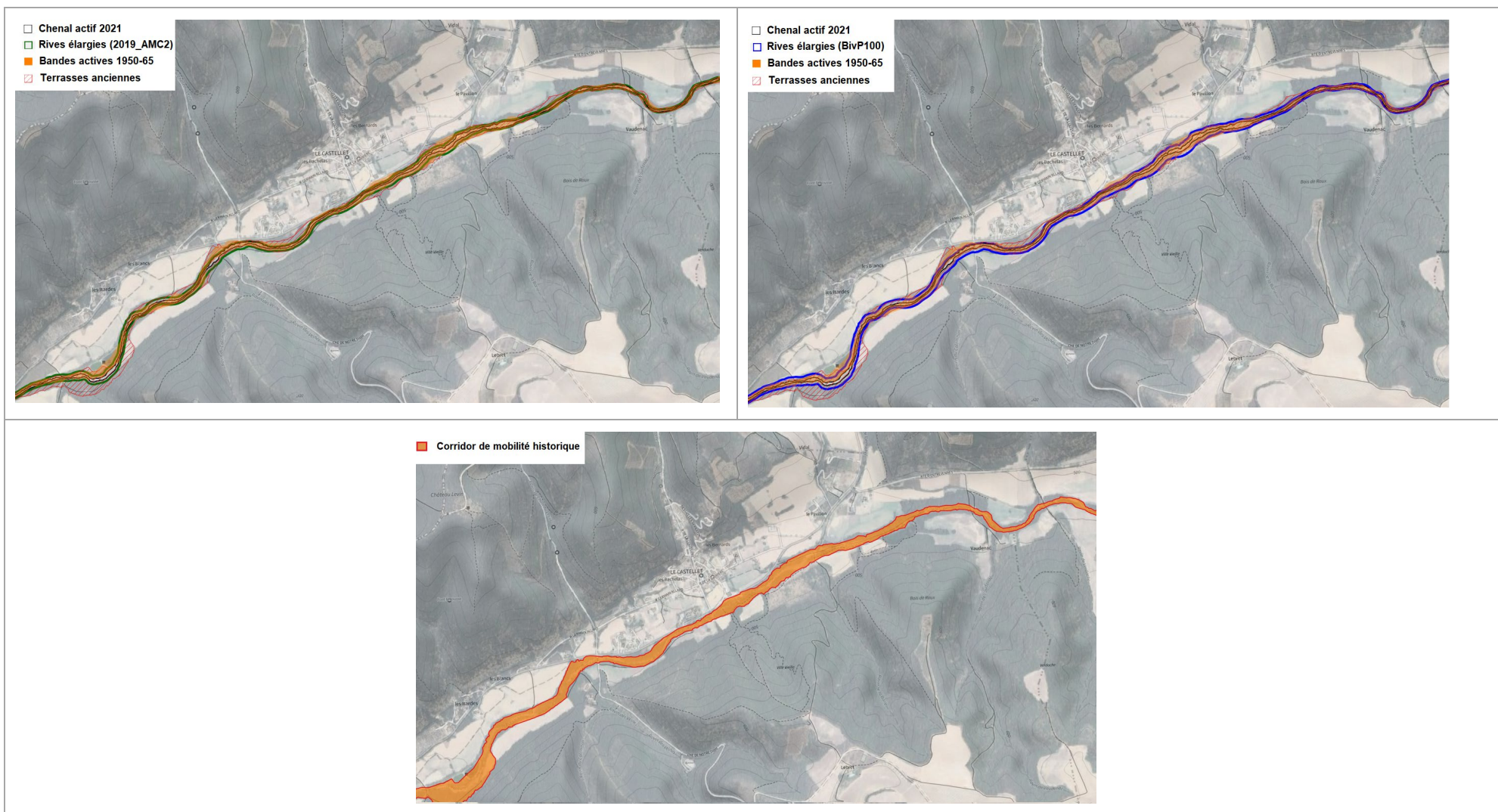


Figure 177 Traversée du Castellet : Élargissement médian simulé (crue 2019_AMC2), Élargissement médian simulé (BivP100) et Corridor de mobilité historique

4.3.3 Synthèse sur l'érosion des berges

L'analyse de l'érosion des berges sur le Rancure a été menée en combinant deux approches complémentaires et indissociables : une approche historique-géomorphologique et une approche prédictive. Cette double lecture est essentielle car le comportement du Rancure varie le long de son linéaire, avec des zones à potentiel de divagation plus ou moins marqué.

L'approche historique et géomorphologique constitue le socle de l'analyse, particulièrement pour les secteurs où le cours d'eau peut divaguer. Elle s'est appuyée sur :

- La quantification des élargissements effectifs lors des crues de 2014 et 2019, qui a permis d'identifier les réponses locales du cours d'eau à des forçages récents.
- La cartographie du corridor de mobilité historique, incluant la bande active des années 1950-65 et les terrasses anciennes. Cette analyse est fondamentale car, dans les secteurs non contraints, la réponse à une crue majeure n'est pas un simple élargissement du chenal, mais plutôt une divagation et une réoccupation potentielle de cet espace de mobilité historique.

L'approche prédictive, quant à elle, a mobilisé la méthode du « chenal à l'équilibre » adaptée de (Jakob et al., 2022). Cette technique est particulièrement indiquée pour évaluer l'élargissement dans les cas de lit actif contraint et/ou relativement profond. Elle simule un processus d'érosion auto-limitant où le chenal s'élargit jusqu'à ce que la contrainte hydraulique descende sous le seuil critique de mobilisation des matériaux grossiers (D84).

En cas de crue importante, comme la crue de référence (BivP100), la modélisation montre une intensité d'élargissement potentiellement forte. L'élargissement simulé est souvent limité par la largeur maximale physiquement disponible, définie par la bande active historique (années 1950-65) ou les terrasses anciennes. Cela suggère que lors d'un événement majeur, le cours d'eau chercherait à réactiver son ancien espace de mobilité, illustrant un scénario de rupture où une crue très morphogène pourrait remobiliser massivement le stock alluvial statique.

Il est toutefois essentiel de considérer les résultats de ce modèle avec du recul, car ils comportent des incertitudes significatives. Comme le souligne la note technique de l'ONF-RTM et de l'INRAE (2025), toute modélisation peut donner une impression trompeuse de précision et doit faire l'objet d'une interprétation experte. Dans le cas présent, le calage du modèle sur les crues de 2014 et 2019 a révélé une robustesse relativement limitée, avec une forte sensibilité aux paramètres d'entrée comme la largeur initiale du chenal, la granulométrie (D84) ou le seuil critique de mobilisation des sédiments (τ^*c). De plus, le transfert des paramètres de calage aux scénarios de référence peut conduire à des surestimations des élargissements, la géométrie de départ du modèle étant souvent plus contrainte que la réalité. Les résultats doivent donc être interprétés comme des ordres de grandeur et des tendances plutôt que comme des valeurs prédictives précises.

En conclusion, l'analyse historique permet de comprendre la dynamique réelle et de définir l'espace de mobilité du Rancure, ce qui est indispensable pour interpréter les résultats de la modélisation. L'approche prédictive, quant à elle, offre une quantification du potentiel d'ajustement morphologique, mais ses résultats ne sont pertinents que lorsqu'ils sont lus au regard des contraintes physiques et des comportements (élargissement contraint vs. divagation) identifiés par l'analyse géomorphologique.

5 GLOSSAIRE

- **Aggradation** : Accumulation d'alluvions dans le lit d'un cours d'eau. Ce phénomène se manifeste sur le Rancure et le Puimichel dans des secteurs spécifiques où la capacité de transport diminue, favorisant le dépôt de matériaux. Ces zones, qualifiées de « lit aggradé, en toit », favorisent les débordements.
- **Alluvions Matériaux** (galets, sables, limons, etc.) déposés par un cours d'eau. Dans le bassin du Rancure, les alluvions actuelles ou récentes proviennent principalement du remaniement des conglomérats de Valensole.
- **Analyse diachronique** Analyse de l'évolution d'un système à travers le temps. Pour le Rancure, cette analyse a consisté à compiler des données anciennes (orthophotos, topographies) pour étudier les modifications du tracé du lit, de la largeur de la bande active, ainsi que pour évaluer les phénomènes passés d'incision ou de dépôts sédimentaires.
- **Avulsion** le terme « avulsion » désigne un phénomène naturel où un cours d'eau (rivière, fleuve) abandonne son lit actuel pour adopter un nouveau tracé, souvent de manière brutale ou progressive. Ce processus est généralement lié à des changements morphologiques importants
- **Bande active** Emprise du cours d'eau qui englobe son lit ainsi que les bancs de galets peu ou pas végétalisés. C'est la zone où se concentre l'activité morphogène. L'analyse diachronique du Rancure et du Puimichel montre une tendance globale à la réduction de la largeur de la bande active depuis le milieu du XXe siècle, signe d'un resserrement du lit et d'une stabilisation des berges.
- **Charriage** Mode de transport des matériaux les plus grossiers (galets, blocs) qui se déplacent sur le fond du lit par roulement, glissement ou par bonds (saltation). Le charriage important de matériaux par le Rancure est une caractéristique de son fonctionnement hydro-sédimentaire, influencé par des formations géologiques facilement érodables.
- **Cône de déjection** Zone où un cours d'eau, en arrivant dans une vallée ou une plaine, perd de sa pente et de son énergie, et dépose une part importante de sa charge en sédiments. Historiquement, le Rancure a formé un cône de déjection à son arrivée dans la plaine d'Oraison.
- **Corsetage (du lit)** Ensemble des ouvrages longitudinaux (enrochements, murs, gabions) ou des formations naturelles (berges rocheuses) qui limitent la mobilité latérale d'un cours d'eau. Sur le Rancure, le corsetage se concentre principalement dans les secteurs du Castellet et d'Oraison, où des routes, murs et protections de berges fixent le tracé du lit.
- **Crue morphogène** Crue capable de transporter la charge sédimentaire grossière et de modifier de manière significative la morphologie du lit d'un cours d'eau. Les crues de 2014 et 2019 sur le Rancure sont considérées comme morphogènes, ayant provoqué des élargissements localisés du lit et la remobilisation du stock alluvial. On distingue les crues de construction (fréquentes, façonnent le lit) des crues d'ébauche (rares et de haute magnitude, pouvant provoquer des changements brutaux comme des avulsions).
- **Embâcle** Obstruction du lit d'un cours d'eau par un amas de flottants, principalement du bois. La formation d'embâcles sur le Rancure est un risque majeur au niveau des ouvrages de franchissement (ponts, passages busés, gués), car ils peuvent provoquer des débordements, des affouillements et des dommages aux structures.
- **Forçage (anthropique, climatique)** Facteur externe qui influence et modifie la dynamique d'un cours d'eau.

- Forçage anthropique : actions humaines telles que l'endiguement, les extractions de matériaux, la construction d'ouvrages (canal EDF, ponts, seuils) ou encore le reboisement des versants.
- Forçage climatique : changements climatiques à grande échelle, comme la sortie du Petit Âge Glaciaire (PAG) ou le réchauffement actuel, qui modifient le régime des pluies et des crues.
- **Hydromorphologie** / Hydromorphologique Discipline scientifique qui étudie les formes des cours d'eau (morphologie) et leurs interactions avec les écoulements d'eau (hydrologie) et le transport des sédiments. Le diagnostic hydromorphologique du Rancure vise à analyser son évolution passée et son fonctionnement actuel pour orienter sa gestion future.
- **Hyétogramme / Hydrogramme**
 - Hyétogramme : Représentation graphique de l'intensité des précipitations (pluie) en fonction du temps. Des hyétogrammes ont été construits pour modéliser la réponse du bassin du Rancure à des pluies de projet.
 - Hydrogramme : Représentation graphique du débit d'un cours d'eau en un point donné en fonction du temps. Dans l'étude du Rancure, les hydrogrammes sont générés par des modèles pluie-débit pour simuler les crues.
- **Incision** Phénomène d'érosion verticale qui conduit à l'enfoncement ou au creusement du lit d'un cours d'eau. Sur le Rancure, une tendance à l'incision verticale est observée, notamment en comparant le profil actuel aux terrasses anciennes. Ce processus est une conséquence du déficit sédimentaire.
- **Perturbateur hydromorphologique** Ensemble des ouvrages transversaux (ponts, seuils, gués, passages busés) situés dans le lit d'un cours d'eau. Ces structures modifient le profil en long, segmentent le lit et peuvent altérer la continuité hydraulique, sédimentaire et écologique. Le rapport sur le Rancure en recense de nombreux, dont certains ont une influence marquée sur la dynamique du cours d'eau.
- **Ripisylve** Formations végétales boisées (forêts, bois, haies) présentes le long des cours d'eau. La ripisylve du Rancure, composée principalement de chênes, peupliers et saules, joue un rôle écologique essentiel en tant que corridor et réservoir de biodiversité. Elle contribue également à la stabilisation des berges.
- **Stock alluvial** Ensemble des matériaux alluvionnaires (sédiments) disponibles dans le lit d'un cours d'eau et ses berges, qui peuvent être mobilisés lors des crues. Pour le Rancure, ce stock est principalement hérité du démantèlement des conglomérats de Valensole. On distingue le stock alluvial dynamique (matériaux mobiles) du stock alluvial statique (matériaux fixés par la végétation ou déconnectés).
- **Temps de concentration** Temps théorique nécessaire à une goutte d'eau tombée sur le point le plus éloigné de l'exutoire d'un bassin versant pour atteindre cet exutoire. Pour le bassin du Rancure, ce paramètre a été estimé entre 3 et 6 heures à l'aide de formules empiriques et de modélisations hydrologiques, afin de caractériser la dynamique de réponse du bassin aux pluies.
- **Trajectoire géomorphologique / Trajectorielle** Concept permettant d'analyser les évolutions d'un cours d'eau en examinant son passé (héritage), son présent (fonctionnement actuel) et son futur (tendances d'évolution). L'analyse trajectorielle du Rancure a mis en évidence une tendance lourde à la réduction des apports sédimentaires et au resserrement de son lit.

6 BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Schéma d'aménagement hydraulique du Rancure_Rapport de Synthèse », Societe du Canal de Provence (SCP), Tholonet, mars 1994.
- [2] « Schemas pluriannuels de gestion et de valorisation de la ripisylve des cours d'eau du département des Alpes de Haute Provence _ Etat des lieux et diagnostics_Bassin versant du Rancure », EGIS Eau, ARC/04116F, déc. 2011.
- [3] J.-R. Malavoi et J.-P. Bravard, « Eléments d'hydromorphologie fluviale », ONEMA, oct. 2010.
- [4] « Diagnostics/Etudes Préliminaires et porposition d'un programme global d'actions pour le bassin versant du Rancure », Syndicat Mixte Asse Bléone, févr. 2021.
- [5] « Plan de Prévention des Risques naturels de la commune d'Oraison _ Rapport de présentation », DDE 04, oct. 1999.
- [6] « Etude hydraulique du ravin de Rancure_Commune du Castellet », SOGREAH, 4240823, nov. 2007.
- [7] « Cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables_Département des Alpes de Hautes Provence », Ginger SIEE, janv. 2008.
- [8] « Projet de Plan de Pévention des Risques naturels prévisibles_Commune du Castellet_Rapport de présentation », DDT/Alp'Georisques, nov. 2014.
- [9] « Schéma directeur de gestion globale de l'Asse et ses affluents _ Etat des lieux-Diagnostic », HYDRETUDES, GA19-005, 2022.
- [10] « Abaissement partiel du gué du pont de la RD101 su rle Rancure à Entrevennes et réinjection des matériaux dans la durance _ Compte-rendu de visite », Syndicat Mixte Asse Bléone, aout 2023.
- [11] « Etude hydraulique _ Reconstruction du pont du Puimichel et effacement du passage à gué de la RD101 », ABO ERG Environnement.
- [12] D. Joly, T. Brossard, H. Cardot, J. Cavailhes, M. Hilal, et P. Wavresky, « Les types de climats en France, une construction spatiale », *Cybergeo Eur. J. Geogr.*, juin 2010, doi: <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23155>.
- [13] DREAL PACA, « Atlas des paysages des Alpes de Haute-Provence - Le Plateau de Puimichel », 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://departement04.atlas-paysages-paca.fr/les-unites-paysageres/liste-des-unites-paysageres/le-plateau-de-puimichel.html>
- [14] P. Cantet et P. Arnaud, « Extreme rainfall analysis by a stochastic model: impact of the copula choice on the sub-daily rainfall generation », *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 28, n° 6, p. 1479-1492, 2014.
- [15] P. Cantet, « Mise à jour de la base SHYREG-Pluie : Spatialisation des paramètres », INRAE, Aix-en-Provence, août 2018.
- [16] E. Gaume, M. Mouhou, et V. Thauvin, « Coefficient d'abattement spatial des pluies en région méditerranéenne adaptés aux petits bassins versants », févr. 2001.
- [17] P. Savary, « Estimation du temps de concentration t_{ctc} pour des bassins-versants non urbanisés », 2018.
- [18] F. Pons, M. Alquier, E. Paya, C. Moulin, N. Panier, et A. E. Chollet, « First tests of Cartino2D method on Toulon French metropolis », *LHB Hydrosoci. J.*, vol. 107, n° 1, 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/00186368.2021.1912968>.
- [19] G. Evin et G. Piton, « Analyse bivariée des liens entre magnitude et durée des crues en zones Alpine et Pyrénéenne », INRAE, Rapport de recherche fhal-02509705, 2020.

- [20] M. Brunner, J. Seibert, et A.-C. Favre, « Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation », *Wiley Interdiscip. Rev. Water*, vol. 3, n° 6, p. 819-833, 2016, doi: 10.1002/wat2.1173.
- [21] G. Salvadori, F. Durante, C. D. Michele, M. Bernardi, et L. Petrella, « A multivariate copula-based framework for dealing with hazard scenarios and failure probabilities », *Water Resour. Res.*, vol. 52, n° 5, p. 3701-3721, 2016, doi: 10.1002/2015WR017225.
- [22] A. Recking, « Simple Method for Calculating Reach-Averaged Bed-Load Transport », *J. Hydraul. Eng.*, vol. 139, n° 1, p. 70-75, janv. 2013, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000653.
- [23] P. Lefort, « Expertise des études de la Bléone en amont du Grand Pont de Digne », nov. 2006.
- [24] P. Arnaud, Y. Eglin, B. Janet, et O. Payrastre, « Base de données SHYREG-Débit : Méthode - Performance - Limites », IRSTEA, mars 2013.
- [25] P.-L. Ligier, « Implementation of a rainfall-runoff model in TELEMAC-2D », in *Proceedings of the XXIIIrd TELEMAC-MASCARET UserConference*, Paris, France, oct. 2016, p. 13-19.
- [26] F. Habets *et al.*, « The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France », *J. Geophys. Res.*, vol. 113, n° D6, 2008.
- [27] J. Collina-Girard et R. Gribouard, « La structuration profonde du Plateau de Valensole (Alpes de Haute-Provence). Apports des analyses des réseaux d'entailles et des surfaces topographiques », *Géologie Méditerranéenne*, vol. 17, n° 2, p. 153-171, 1990.
- [28] P. Dubois et R. Curnelle, « Résultats apportés par le forage Les Mées n°1 sur le plateau de Valensole (Alpes-de-Haute-Provence) », *C. r. Somm. Séances Société Géologique Fr.*, p. 181-1847, 1978.
- [29] C. Blanc, *Les insurgés républicains d'Oraison et du Val de Rancure : décembre 1851*. Association Rancure, 2007.
- [30] H. Piégay, G. Pautou, et C. Ruffinoni, *Les forêts riveraines des cours d'eau (écologie, fonctions et gestion)*, CNPF-IDF. 2003.
- [31] *A guidance standard for assessing the hydromorphological features of rivers*, Norme CEN TC 230/WG2/TG5 : N32, 2002.
- [32] J.-R. Malavoi, F. Liebault, H. Piégay, N. Sureau-Blanchet, et Terrier, « Elaborer et mettre en oeuvre un plan de gestion sédimentaire _ Bassin Rhône-Méditerranée_ », Secrétariat technique du bassin Rhône-Méditerranée, Guide Technique, juin 2024.
- [33] L. Valette, A. Chandesris, N. Mengin, J.-R. Malavoi, Y. Souchon, et J.-G. Wasson, « SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau SYRAH-CE : Principes et méthodes de la sectorisation hydromorphologique », CEMAGREF-ONEMA, févr. 2008.
- [34] L. Grosprêtre et K. Kreutzenberger, « Plateforme Pressions et Risques d'impacts HYdroMOorphologiques (PRHYMO) : rapport méthodologique », Dynamique Hydro et Office Français de la Biodiversité, juin 2024.
- [35] C. Miramont, M. Jorda, et G. Pichard, « Évolution historique de la morphogenèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la moyenne durance (France du sud-est) », *Géographie Phys. Quat.*, vol. 52, n° 3, p. 381-392, doi: 10.7202/004855ar.
- [36] F. Liébault et H. Piégay, « Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. », *Earth Surf. Process. Landf.*, vol. 27, n° 4, p. 425-444.
- [37] Syndicat Mixte Asse Bléone, « Travaux d'entretien du lit du ravin des Brandaires au droit du gué de la voie communale n°2 sur la commune de St Julien d'Asse : Compte rendu des travaux du 26/09 au 01/10/2025 », Syndicat Mixte Asse Bléone, Digne-les-Bains, Compte rendu, 2025.
- [38] M. Morel, G. Piton, G. Evin, et C. Le Bouteiller, « Projet HYDRODEMO Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord Action 3 : Caractériser la production sédimentaire », INRAE, Rapport de recherche, 2022.

- [39]A. Recking, « Éléments de géomorphologie fluviale – Cahier 2 : La granulométrie des cours d'eau (et sa mesure). », IRSTEA/INRAE, 2017.
- [40]M. Detert et V. Weitbrecht, « Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool. », in *River Flow 2012 (Murillo, Ed.)*, Taylor & Francis Group, London, 2012.
- [41]M. Detert et V. Weitbrecht, « User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. », *Adv. River Sediment Res. Fukuoka AI Eds*, 2013.
- [42]A. Recking, « Elements de géomorphologie fluviale. Cahier 2 : La granulométrie des cours d'eau (et sa mesure) », INRAE/IRSTEA, 2017.
- [43]A. Recking, « BedloadWeb : Equations et concepts pour le calcul du transport solide en rivières », INRAE/IRSTEA, 2020. [En ligne]. Disponible sur: DOI : 10.13140/RG.2.2.34463.30887
- [44]A. Recking, « Simple Method for Calculating Reach-Averaged Bed-Load Transport », *J. Hydraul. Eng.*, vol. 139, n° 1, p. 70-75, janv. 2013.
- [45]« Note complémentaire à la déclaration de travaux urgents sur le Rancure et le Ravin de Puimichel », Département des Alpes de Haute Provence, oct. 2023.
- [46]M. Quiniou et G. Piton, « Embâcles: concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations », ISL Ingenierie, INRAE, ffhal-03621373f, 2022.
- [47]C. Misset, G. Piton, Y. Quefféléan, et J. Bouffier, « Note technique pour aider à la réalisation des études d'aléa relatives aux cours d'eau torrentiels (état de l'art 2025) », ONF-RTM; INRAE; DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), mai 2025.
- [48]R. Ferguson, « Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams », *Water Resour. Res.*, vol. 43, n° 5, doi: <https://doi.org/10.1029/2006WR005422>.
- [49]L. Scrucca, C. Fraley, T. B. Murphy, et A. E. Raftery, *Model-Based Clustering, Classification, and Density Estimation Using mclust in R.* (2023). [En ligne]. Disponible sur: <https://mclust-org.github.io/book/>
- [50]D. Rickenmann et A. Recking, « Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set », *Water Resour. Res.*, vol. 47, n° 7, doi: <https://doi.org/10.1029/2010WR009793>.
- [51]A. Strickler, « Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen », *Bull. Tech. Suisse Romande*, 1923.
- [52]G. Piton et A. Recking, « Steep bedload-laden flows: Near critical? », *J. Geophys. Res.*, vol. 124, n° 8, p. 2160-2175, 2019.
- [53]P. Prodanovic, « PPUTILS a practical toolkit for terrain, free surface flow and wave modeling by pat ». 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://github.com/pprodano/pputils>
- [54]C. Geuzaine et J.-F. Remacle, « Gmsh: A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 79, n° 11, p. 1309-1331, 2009, doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/nme.2579>.
- [55]R Development Core Team, « R: A language and environment for statistical computing ». 2005. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.R-project.org>
- [56]GRASS Development Team, *Geographic resources analysis support system (GRASS) software.* (2017). [En ligne]. Disponible sur: <http://grass.osgeo.org>
- [57]F. Pons, « FILINO : Fignolage des données LiDAR pour les inondations (dépôt GitHub), CEREMA / filino ». Consulté le: 31 août 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://github.com/CEREMA/filino>
- [58]L. Neppel, C. Bouvier, et J. Lavabre, « Abattement spatial des précipitations en Languedoc-Roussillon. », in *Proceedings of an international symposium held at Montpellier*, avr. 2003, p. 276-283.
- [59]L. Ormsbee, « Rainfall Disaggregation Model for Continuous Hydrologic Modeling », *J. Hydraul. Eng.*, vol. 115, n° 4, 1989, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1989\)115:4\(507\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:4(507)).

- [60]B. Hingray et M. Ben Haha, « Statistical performances of various deterministic and stochastic models for rainfall series disaggregation », *Atmospheric Res.*, vol. 77, n° 1-4, p. 152-175, 2005.
- [61]M. Jakob, S. Davidson, G. Bullard, B. Collier-Pandya, P. Grover, et C. A. Lau, « Debris-flood hazard assessments in steep streams. », *Water Resour. Res.*, vol. 58, 2022, doi: <https://doi.org/10.1029/2021WR030907>.
- [62]A. Recking, « Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bed load motion », *Water Resour. Res.*, vol. 45, n° W04401.

ANNEXES

Annexe 1 Analyse bivariée des pluies basée sur la durée équivalente

En plus de l'analyse bivariée sur le couple « **Cumul Max Dtc / Cumul total précipité** », une autre marginale est construite à l'image de la durée équivalente **Deq** introduite par (Evin et Piton, 2020) [19] dans l'analyse des crues. Pour chaque bassin versant, un hyétoigramme « équivalent » est construit à partir des 27 hyétoigrammes sélectionnés. Les hyétoigrammes sont centrés et réduits, en ramenant chaque événement pluvieux à une échelle où le pic est égal à 1 et en définissant une échelle temporelle relative centrée sur le moment du pic de pluie. Ensuite, une grille temporelle commune est créée pour aligner tous les événements. A partir de ces hyétoigrammes centrés-réduits, il est possible de déterminer un hyétoigramme moyen mais aussi un hyétoigramme « quantile » (voir Figure 178).

La durée équivalente **Deq** est ensuite déterminée, pour chaque événement, en utilisant le hyétoigramme « équivalent » qui représente une distribution des précipitations et en ajustant chaque hyétoigramme reconstruit afin de préserver le cumul total de pluie et le cumul maximal sur $Dtc = 3h$. Afin de garantir des durées équivalentes inférieures ou égales à l'échelle temporelle maximale des événements sélectionnés, le hyétoigramme « équivalent » correspondant au quantile 90% est retenu.

Une seconde analyse bivariée est ainsi menée sur le couple « **Cumul Max Dtc / Durée équivalente** ».

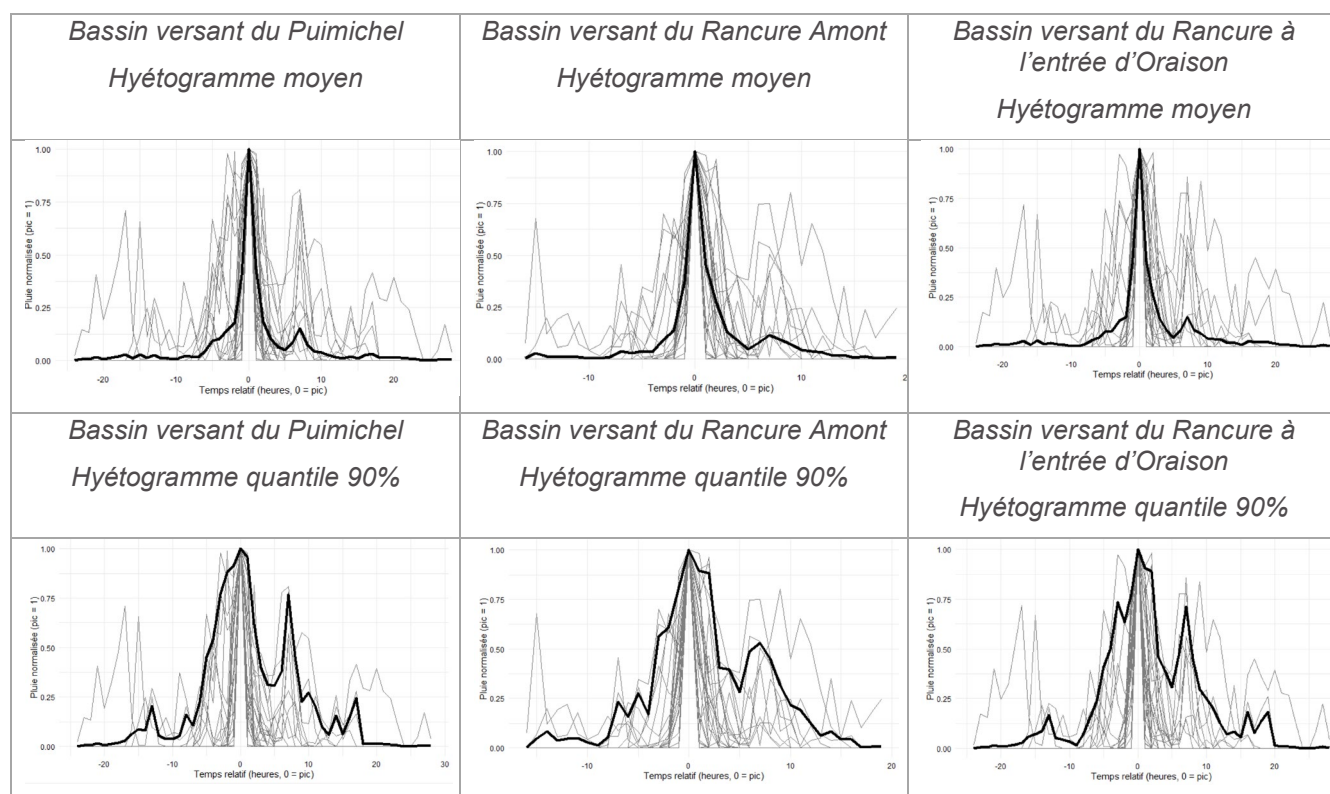


Figure 178 Hyétoigramme moyen et quantile 90 pour les trois bassins versants étudiés

Pour chaque événement, le cumul maximal de pluie sur $Dtc = 3h$ et le volume total précipité sont déterminés. Le graphique « **Cumul max Dtc vs. Durée équivalente** » est tracé pour les trois bassins versants (Figure 179).

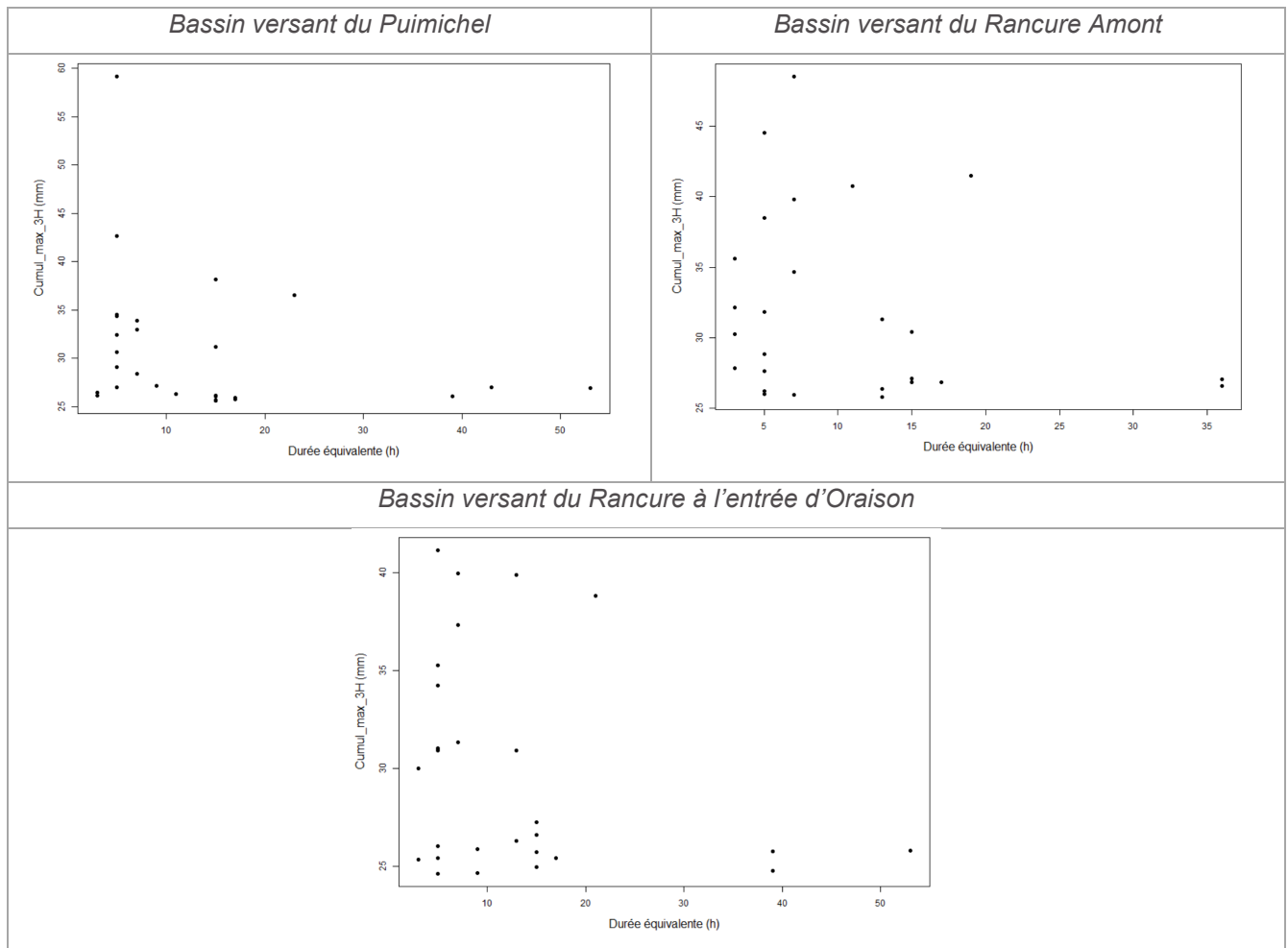


Figure 179 Lien entre cumul max de pluies sur Dtc = 3h et durée équivalente pour les trois bassins versants étudiés

La Figure 180 montre les ajustements des distributions marginales de la « durée équivalente » pour le bassin du Rancure à l'entrée d'Oraison. Concernant les ajustements, les lois suivantes ont été privilégiées :

- « Cumuls Max sur Dtc » : loi Pareto généralisée au regard de la sélection des événements via une détection sup-seuil.
- « Durée équivalente » : loi Gamma en cohérence avec l'approche d'(Evin et Piton, 2020) [19].

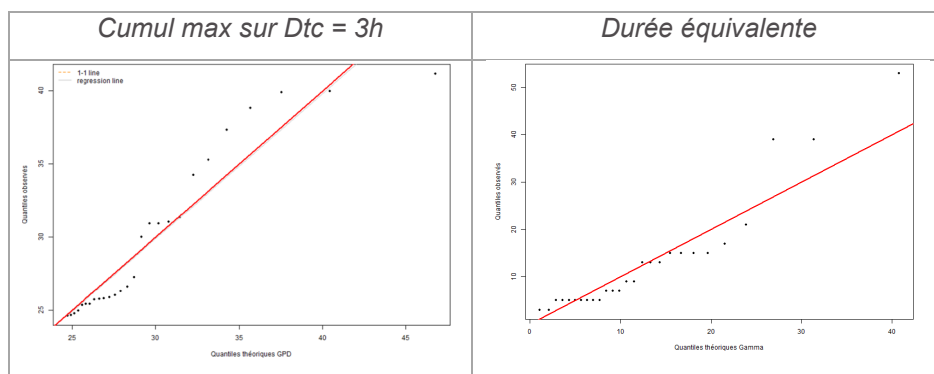


Figure 180 Ajustement des marginales l'analyse bivariee : cumul max sur Dtc et durée équivalente (bassin versant du Rancure à l'entrée d'Oraison)

Les ajustements semblent raisonnables, même si on peut suspecter une sous-estimation des plus grandes durées équivalentes pour les trois bassins versants.

La Figure 181 permet de comparer les couples « Cumul Max Dtc / Durée équivalente » observés et simulés à partir de la distribution ajustée des marginales (Cumul Max Dtc et Durée équivalente) et des copules qui permettent de modéliser la dépendance entre les deux marginales (ici la copule de Clayton

est la plus performante), pour le bassin versant du Rancure à l'entrée d'Oraison. 500 années sont simulées, qui correspondent à 1000 couples « Cumul Max Dtc / Durée équivalente ». Les nuages simulés (points gris) recouvrent bien les nuages observés (points noirs).

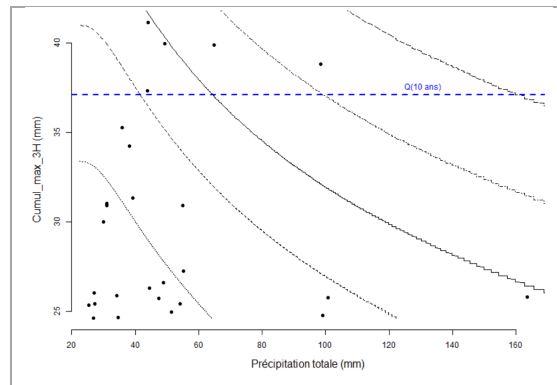


Figure 181 « Cumul Max Dtc / Cumul total précipité » (à gauche) et « Cumul Max Dtc / Durée équivalente » (à droite) pour le bassin versant du Rancure à l'entrée d'Oraison. 1000 valeurs simulées de la distribution bivariée ajustée (gris) et observations (noirs).

La Figure 182 présente, pour les trois bassins versants, les contours constitués par tous les couples « Cumul Max Dtc / Durée équivalente » correspondant aux temps de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans selon la définition de la période de retour de Kendall. Les cumuls max Dtc décrivant ces contours sont des fonctions décroissantes de la durée équivalente, puisque la durée équivalente est de moins en moins probable lorsqu'elle augmente (la densité de probabilité de la durée équivalent est une fonction décroissante).

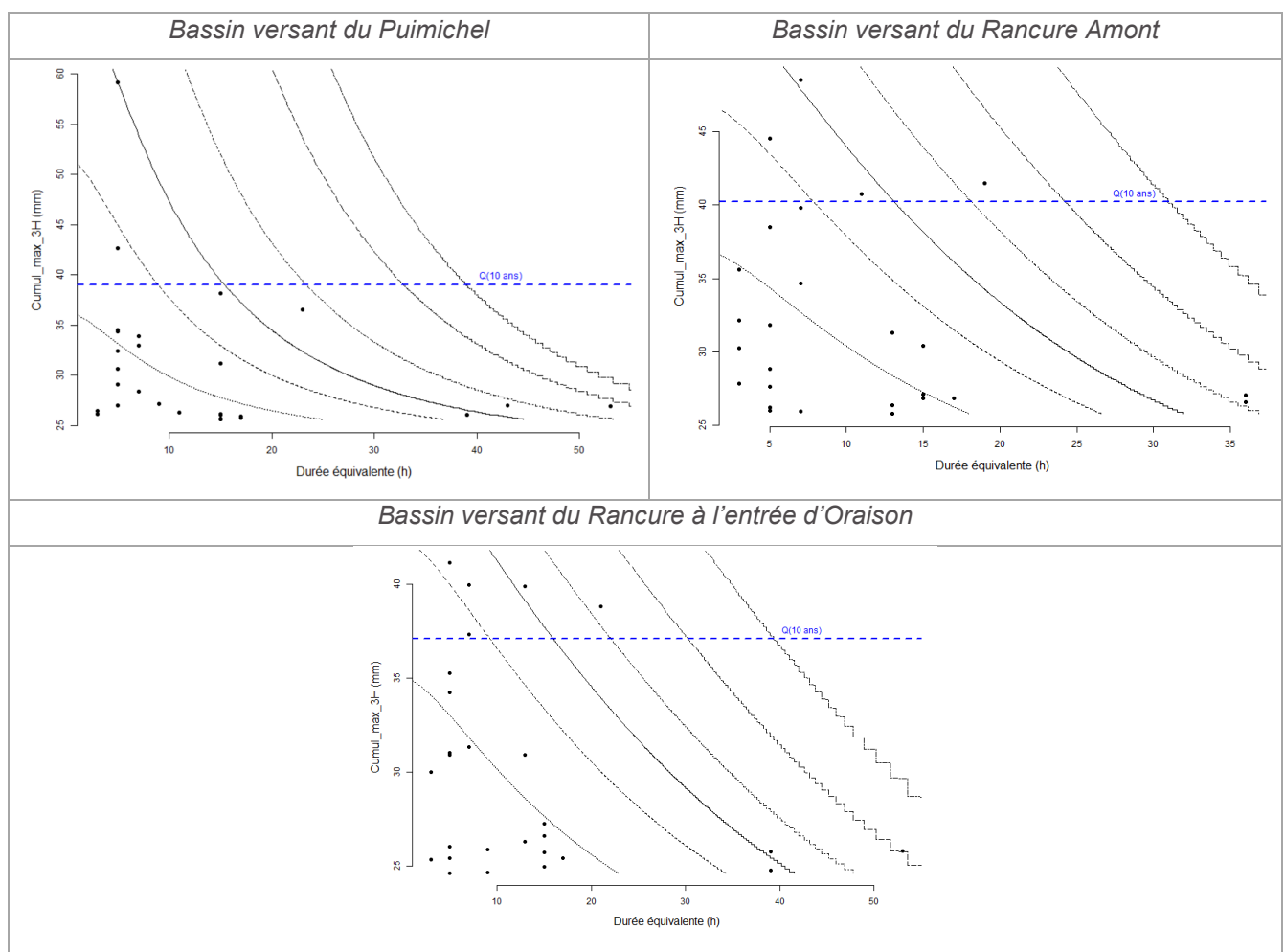


Figure 182 Illustration des contours pour différentes périodes de retour, dans l'espace « Cumul Max Dtc / Durée équivalente » pour les trois bassins versants

Pour chaque période de retour, il est possible de choisir un couple **Ce choix peut être réalisé en appliquant l'analyse proposée par (Evin et Piton, 2020) [19] pour déterminer la crue dimensionnante vis-à-vis du transport solide et du volume transporté.**

Dans la présente étude, l'analyse est menée sur les pluies. Il est donc nécessaire de mener deux étapes successives pour choisir le couple « Cumul Max Dtc / Durée équivalente » :

- **Déterminer, pour chaque couple considéré, un hyétoigramme permettant de reprendre les caractéristiques d'un couple « Cumul Max Dtc / Durée équivalente » donné.**
- **Utiliser ce hyétoigramme comme conditions de forçage à une modèle hydrologique (pluie/débit) pour établir l'hydrogramme correspondant et mener les calculs de transport solides.**

Concernant la construction du hyétoigramme, dans le cas du couple « Cumul Max Dtc / Durée équivalente », celui-ci est établi à partir du hyétoigramme « équivalent » correspondant au quantile 90% afin de rester cohérent avec l'analyse bivariable menée sur ce couple.

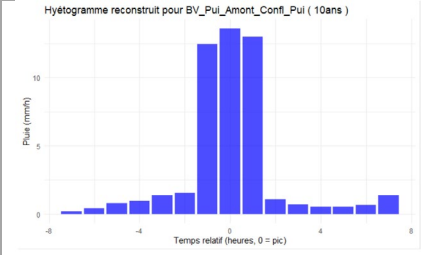
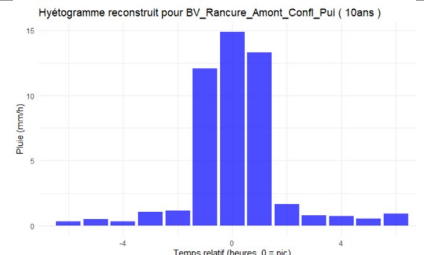
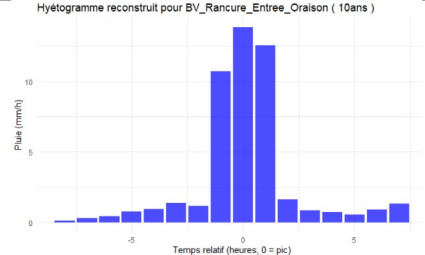
Un exemple de hyétoigrammes, pour chaque bassin versant, est donné à la Figure 183 Hyétoigrammes reconstruits selon le couple de variables analysé en considérant comme facteurs d'entrée CMDtc_{10ans-uni} et CMDtc_{100ans-uni}, en considérant comme facteurs d'entrée, le quantile 10 ans (CMDtc_{10ans-uni}) et 100 ans (CMDtc_{100ans-uni}) du cumul max sur Dtc obtenus à partir d'une analyse univariée (voir Tableau 29).

Les hyétoigrammes obtenus présentent des formes distinctes selon le couple de variables analysé. Pour le couple « CMDtc – Durée Équivalente », la majorité des cumuls de pluie est répartie sur 3 heures, indiquant une distribution relativement homogène des précipitations sur cette période.

Ces hyétoigrammes peuvent être générés pour d'autres valeurs des couples « CMDtc – Durée Équivalente », puis intégrés comme conditions de forçage dans un modèle hydrologique. Cela permet, à travers un calcul de transport solide, d'identifier le couple le plus dimensionnant.

Bassin Versant	CMDtc (m) 10ans-uni / 100ans-uni	Durée équivalente correspondante (h)
Puimichel	39 / 84	15.3 / 18.4
Rancure_Amont	40 / 60	13.1 / 16.4
Rancure_Entrée Oraison	37 / 51	16.0 / 19.7

Tableau 29 Valeurs des couples « Cumul Max Dtc / Durée équivalente » pour CMDtc_{10ans-uni} et CMDtc_{100ans-uni}

Bassin versant du Puimichel Hyétoigramme issu du couple « CMDtc_{10ans-uni} – Durée équiv »	Bassin versant du Rancure Amont Hyétoigramme issu du couple « CMDtc_{10ans-uni} – Durée équiv »	Bassin versant du Rancure à l'entrée d'Oraison Hyétoigramme issu du couple « CMDtc_{10ans-uni} – Durée équiv »
		
Bassin versant du Puimichel Hyétoigramme issu du couple « CMDtc_{100ans-uni} – Durée équiv »	Bassin versant du Rancure Amont Hyétoigramme issu du couple « CMDtc_{100ans-uni} – Durée équiv »	Bassin versant du Rancure à l'entrée d'Oraison

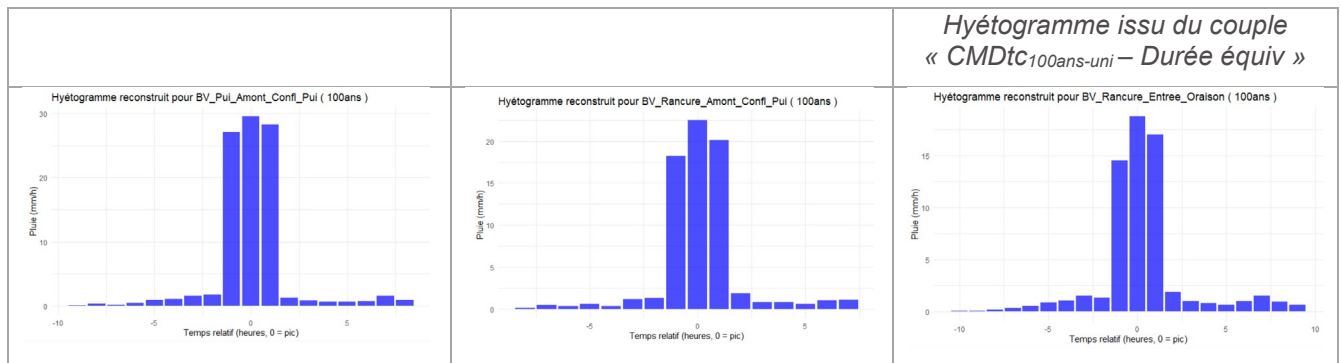


Figure 183 Hyétoigrammes reconstruits selon le couple de variables analysé en considérant comme facteurs d'entrée CMDtc_{100ans-uni} et CMDtc_{100ans-uni}

L'analyse bivariée des couples « Cumul Max Dtc – Durée Équivalente » suggère que le bassin versant du Rancure est dominé par un régime de crues dits rapides. Pour affiner la caractérisation de l'aléa inondation, les hyétoigrammes issus de cette analyse doivent être intégrés dans un modèle hydrologique pluie-débit. Cette modélisation permettrait de générer des hydrogrammes correspondant à différentes périodes de retour, facilitant ainsi l'analyse des dynamiques de crues et du transport solide.

Annexe 2 Hyétogrammes et hydrogrammes issus de l'analyse bivariable

Hyétogrammes

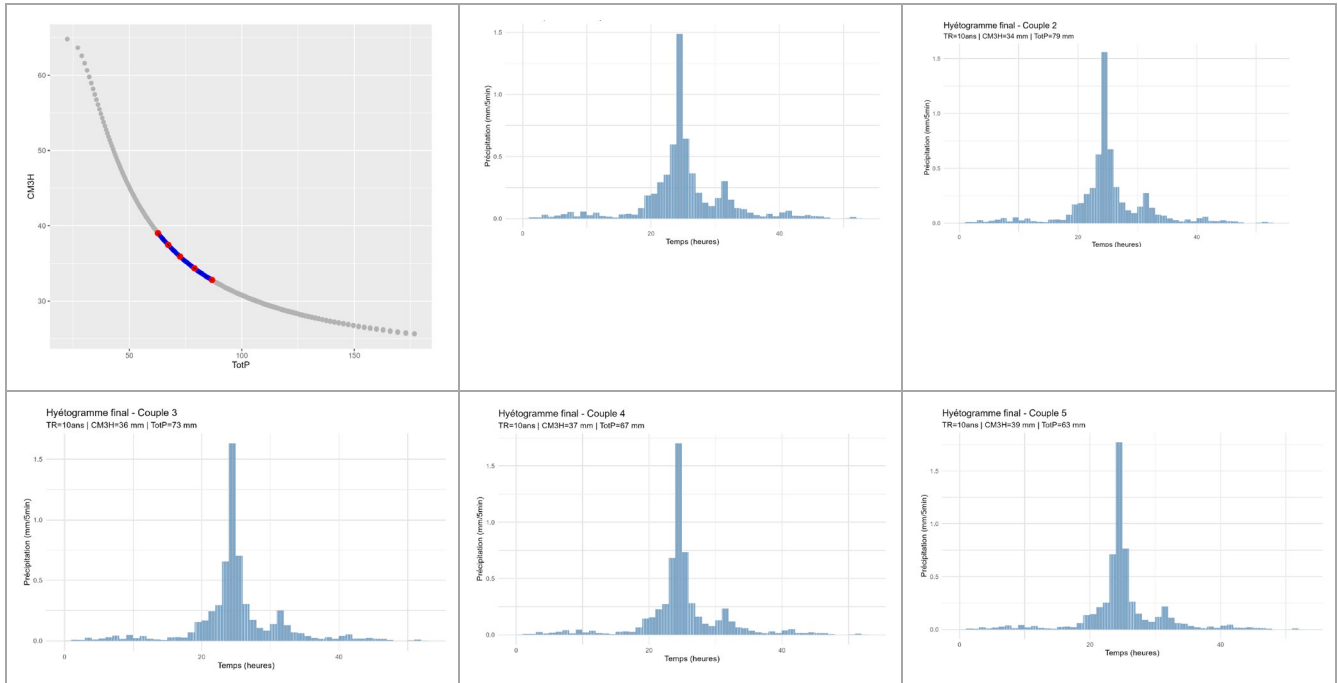


Figure 184 : Frontière de Kendall obtenue pour $T = 10$ ans (CM3H vs TotP) sur le bassin versant du Puimichel, avec sélection de couples représentatifs (points rouges) et d'hyétogrammes reconstruits associés.

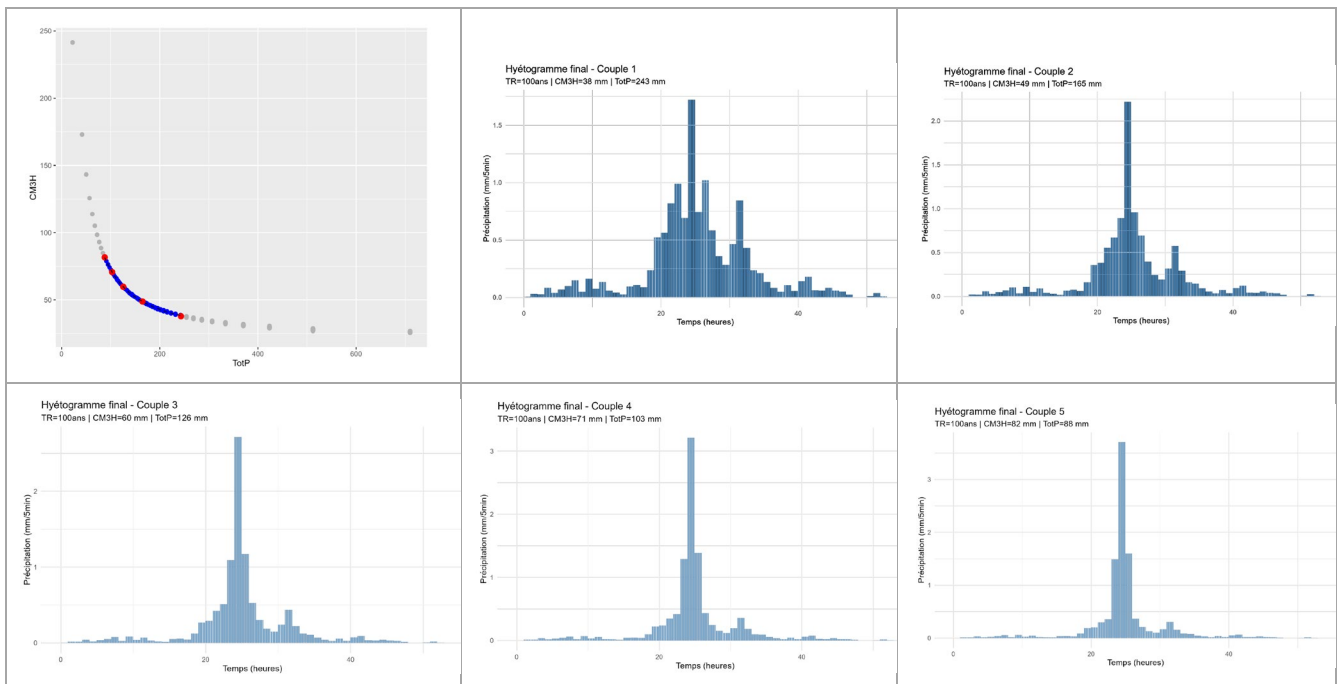


Figure 185 : Frontière de Kendall obtenue pour $T = 100$ ans (CM3H vs TotP) sur le bassin versant du Puimichel, avec sélection de couples représentatifs (points rouges) et d'hyétogrammes reconstruits associés.

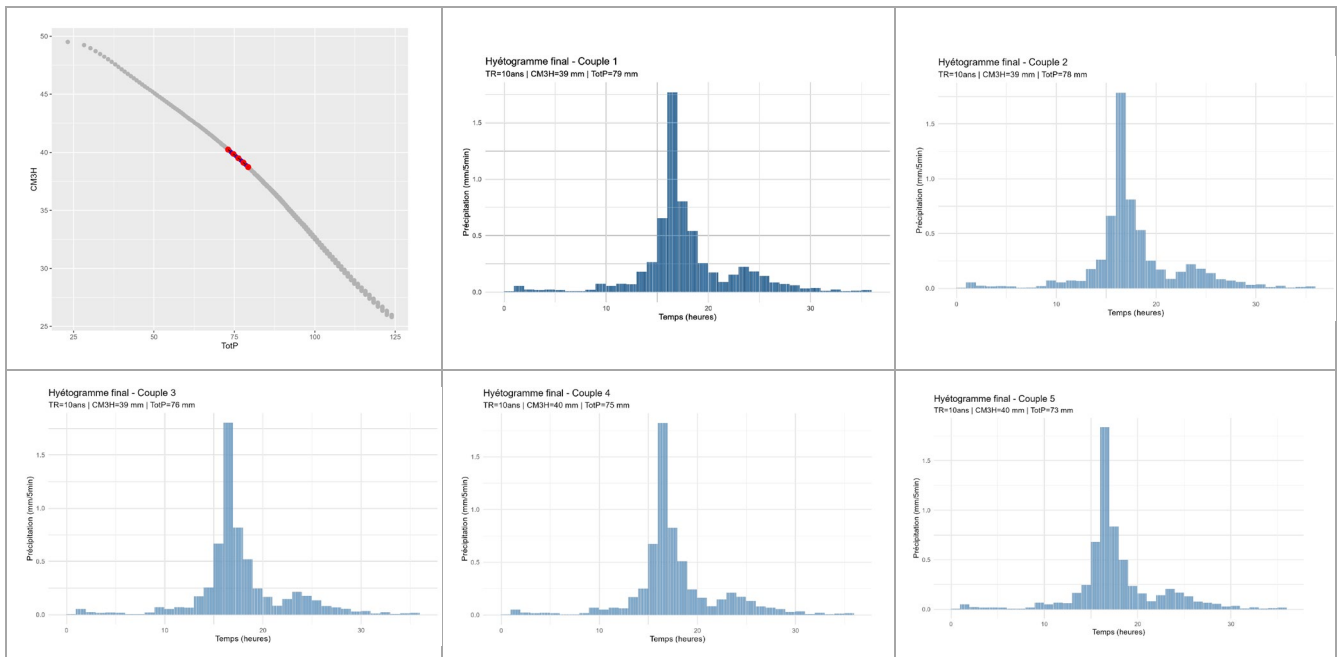


Figure 186 : Frontière de Kendall obtenue pour $T = 10$ ans (CM3H vs TotP) sur le sous-bassin versant du Rancure amont, avec sélection de couples représentatifs (points rouges) et d'hyetogrammes reconstruits associés.

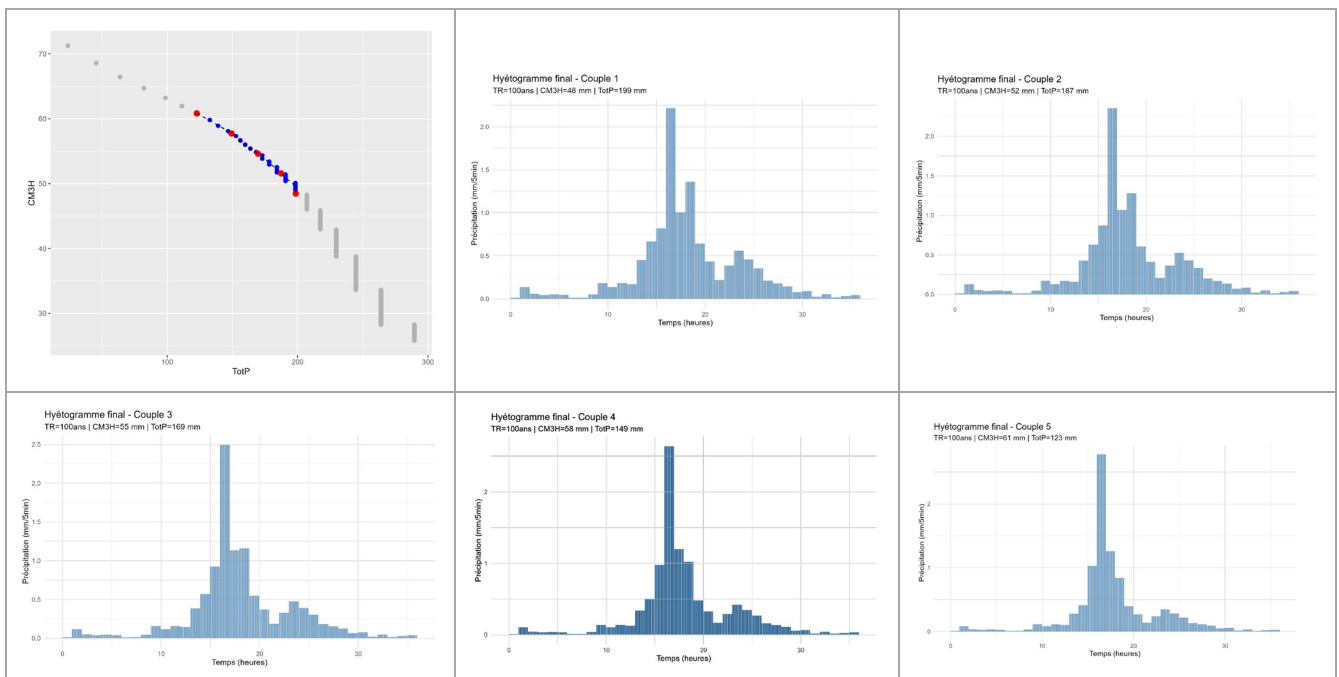


Figure 187 : Frontière de Kendall obtenue pour $T = 100$ ans (CM3H vs TotP) sur le sous-bassin versant du Rancure amont, avec sélection de couples représentatifs (points rouges) et d'hyetogrammes reconstruits associés.

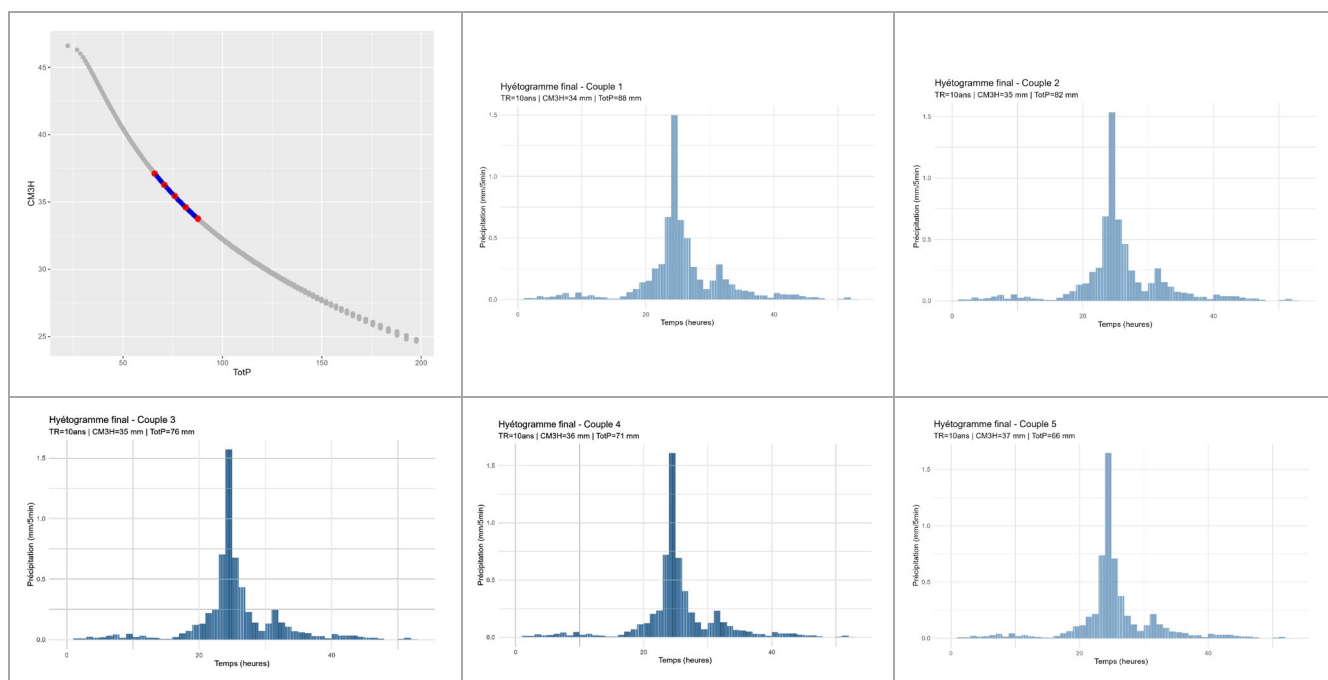


Figure 188 : Frontière de Kendall obtenue pour $T = 10$ ans (CM3H vs TotP) sur le bassin versant du Rancure (entrée d'Oraison), avec sélection de couples représentatifs (points rouges) et d'hyetogrammes reconstruits associés.

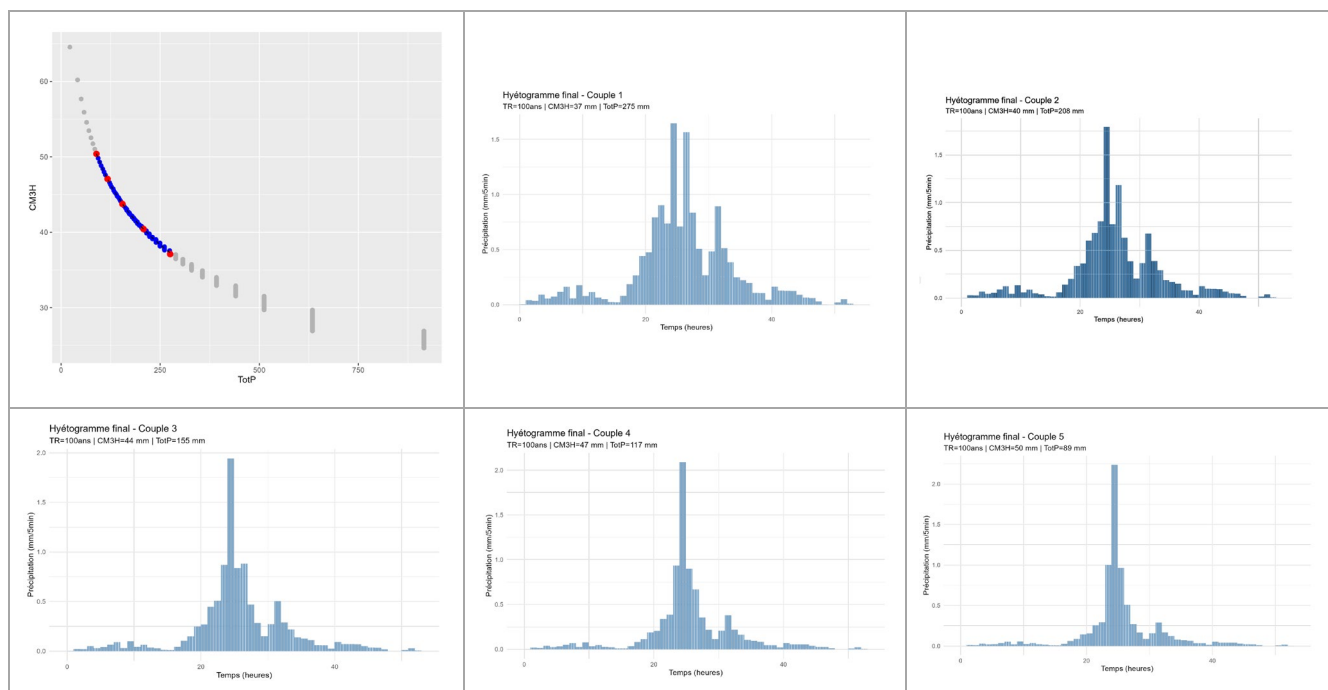


Figure 189 : Frontière de Kendall obtenue pour $T = 100$ ans (CM3H vs TotP) sur le bassin versant du Rancure (entrée d'Oraison), avec sélection de couples représentatifs (points rouges) et d'hyetogrammes reconstruits associés.

Hydrogrammes

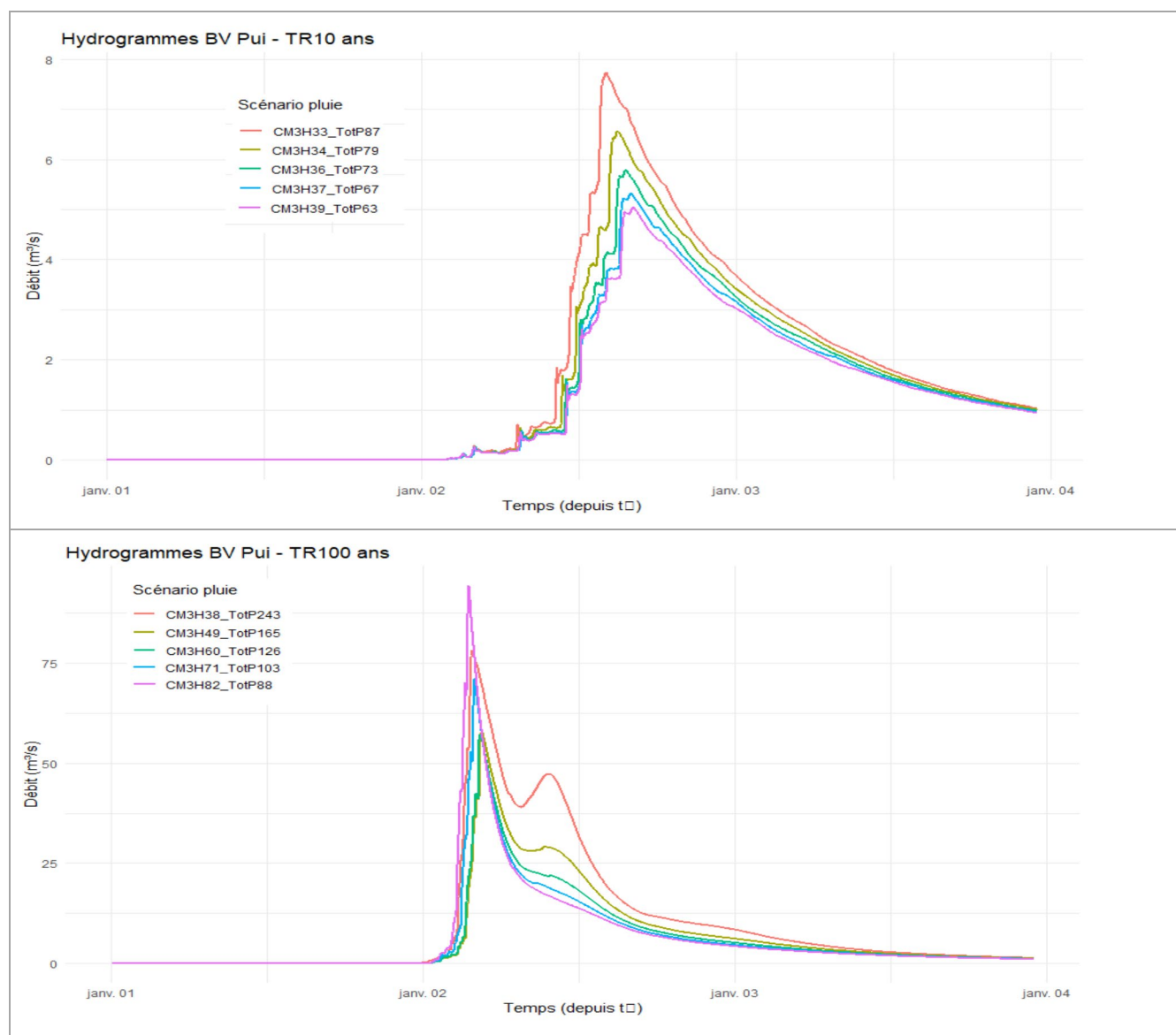


Figure 190 : Hydrogrammes simulés sur le bassin versant du Puimichel à partir des hyétogrammes issus de l'analyse bivariable : période de retour 10 et 20 ans

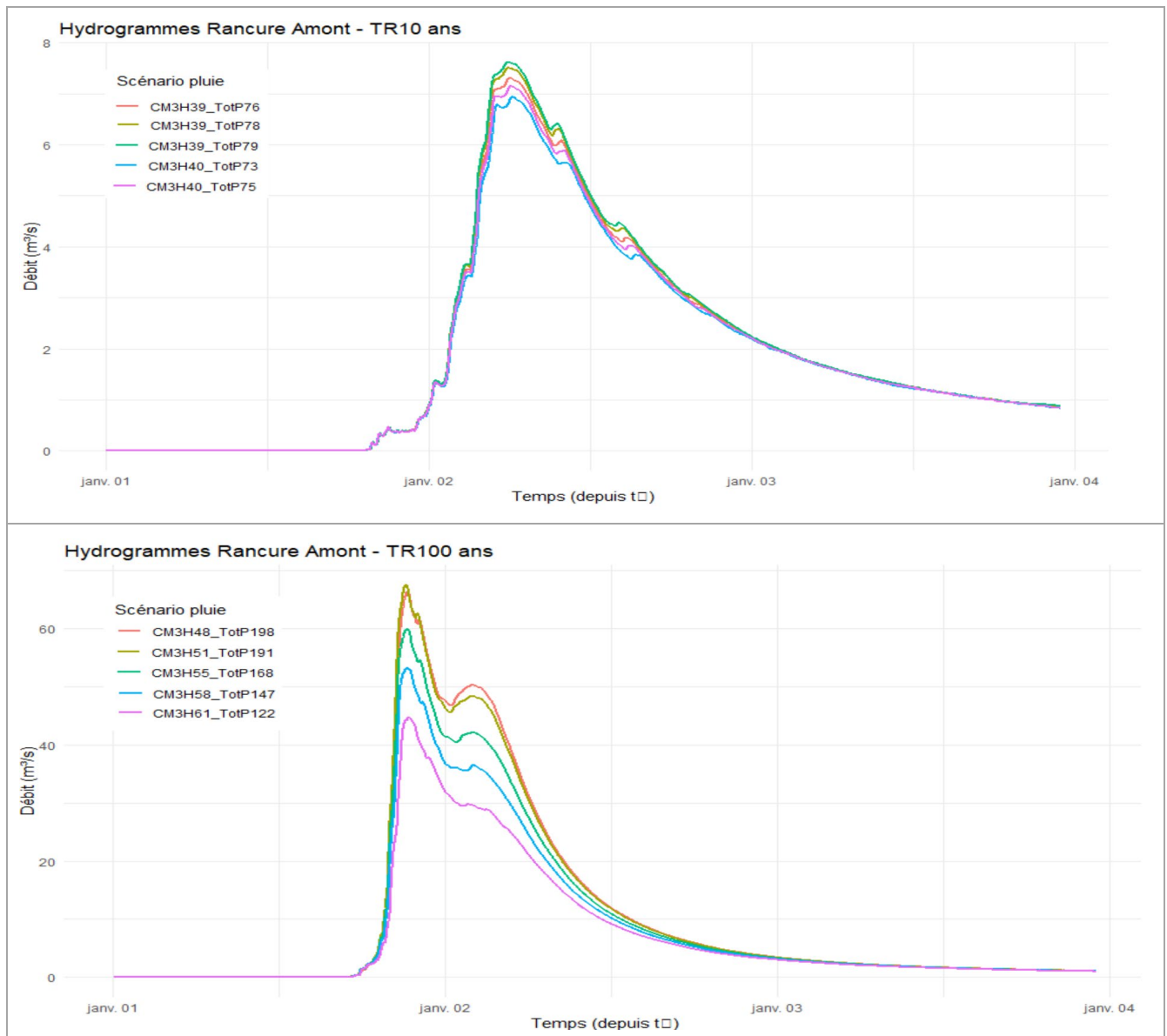


Figure 191 : Hydrogrammes simulés sur le sous-bassin versant du Rancure amont à partir des hyétogrammes issus de l'analyse bivariée : période de retour 10 et 20 ans

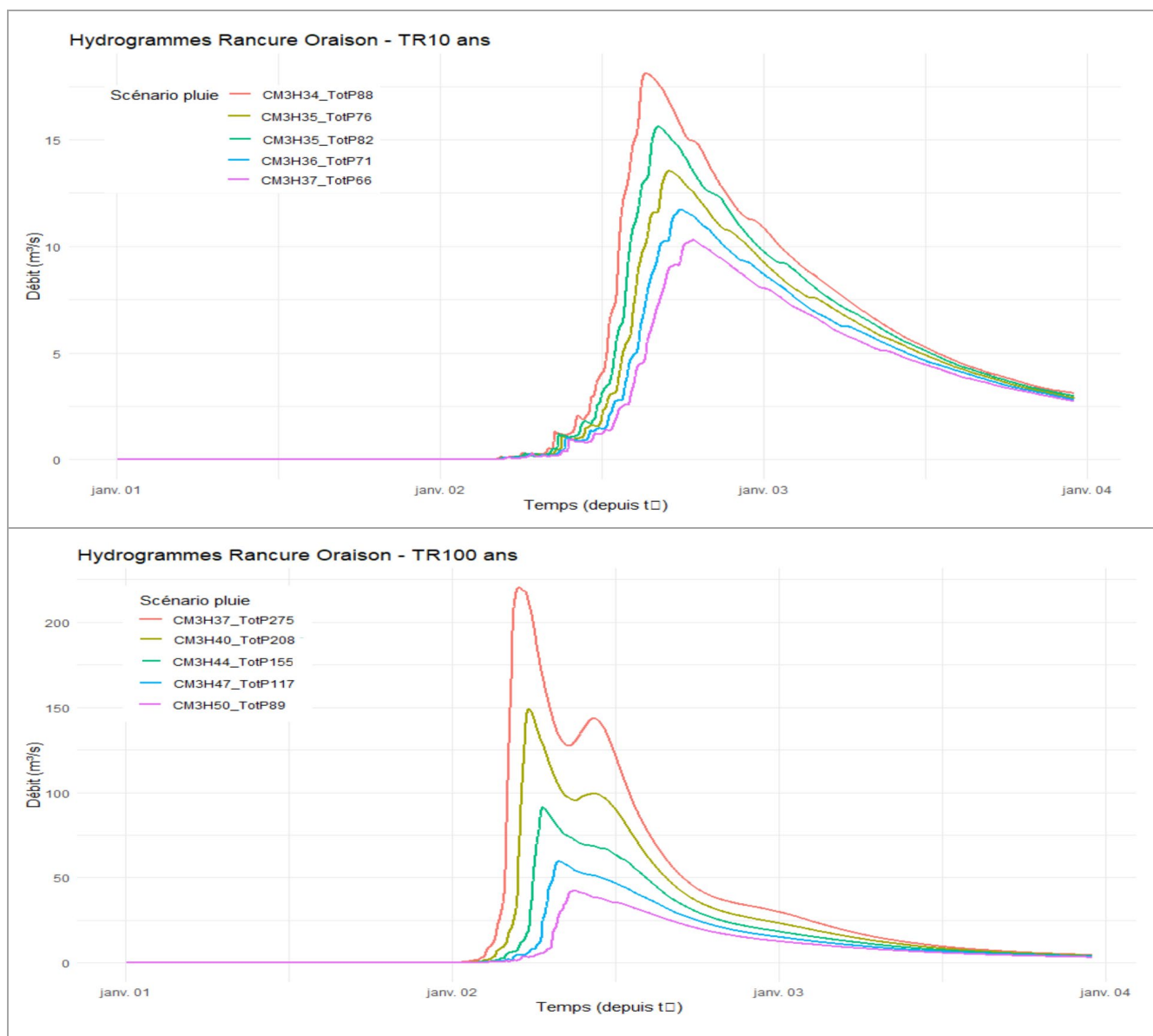


Figure 192 : Hydrogrammes simulés sur le-bassin versant du Rancure (entrée d'Oraison) à partir des hyétogrammes issus de l'analyse bivariée : période de retour 10 et 20 ans

Annexe 3 Modélisations hydrauliques 2D : événements d'août 1998, janvier 2014 et novembre 2019

Août 1998 (forçage Débit_AMC2)



Figure 193 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue d'août 1998 (forçage débit_AMC2) : secteur du Castellet

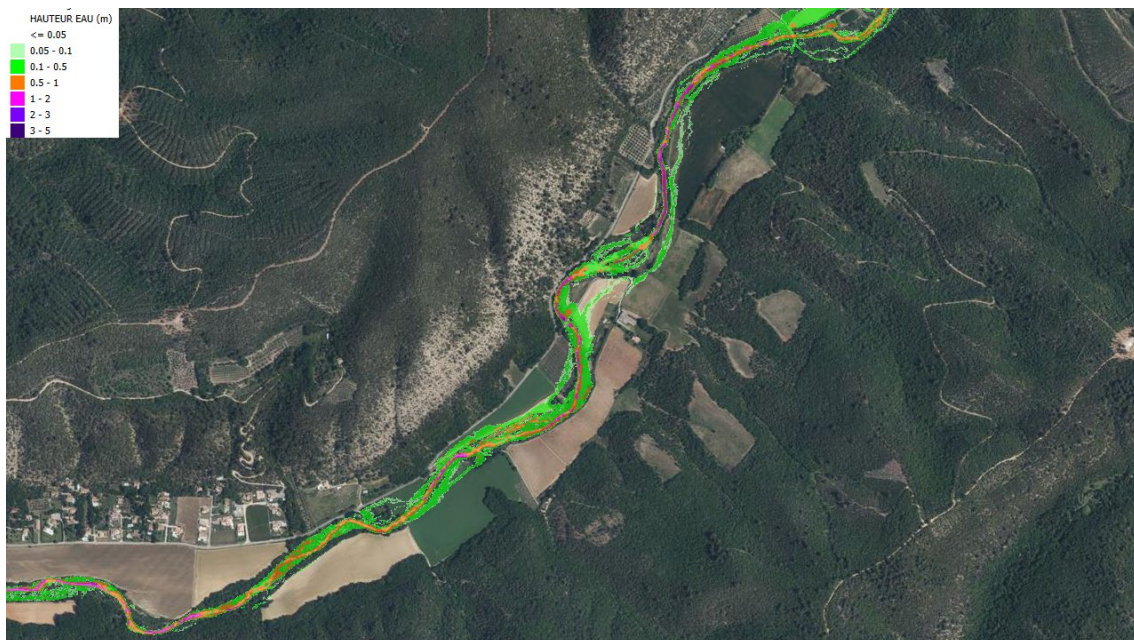


Figure 194 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue d'août 1998 (forçage débit_AMC2) : secteur de la ferme Bondil



Figure 195 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue d'août 1998 (forçage débit_AMC2) : secteur de la traversée d'Oraison

Janvier 2014 (forçage Débit_AMC2)

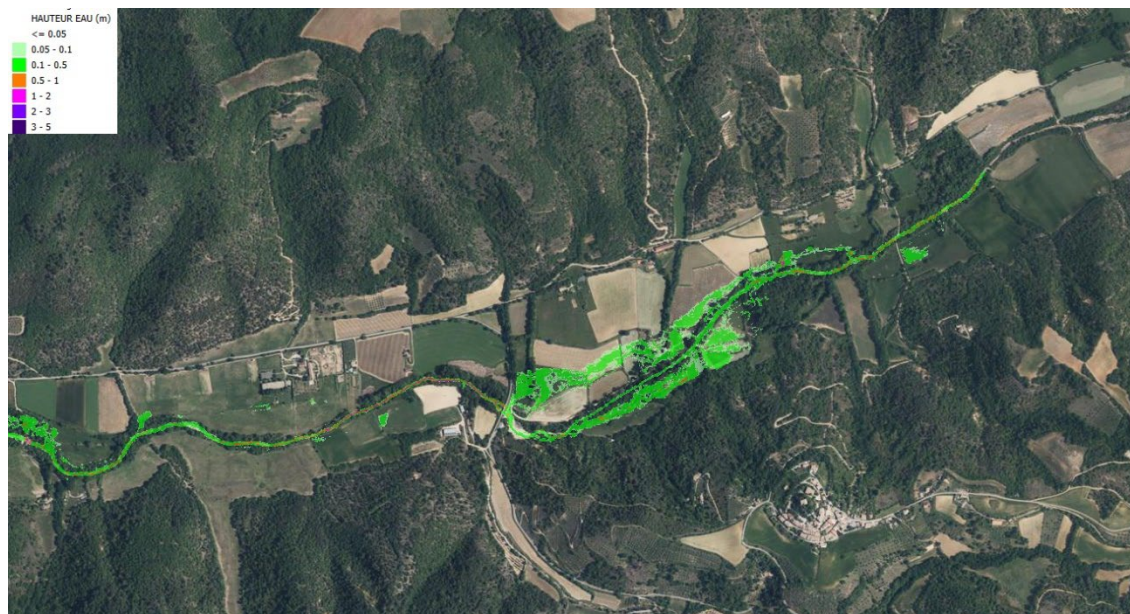


Figure 196 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de janvier 2014 (forçage débit_AMC2) : secteur du gué de la route d'Entrevennes



Figure 197 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de janvier 2014 (forçage débit_AMC2) : secteur du Castellet



Figure 198 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de janvier 2014 (forçage débit_AMC2) : secteur de la ferme Bondil



Figure 199 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de janvier 2014 (forçage débit_AMC2) : secteur de la traversée d'Oraison

Janvier 2014 (forçage Débit_AMC3)



Figure 200 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de janvier 2014 (forçage débit_AMC3) : secteur du gué de la route d'Entrevennes

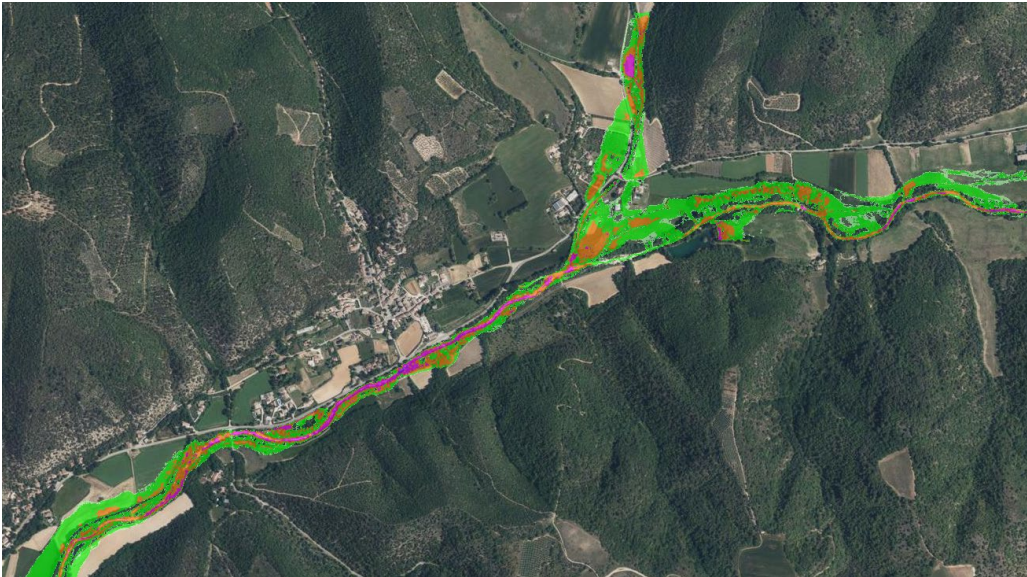


Figure 201 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de janvier 2014 (forçage débit_AMC3) : secteur du Castellet

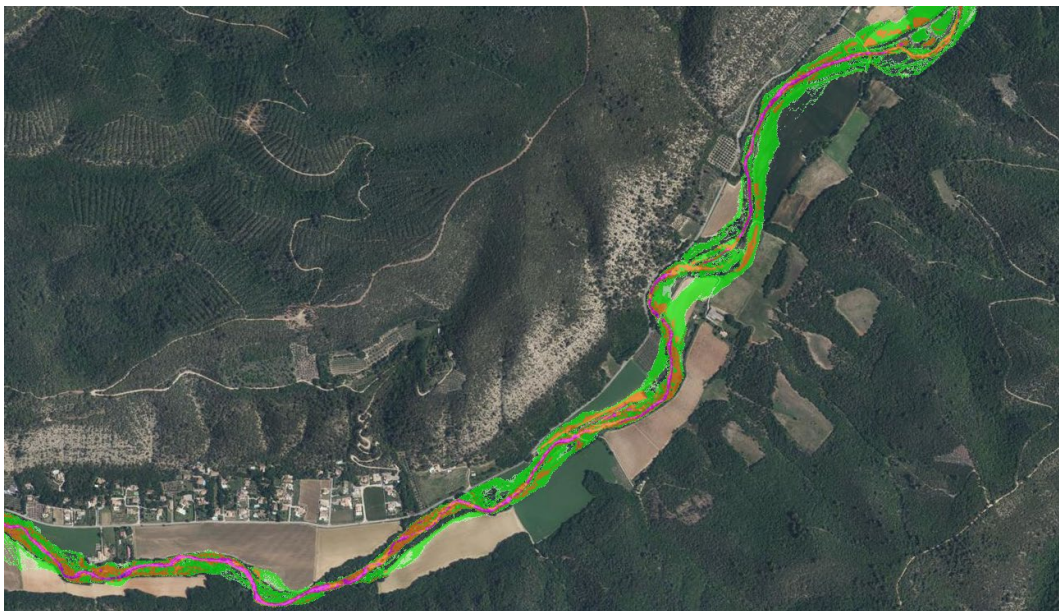


Figure 202 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de janvier 2014 (forçage débit_AMC3) : secteur de la ferme Bondil

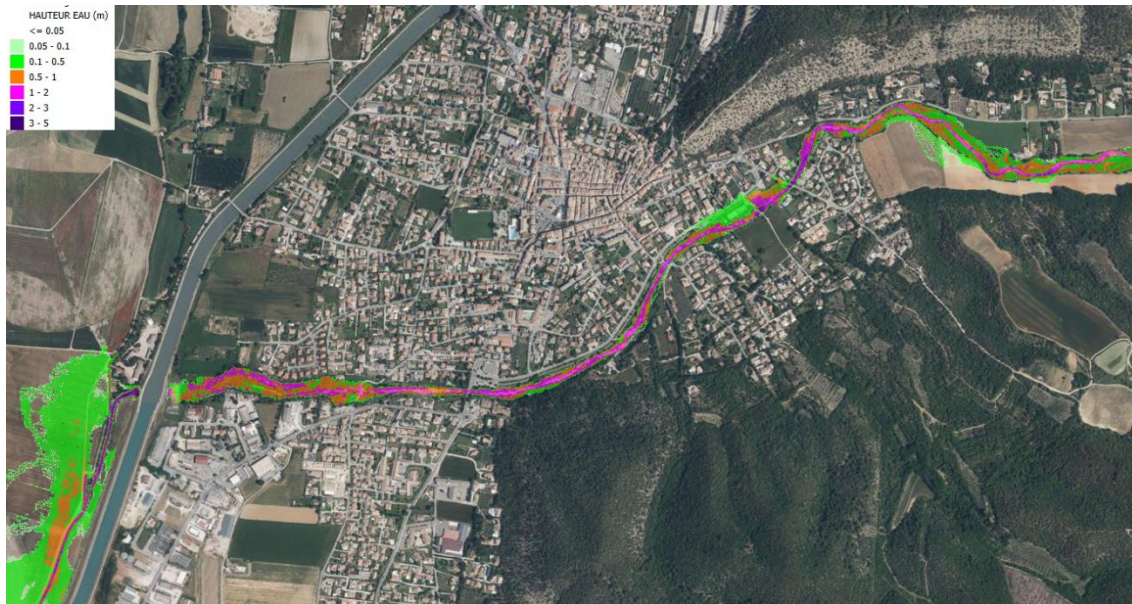


Figure 203 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de janvier 2014 (forçage débit_AMC3) : secteur de la traversée d'Oraison

Novembre 2019 (forçage Débit_AMC2)

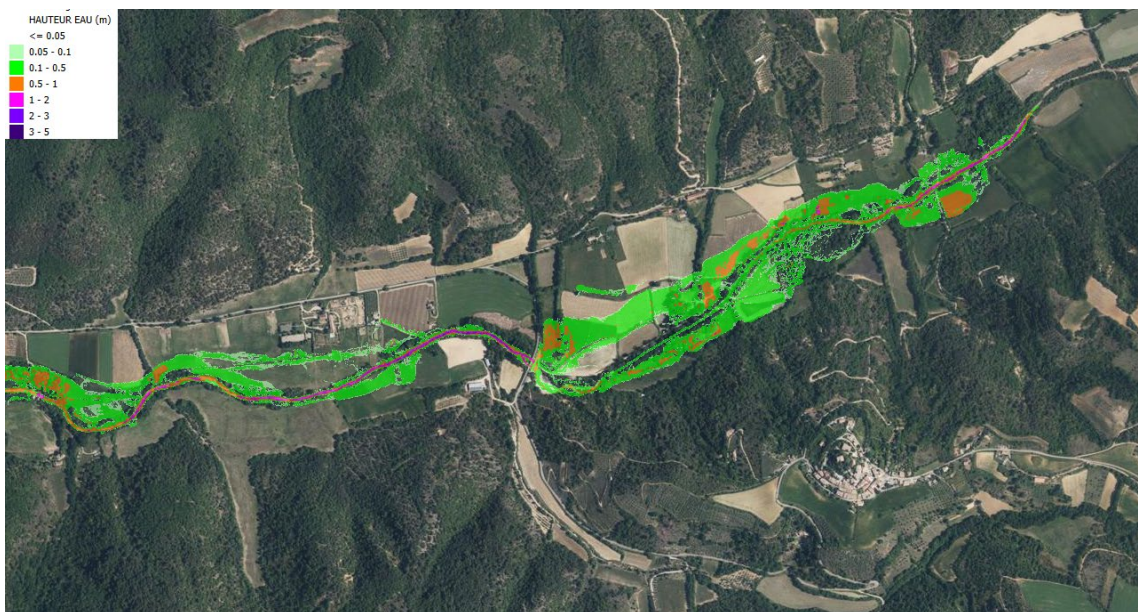


Figure 204 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de novembre 2019 (forçage débit_AMC2) : secteur du gué de la route d'Entrevennes



Figure 205 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de novembre 2019 (forçage débit_AMC2) : secteur du Castellet

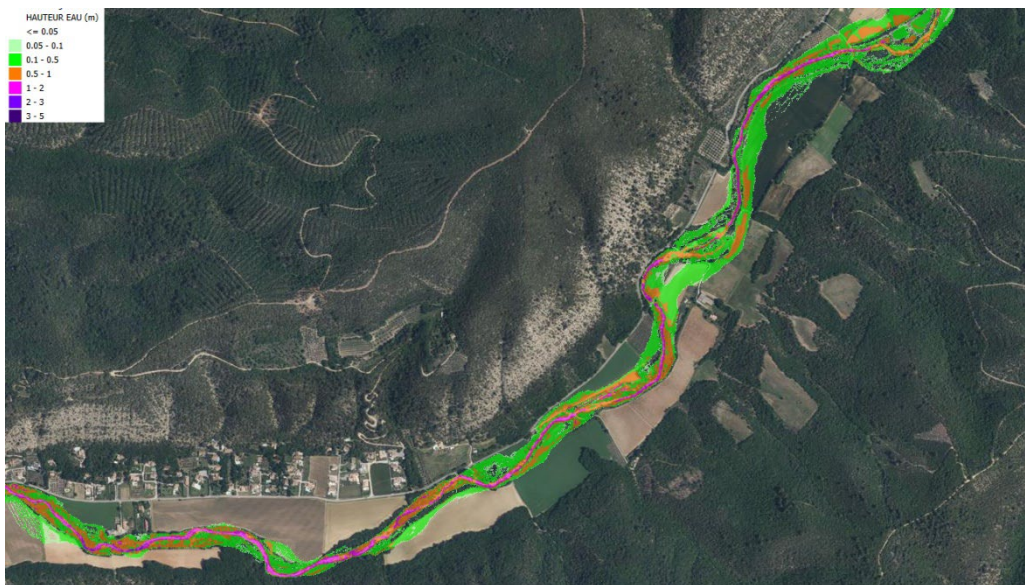


Figure 206 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de novembre 2019 (forçage débit_AMC2) : secteur de la ferme Bondil

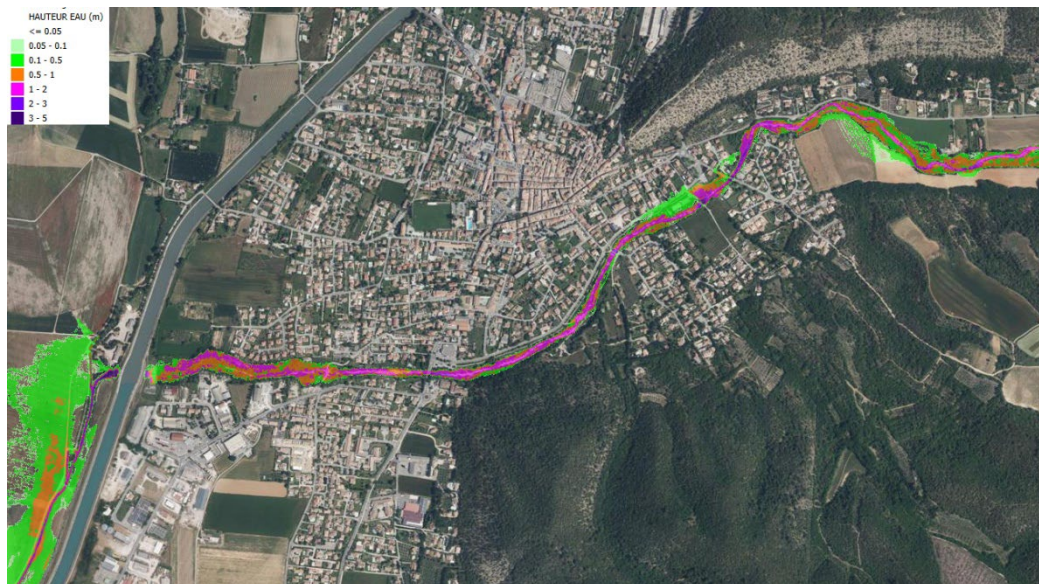


Figure 207 : Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de novembre 2019 (forçage débit_AMC2) : secteur de la traversée d'Oraison

Annexe 4 Elargissements médians simulés du chenal actif pour les crues de référence et emprise globale de la bande active historique 1950 et des terrasses anciennes

Secteur d'Oraison

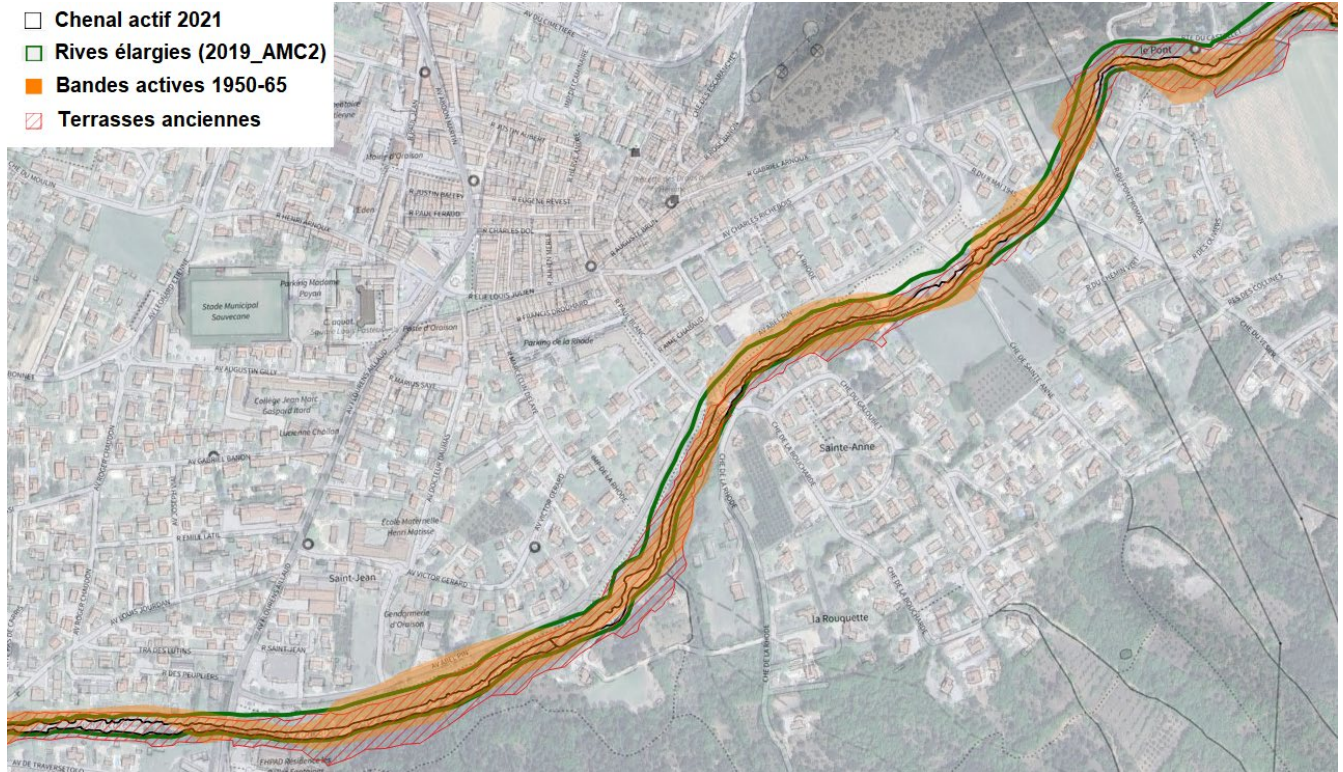


Figure 208 : Élargissement médian simulé du chenal actif (crue 2019_AMC2) : secteur de la traversée d'Oraison

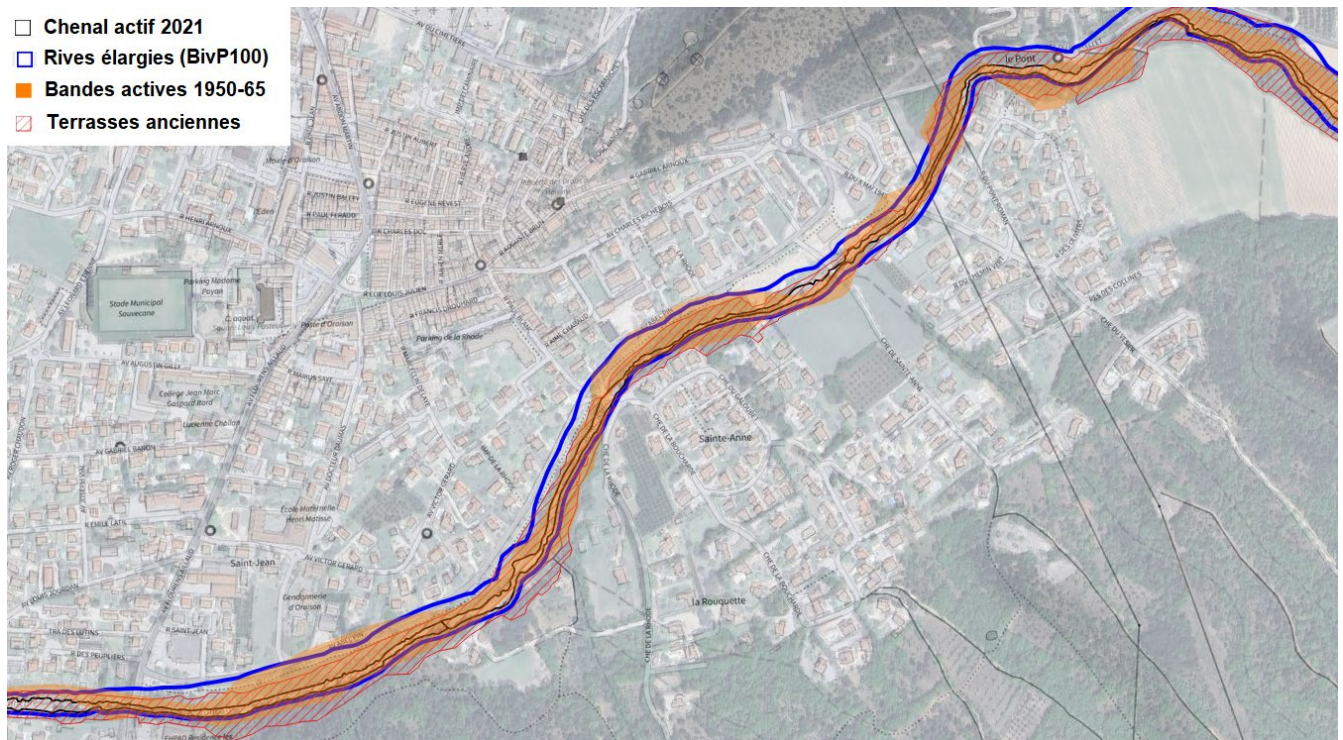


Figure 209 : Élargissement médian simulé du chenal actif (crue BivP100) : secteur de la traversée d'Oraison



Figure 210 : Corridor de mobilité historique (Union bande active 1950–65 ∪ terrasses anciennes) : secteur de la traversée d'Oraison

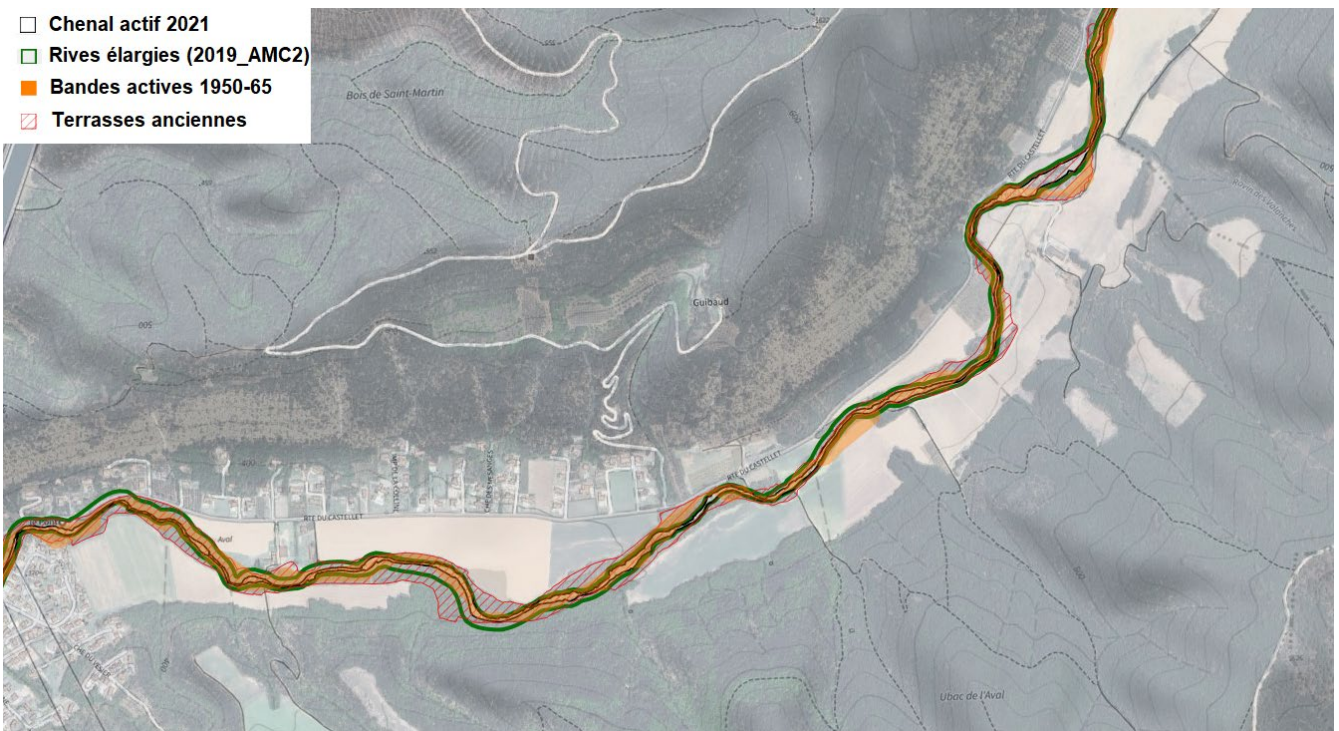


Figure 211 : Élargissement médian simulé du chenal actif (crue 2019_AMC2) : secteur de la ferme Bondil

- Chenal actif 2021
- Rives élargies (BivP100)
- Bandes actives 1950-65
- Terrasses anciennes

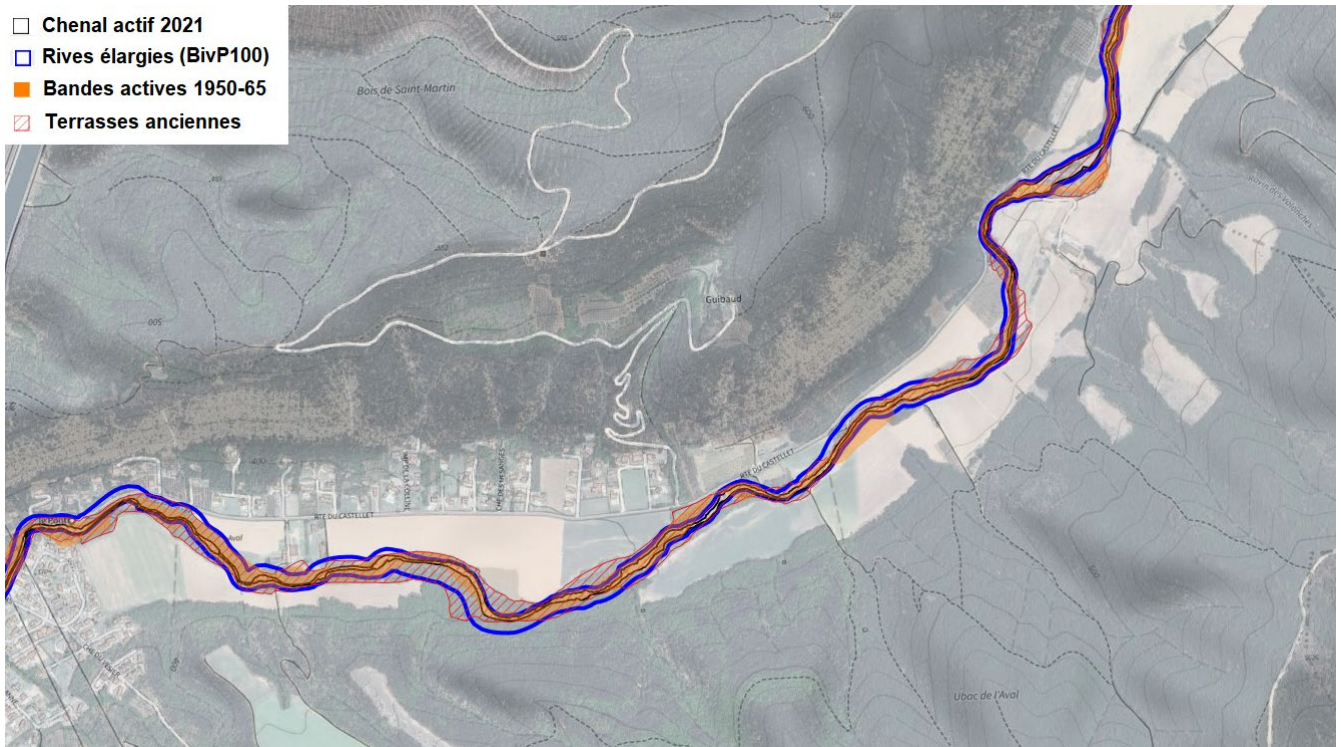


Figure 212 : Élargissement médian simulé du chenal actif (crue BivP100) : secteur de la ferme Bondil



Figure 213 : Corridor de mobilité historique (Union bande active 1950–65 ∪ terrasses anciennes) : secteur de la ferme Bondil

- Chenal actif 2021
- Rives élargies (2019_AMC2)
- Bandes actives 1950-65
- ▨ Terrasses anciennes



Figure 214 : Élargissement médian simulé du chenal actif (crue 2019_AMC2) : secteur du Castellet

- Chenal actif 2021
- Rives élargies (BivP100)
- Bandes actives 1950-65
- ▨ Terrasses anciennes

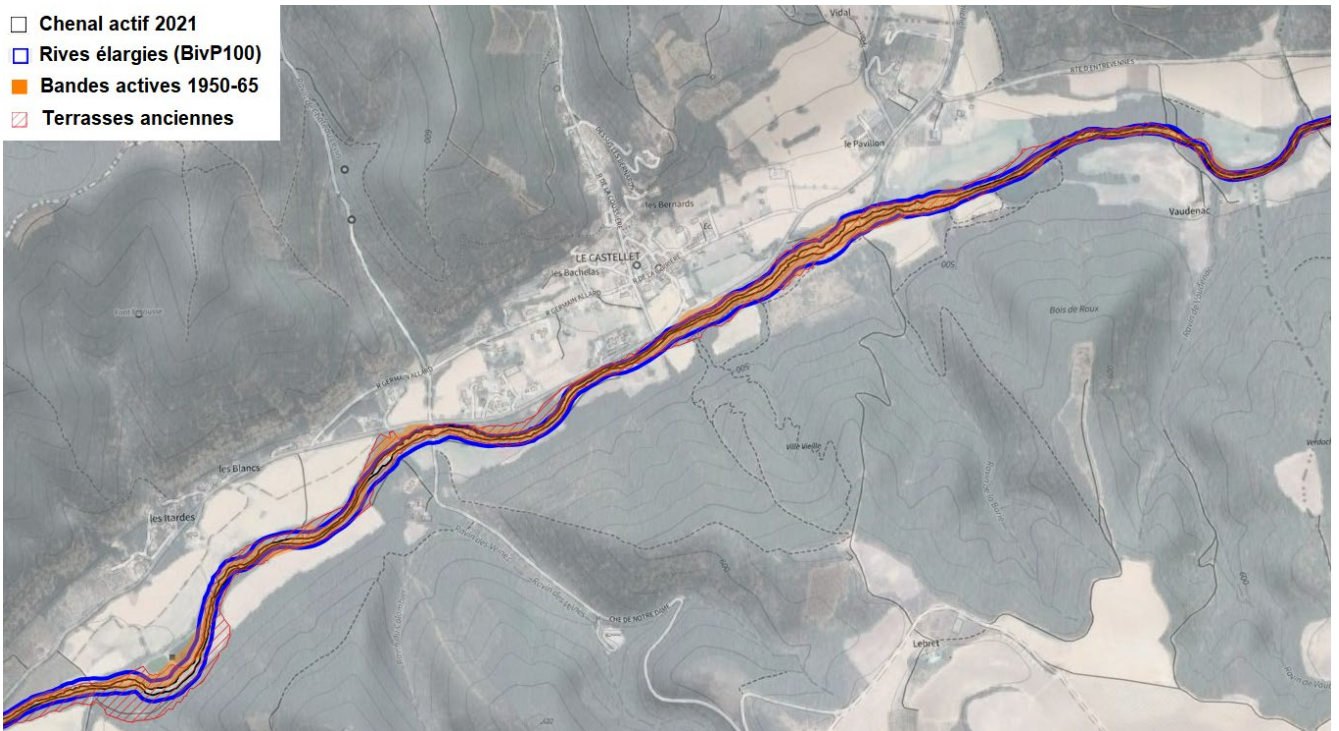


Figure 215 : Élargissement médian simulé du chenal actif (crue BivP100) : secteur du Castellet



Figure 216 : Corridor de mobilité historique (Union bande active 1950–65 ∪ terrasses anciennes) : secteur du Castellet



Figure 217 : Élargissement médian simulé du chenal actif (crue 2019_AMC2) : secteur du gué de la route d'Entrevennes

- Chenal actif 2021
- Rives élargies (BivP100)
- Bandes actives 1950-65
- ▨ Terrasses anciennes



Figure 218 : Élargissement médian simulé du chenal actif (crue BivP100) : secteur du gué de la route d'Entrevennes



Figure 219 : Corridor de mobilité historique (Union bande active 1950–65 ∪ terrasses anciennes) : secteur du gué de la route d'Entrevennes



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN