



Diagnostic du fonctionnement hydro-sédimentaire de la Garonne hydroélectrique De la confluence de la Neste à celle du Salat

TROADEC MAËLLE

Master 2 GAED – Parcours GEMO

Université Toulouse Jean-Jaurès

11/09/2025

Maître de stage

Dr. Théo Bulteau (SMGA)

Responsable pédagogique

Pr. Emmanuel Chapron (Univ. Jean-Jaurès)



Résumé

Les cours d'eau assurent des services écosystémiques essentiels qu'il est nécessaire de préserver. Cette exigence se confronte parfois aux usages humains, ce qui impose d'intégrer ces derniers à la fois comme acteurs et comme enjeux dans la gestion. Dans ce contexte, un diagnostic hydro-sédimentaire s'avère indispensable pour orienter les actions de manière éclairée. Ce travail répond à un besoin de diagnostic hydro-sédimentaire sur le tronçon de la Garonne Moyenne, exprimé par le Syndicat mixte Garonne Amont (SMGA). Cette portion du linéaire a connu une forte anthropisation au cours du XXe siècle, susceptible d'avoir altéré son fonctionnement hydro-sédimentaire par la perturbation des flux liquides (eau) et solides (sédiments). Les principales pressions identifiées concernent les barrages au fil de l'eau et les extractions en lit mineur. Bien que ces dernières aient cessé dans les années 1990, elles constituent un héritage pouvant représenter une perturbation toujours active.

Afin de diagnostiquer les dysfonctionnements potentiels, une approche historique a été mise en œuvre pour documenter les réponses morphologiques du cours d'eau soumis à ces pressions. Les critères principaux analysés sont l'évolution de la surface de la bande active (planimétrie) et celle du profil en long, permettant d'identifier les processus d'érosion et de dépôt. Une approche expérimentale a également été menée pour évaluer l'état actuel du transport sédimentaire. Celle-ci repose sur des données granulométriques (taille des sédiments) ainsi que sur un traçage sédimentaire par puces RFID. Enfin, une troisième approche a été développée pour mieux appréhender le rôle spécifique de chaque facteur d'anthropisation dans la trajectoire évolutive du cours d'eau. Cette démarche répond au besoin d'isoler les impacts individuels dans un contexte où les pressions se cumulent, rendant les liens de causalité difficiles à établir.

De ces trois approches, il ressort que le cours d'eau a connu une rétraction, une incision et un pavage, témoignant d'une altération des flux liquides, mais surtout solides, imputable aux pressions anthropiques documentées. Ces phénomènes ne s'expriment pas de manière homogène sur l'ensemble du linéaire : certaines zones, notamment celles concernées par le court-circuitage ou les anciennes extractions, sont plus touchées. Le déficit sédimentaire est important et continue d'impacter la dynamique fluviale. Ces résultats doivent être pris en compte pour orienter les futures actions de gestion dans le cadre du Plan de Gestion Hydro-sédimentaire (PGH).

Mots clés : Diagnostic, géomorphologie fluviale , Garonne Moyenne, anthropisation, transport sédimentaire

Abstract

Rivers provide essential ecosystem services that must be preserved. This necessity sometimes conflicts with human uses, making it essential to consider these uses both as stakeholders and as key issues in management. In this context, a hydro-sedimentary assessment is crucial to guide actions in an informed manner. This work addresses the need for a hydro-sedimentary diagnosis on a section of the middle Garonne River, as expressed by the Syndicat Mixte Garonne Amont (SMGA). This portion of the river has undergone significant human alterations during the 20th century, likely disrupting its hydro-sedimentary functioning by affecting both liquid (water) and solid (sediment) flows. The main pressures identified include run-of-river dams and in-channel gravel mining. Although the latter ceased in the 1990s, they represent a legacy that may still be causing active disturbances.

To diagnose potential dysfunctions, a historical approach was implemented to document the river's morphological responses to these pressures. The main criteria analyzed are the evolution of the active channel area (planimetry) and the longitudinal profile, allowing for the identification of erosion and deposition processes. An experimental approach was also carried out to assess the current state of sediment transport. This approach is based on grain size data (sediment size) and sediment tracing using RFID tags. Finally, a third approach was developed to better understand the specific role of each anthropogenic factor in the river's evolutionary trajectory. This method aims to isolate individual impacts in a context where pressures accumulate, making causal links difficult to establish.

From these three approaches, it emerges that the river has experienced narrowing, incision, and armoring, indicating disruptions in water flow, but especially in sediment transport, attributable to the documented anthropogenic pressures. These phenomena are not uniformly expressed along the entire reach : certain areas, particularly those affected by flow bypass or former gravel extraction, are more impacted. The sediment deficit is significant and continues to affect river dynamics. These results must be considered to guide future management actions within the framework of the Hydro-Sedimentary Management Plan (PGH).

Key Words : Diagnosis, fluvial geomorphology , Middle Garonne, anthropogenic impact, sediment transport

Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe pédagogique du master GEMO pour les enseignements dispensés ainsi que pour le suivi tout au long de l'année. Plus particulièrement, je tiens à remercier Monsieur Emmanuel Chapron, qui a été mon responsable pédagogique durant ce stage.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe du Syndicat Mixte Garonne Amont, pour son accueil toujours chaleureux et l'aide apportée à la réalisation de ce mémoire. Un merci tout particulier à Théo Bulteau, pour son encadrement bienveillant et son enthousiasme. Je tiens aussi à remercier Nathalie Ader pour son soutien (même lors de mes déboires avec la SNCF) et sa gentillesse. Les pauses café en votre compagnie vont me manquer.

Un grand merci à Pierre Ayoub, mon compagnon, pour son soutien moral tout au long de ce mémoire, ainsi que pour ses conseils avisés et son aide, tant sur le plan méthodologique que dans la gestion des données informatique.

Enfin, je remercie ma famille pour leur soutien, tant moral que financier, sans lequel il m'aurait été impossible de poursuivre mes études dans d'aussi bonnes conditions.

Sommaire

1	Contexte du stage	9
1.1	Présentation de la structure	9
1.2	Présentation générale du territoire	10
1.3	Présentation des missions	12
2	Cadre théorique du diagnostic hydro-sédimentaire en domaine fluvial	14
2.1	Fonctionnement physique des cours d'eau	14
2.2	Anthropisation des cours d'eau	19
2.3	Impacts cumulés : approche hypothético-déductive en réponse	25
3	Présentation de la zone d'étude et hypothèses de travail	27
3.1	Caractéristiques physiques du bassin versant et du tronçon d'étude	27
3.2	Caractéristique et évolution de la dynamique hydro-sédimentaire au sein du bassin versant et dans le tronçon d'étude	31
3.3	Formulation des hypothèses	38
4	Méthode	40
4.1	Approche historique	41
4.2	Approche expérimentale	50
4.3	Mise en pratique de l'approche hypothético-déductive : choix des tron- çons impacts et contrôles	56
5	Résultat	57
5.1	Approche historique	57
5.2	Approche expérimentale	65
5.3	Résultats de l'approche hypothético-déductive	69
6	Discussion et perspectives	74
6.1	Trajectoire d'évolution morphologique de la Garonne Moyenne	74
6.2	Impacts de l'anthropisation sur le linéaire de la Garonne Moyenne	75

6.3	De la morphologie à la fonctionnalité	78
6.4	Perspectives	80

Introduction

Face aux nombreuses dégradations des hydrosystèmes fluviaux causées par les activités anthropiques, le recours à des données factuelles permet aux décideurs de proposer et mettre en œuvre des solutions de gestion adaptées et concertées avec les différents acteurs du territoire, afin de garantir les intérêts communs tels que la préservation des espaces naturels, la préservation de la ressource en eau et la gestion des risques naturels. Ainsi, la production d’une connaissance précise et quantifiée constitue un prérequis indispensable pour la prise de décision, tout en intégrant d’autres aspects inhérents à la prise de décision, tels que la souhaitabilité (acceptation sociale) et la faisabilité (économique, technique, etc).

Ce travail s’inscrit dans un double contexte, à la fois institutionnel et scientifique. D’une part, il répond aux missions confiées au Syndicat Mixte de la Garonne Amont : la gestion et la préservation des milieux aquatiques et la prévention des inondations (GEMAPI). Si la gestion constitue le cœur de ses actions, celle-ci ne peut se faire sans la constitution d’un socle solide de connaissances sur le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin, en particulier sur les thématiques en lien avec ses compétences. Un premier diagnostic global a d’ores et déjà été réalisé à l’échelle de l’ensemble du bassin (EGIS, 2022), mais la connaissance produite dans ce diagnostic est insuffisamment précise pour mettre en œuvre des actions de gestion et/ou de restauration. Par ailleurs, le niveau des connaissances est encore trop hétérogène entre les différents sous-trançons du bassin. Certains secteurs, tels que la Garonne Amont (BULTEAU, 2023) ou la Pique (diagnostic en cours), disposent aujourd’hui d’un niveau de connaissance satisfaisant. En revanche, le tronçon de Garonne Moyenne (entre la confluence avec la Neste et la confluence avec le Salat) demeure relativement peu documenté. Ce secteur se caractérise par des pressions anthropiques spécifiques, notamment le recours à des barrages au fil de l’eau pour la production hydroélectrique -un type d’aménagement quasiment absent des zones précédemment étudiées- et des extractions de granulats importantes.

D’autre part, cette étude s’inscrit dans un cadre scientifique plus large, en adressant deux objectifs distincts. Bien que quelques travaux existent sur les effets des barrages au fil de l’eau, ceux-ci demeurent encore relativement peu étudiés en comparaison avec d’autres types d’infrastructures hydroélectriques. Les premières contributions sont issues du contexte nord-américain (S. J. CSIKI et RHOADS, 2014. Plus récemment, des études ont été menées en France, notamment sur le Rhin (ARNAUD, 2012), le Rhône (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2019 ; DÉPRET et al., 2019) ainsi que sur la Garonne Amont (BULTEAU et al., 2022). Toutefois, il n’existe à notre connaissance aucune étude évaluant les effets combinés des barrages au fil de l’eau et des extractions de granulats. Le premier objectif est de continuer d’alimenter la littérature avec de nouvelles études évaluant les

effets de ce jeu de pressions spécifique sur l'évolution d'un cours d'eau. Le second objectif tient plus à des aspects conceptuels et méthodologiques. Si de nombreuses études se sont attachées à décrire les effets cumulés des plusieurs facteurs d'anthropisation sur un tronçon fluvial, rares sont celles qui tentent de discriminer les effets unitaires des pressions potentiellement impactantes. Ce travail peut être mené de plusieurs manières, mais les récents développement méthodologiques pointent vers l'utilisation d'une approche hypothetico-déductive pour y parvenir. Le second objectif scientifique est donc de continuer d'évaluer le potentiel de cette approche à cette fin, d'en soulever les intérêts mais également les limites.

Ainsi, dans ce travail, nous nous interrogerons sur la part des impacts des principales pressions anthropiques dans l'évolution du linéaire de la Garonne Moyenne, entre la confluence avec la Neste et celle avec le Salat.

Afin de répondre à cette problématique, plusieurs questions de recherche ont été identifiées :

- Q1** – Quelle est l'évolution du cours d'eau depuis le XXe siècle ?
- Q2** – Quel est le fonctionnement hydro-sédimentaire actuel, notamment en ce qui concerne le transit sédimentaire ?
- Q3** – Comment intégrer la dimension multifactorielle (facteurs naturels et anthropiques) dans le diagnostic, afin de mieux appréhender leur rôle spécifique dans l'évolution et le fonctionnement actuel du cours d'eau ?

Pour y répondre, trois approches complémentaires seront mobilisées :

- A1** – Une approche historique, visant à documenter l'évolution de la morphologie du cours d'eau, en lien avec les variations des flux solides et liquides dans le système fluvial.
- A2** – Une approche expérimentale, permettant de quantifier le transit sédimentaire actuel.
- A3** – Une approche hypothetico-déductive, destinée à discriminer le rôle spécifique de chaque facteur anthropique, en s'appuyant notamment sur la comparaison de tronçons impactés et de tronçons témoins.

Ce travail s'articulera en plusieurs parties. Dans un premier temps, le contexte général de la réalisation de ce mémoire sera présenté. Ensuite, une présentation plus détaillée du bassin versant et du tronçon d'étude sera proposée, incluant les caractéristiques physiques de ces entités hydrographiques ainsi qu'un point sur les connaissances actuelles relatives au fonctionnement hydro-sédimentaire. Cette partie sera suivie de la présentation du cadre théorique dans lequel s'inscrit ce travail, permettant d'introduire les principaux concepts utiles à la compréhension des mécanismes et des enjeux liés au diagnostic hydromorphologique. Nous détaillerons ensuite les méthodes mobilisées

dans le cadre des trois approches mentionnées ci-dessus, avant de présenter les résultats obtenus pour le tronçon étudié. Enfin, une dernière partie sera consacrée à la discussion des questions de recherche à la lumière des données produites, ainsi qu'à l'ouverture vers des pistes pour prolonger ce diagnostic.

Partie 1

Contexte du stage

1.1 Présentation de la structure

Ce stage a été effectué au sein du Syndicat Mixte Garonne Amont (SMGA). Cette structure a été créée en septembre 2019 en tant que gestionnaire des cours d'eau. Son objectif principal est la mise en œuvre de la compétence GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations). Cette compétence regroupe deux missions auparavant séparées : la gestion des milieux aquatiques d'une part, et la prévention des inondations, telles que définies par les lois n° 2014-58 du 27 janvier 2014 et n° 2015-991 du 7 août 2015.

Depuis le 1er janvier 2018, cette compétence a été confiée aux intercommunalités. Il est toutefois possible de transférer tout ou partie de cette compétence à d'autres structures publiques, notamment à des syndicats mixtes. Ces structures de coopération intercommunale ont été fondées en vertu du décret-loi du 30 octobre 1935. Elles permettent de faciliter la coopération entre différentes collectivités territoriales et d'autres établissements ou personnes publiques.

Les actions de la GEMAPI s'articulent autour de quatre missions définies à l'article L.211-7 du Code de l'environnement :

- L'aménagement des bassins versants
- L'entretien et l'aménagement des cours d'eau, canaux, lacs et plans d'eau
- La défense contre les inondations et contre la mer ;
- La protection et la restauration des zones humides.

Au sein du SMGA, ces actions sont mises en œuvre à travers deux programmes : d'une part le Programme d'Actions et de Prévention des Inondations (PAPI), et d'autre part, le Programme Pluriannuel de Gestion (PPG).

Le PPG est un document de planification à l'échelle du bassin versant, dont l'objectif

est de proposer des actions permettant d’atteindre les objectifs fixés par la Directive Cadre sur l’Eau (DCE) de 2000, à savoir l’atteinte du bon état des masses d’eau.

Les décisions sont prises par les élus des communautés de communes, représentés par un président, trois vice-présidents, ainsi que douze délégués accompagnés de leurs suppléants. La structure du SMGA s’organise en deux pôles, encadrés par un directeur : Un pôle administratif et un pôle technique, lui-même divisé en deux entités ; Un pôle prévention des inondations (PAPI) et un pôle gestion des milieux aquatiques et zones humides (PPG). Enfin, la Brigade Verte permet d’assurer en interne une partie des opérations d’entretien des cours d’eau et des zones humides (fig. 1).

D’un point de vue financier, le SMGA est en partie financé par les contributions des communautés de communes membres via la taxe GEMAPI, appliquée sur l’ensemble du territoire. Des partenaires financiers peuvent aussi intervenir. Par exemple, dans le cadre du PPG, ce sont L’Agence de l’Eau Adour-Garonne, La Région Occitanie et le Conseil Départemental de la Haute-Garonne.

1.2 Présentation générale du territoire

Le territoire géré par le SMGA couvre une superficie totale de 1480 km². Il comprend quatre communautés de communes : Pyrénées Haut-Garonnaises, Cœur et Coteaux du Comminges, Cagire Garonne Salat et Neste Barousse, représentant au total 173 communes. Ce territoire s’étend sur deux départements : la Haute-Garonne(31), qui constitue 91% de la superficie (1214 km²), et les Hautes-Pyrénées(65), pour 9% du territoire (168 km²).

D’un point de vue hydrographique, le syndicat gère en partie le bassin versant de la Garonne Amont et Moyenne, comprenant également les affluents de la Pique, de l’Ourse, du Ger et de la Noue. Le territoire est ainsi divisé en six secteurs : le bassin versant de la Pique, le bassin versant de l’Ourse, le bassin versant de la Garonne amont, le bassin versant du Ger, et enfin, le bassin versant de la Garonne Moyenne (fig. 1.1).

Le relief est assez varié, avec des pentes pouvant atteindre jusqu’à 40% dans le bassin versant de la Pique, donnant un caractère torrentiel au cours d’eau. On y trouve également une zone de plaine, notamment après la confluence avec la Neste.

Le territoire est majoritairement rural, mais certaines villes concentrent une grande partie de la population, telles que Saint-Gaudens et Saint-Martory. Le tourisme génère également des flux de personnes, notamment pendant la saison estivale, en particulier pour la commune de Bagnères-de-Luchon et l’accès à l’Espagne.

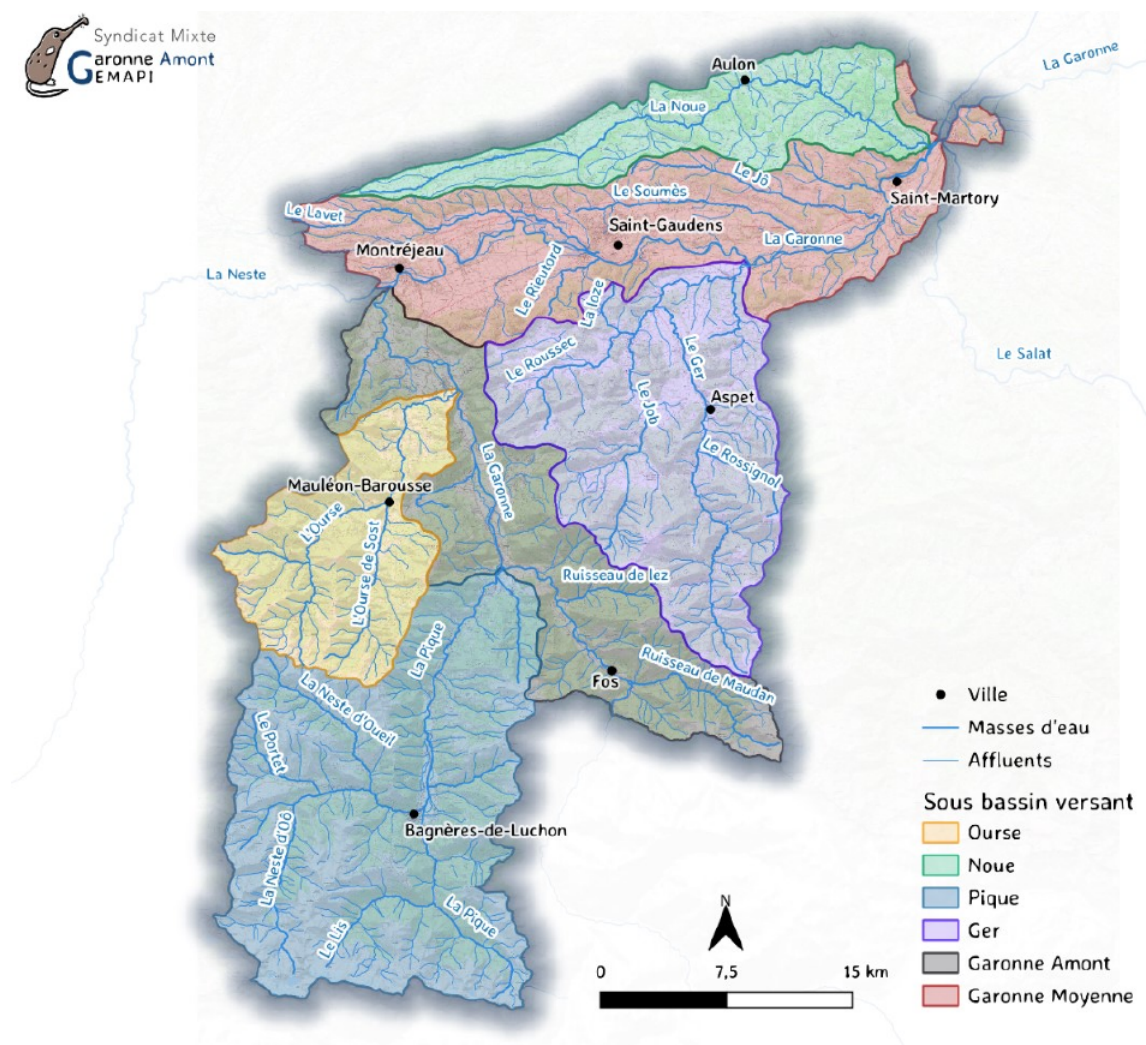


FIGURE 1.1 – Cartographie des 6 sous bassins versants et des cours d'eau classés "masses d'eau" sur le territoire du SMGA (SMGA, 2023)

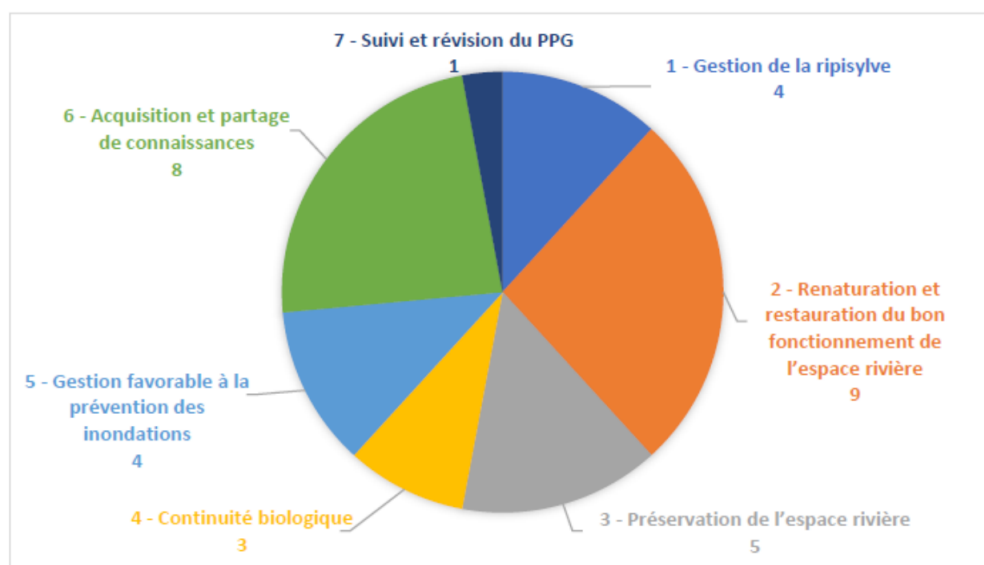


FIGURE 1.2 – Répartition du nombre d'actions par thématique du PPG Garonne Amont (SMGA, 2023)

1.3 Présentation des missions

Le stage s'inscrit dans le Plan Pluriannuel de Gestion (PPG) (fig. 1.2). Il s'agit d'un programme de cinq ans (2024-2028) visant à l'élaboration et à la mise en œuvre de 34 fiches actions, regroupées en sept axes/thématiques.

Plus précisément, le stage s'inscrit dans l'action 2.7 du PPG. Le thème 2 concerne la restauration du bon fonctionnement de l'espace rivière, et l'action 7 de cet axe est formulée comme suit : "Élaboration d'un programme de gestion sur le volet hydromorphologique (PGH) incluant l'amont et l'aval." Le PGH est un programme de trois ans (2024-2027) et fait suite à un premier état des lieux et diagnostic réalisé par le bureau d'études EGIS en 2021-2022 pour l'ensemble du territoire (EGIS, 2022). Le PGH a pour objectif de renforcer l'acquisition de connaissances sur les différentes zones et de proposer des solutions de gestion. Il comporte trois axes, dont le dernier est celui dans lequel s'inscrit directement le stage : la Garonne Moyenne. En effet, bien qu'un bon niveau de connaissance ait été atteint pour la Garonne amont grâce au travail de thèse de Théo Bulteau (Bulteau, 2023), et qu'un travail actuel sur la Pique permettra également d'atteindre ce niveau de connaissance, la Garonne Moyenne a jusqu'à présent été peu étudiée, malgré les enjeux importants associés à ce territoire. En effet, ce tronçon comprend de nombreux ouvrages transversaux pour la production hydroélectrique, avec des tronçons court-circuités (TCC) dont les impacts hydromorphologiques sont encore

mal connus.

L'objectif principal de ce stage est la réalisation d'un diagnostic hydro-sédimentaire sur le linéaire de la Garonne Moyenne. Ce diagnostic vise prioritairement à documenter la trajectoire d'évolution historique du cours d'eau et à analyser le rôle des différents acteurs dans cette évolution, en s'appuyant sur des données quantitatives et spatialisées. Ce travail doit permettre de mieux appréhender la trajectoire d'évolution du cours d'eau afin de définir des objectifs de gestion réalistes.

Dans le cadre de ce travail, nous nous concentrerons en priorité sur l'acquisition des données, l'analyse de l'évolution du cours d'eau, ainsi que sur l'évaluation de l'impact individuel des différents facteurs d'anthropisation. La production de ces données s'appuiera sur les méthodes et connaissances proposées dans la littérature scientifique.

Partie 2

Cadre théorique du diagnostic hydro-sédimentaire en domaine fluvial

Les cours d'eau sont des entités complexes et en constante évolution sous l'effet de plusieurs agents, climatiques, lithologiques, morphométriques, et plus récemment, anthropiques. De nombreux enjeux sont associés à l'aménagement et la gestion des cours d'eau. Si l'anthropisation des rivières et de leur bassin a rendu de nombreux services aux sociétés humaines, elle s'est également accompagnée de nombreuses pertes et dégradations. L'objectif du diagnostic hydro-sédimentaire est donc de caractériser finement les interactions entre facteurs d'anthropisation et dynamique fluviale, afin d'orienter les décideurs vers des solutions de gestion adaptées. L'idée sous-jacente à la mise en place de ces solutions est de faire tendre le cours d'eau vers une trajectoire d'évolution qui prenne en considération l'ensemble des acteurs et des enjeux ciblés sur le linéaire fluvial en question.

Une des principales difficultés à la réalisation d'un diagnostic hydrosédimentaire découle de la spécificité de chaque tronçon fluvial dans le jeu de pressions anthropiques qui l'affecte. En partie (2.2), un focus sera proposé sur deux types d'activités affectant le linéaire étudié : les extractions en lit mineur et les barrages au fil de l'eau. Dans un dernier temps, les concepts et méthodes cadrant l'approche par hypothèse seront présentés.

2.1 Fonctionnement physique des cours d'eau

Le système fluvial est un système complexe et très dynamique : formes et flux y interagissent, dans un jeu de rétroactions positives et négatives. De cette grande complexité découle une trajectoire d'évolution souvent non-linéaire et influencée par

l'ensemble des facteurs agissant sur les formes et/ou sur les flux. Le défi relevé lors d'un diagnostic du fonctionnement hydro-sédimentaire est de soulever et de caractériser l'évolution des facteurs, des formes et des flux, afin de mieux comprendre la trajectoire d'évolution observée.

2.1.1 Nature et circulation des flux au sein du système

Les cours d'eau sont des milieux dynamiques dont la principale fonction est le transfert des flux liquides et solides dans un continuum amont/aval. Dans un premier temps, nous allons décrire la nature de ces flux et la manière dont ils circulent au sein du système. Les flux liquides peuvent être caractérisés par le régime hydrologique saisonnier, ainsi que par l'intensité, la durée et la fréquence des épisodes d'étiage et de crue. Les flux solides désignent les sédiments qui transitent dans le système. On distingue deux types de charge sédimentaire selon leur mode de déplacement : la charge en suspension et la charge de fond. Le mode de déplacement dépend de la force exercée par l'écoulement sur les sédiments. La charge en suspension correspond aux sédiments dont la taille est suffisamment faible pour être transportés dans la colonne d'eau. La charge de fond, quant à elle, désigne les sédiments qui constituent le lit alluvial et se caractérise par une granulométrie plus grossière. Ces sédiments se déplacent par charriage. On distingue trois modalités de déplacement par charriage : le glissement, la saltation et le roulement. De plus, les modes de déplacement peuvent alterner pour une même granulométrie et un même cours d'eau, en fonction des variations hydrologiques (basses eaux, hautes eaux). La charge de fond joue un rôle structurant pour le lit du cours d'eau. Son transport revêt un caractère pulsatile, car il dépend des débits nécessaires à sa mise en mouvement. La pente, qui traduit la différence d'altitude entre l'amont et l'aval, conditionne la force motrice de l'écoulement et, par conséquent, la capacité de transport des sédiments. Cet équilibre entre l'énergie disponible et la charge sédimentaire conditionne deux processus fondamentaux : l'érosion et le dépôt.

Le système fluvial, première approche systémique en géomorphologie fluviale (SCHUMM, 1977), décrit et découpe en unités fonctionnelles les entités hydrographiques du bassin versant (versants, chenaux, delta etc.) (CHAPUIS, 2012), en fonction de la prédominance de l'un de ces processus sur l'autre.

Il peut ainsi être structuré en trois grandes zones. (1) La zone de production correspond à la zone amont du système. C'est de cette zone que proviennent la plupart des flux, liquides et solides, transitant dans le système. Le processus dominant y est l'érosion, le réseau hydrographique y est souvent dense et très ramifié, et les sédiments produits sont très hétérométriques. La zone de transfert, seconde zone du système fluvial dans la dimension amont-aval, est caractérisée par une densité du réseau hydrographique

faible. C’est dans cette zone que les flux transitent : l’érosion et le dépôt s’y équilibrent. Les matériaux transitant du lit sont mieux triés que ceux de la zone de production. Située en aval du système fluvial, la zone de dépôt correspond à la zone de plus faible pente au sein d’un système fluvial donné. Dominée par les processus de sédimentation, c’est également dans cette zone que la granulométrie des sédiments constituant le lit est la plus fine. Notons toutefois que ce découpage reste théorique : localement, des dépôts peuvent apparaître dans des zones à dominante érosives, et inversement. C’est le processus majoritaire qui définit la fonction de chaque zone.

2.1.2 Interactions des flux avec le milieu physique et biologique

Le système fluvial permet de comprendre les interactions longitudinales entre les flux. Cependant, il ne suffit pas à rendre compte de toutes les interactions entre ces flux et le milieu dans lequel ils s’écoulent. Ces flux interagissent avec des composantes abiotiques (nappe d’accompagnement, plaine alluviale) et biotiques (ripisylve, faune aquatique). Ces interactions impliquent des échanges de matière, d’énergie (CHAPUIS, 2012) et de biotopes (PETTS et AMOROS, 1996). L’hydrosystème fluvial (PETTS et AMOROS, 1996) (2.1), évolution conceptuelle du système fluvial, a été proposé pour intégrer ces flux dans des dimensions non seulement longitudinales et temporelles, mais aussi latérales et verticales. La dimension transversale organise les échanges entre le cours d’eau et sa plaine alluviale (PETTS et AMOROS, 1996), notamment avec la ripisylve qui joue un rôle structurant, et la nappe d’accompagnement. La dimension verticale concerne surtout les échanges avec les écoulements hyporhéiques ainsi que l’évolution de l’altitude des différentes composantes du chenal. En raison de la circulation constante de flux liquides et solides, les cours d’eau sont par nature dynamiques, évoluant continuellement dans l’espace et dans le temps (PETTS et AMOROS, 1996). Il est donc essentiel d’intégrer une dimension temporelle pour comprendre la variabilité des processus au sein du système.

2.1.3 Variabilité des flux et ajustement du système

Les fluctuations des flux sont contrôlées par des variables dominantes telles que les variations climatiques, géologiques, du relief ou de l’occupation du sol (KNIGHTON, 1984). Ces variables agissent à l’échelle du bassin versant (échelle spatiale large) et sont considérées comme relativement stables, car elles évoluent à des échelles de temps longues (10^2 à 10^4 ans) (BOUTAULT, 2020). Elles influencent directement la qualité et la quantité des flux liquides et solides en entrée du système. Le débit liquide et la charge sédimentaire sont qualifiés de variables de contrôle, car ils conditionnent directement

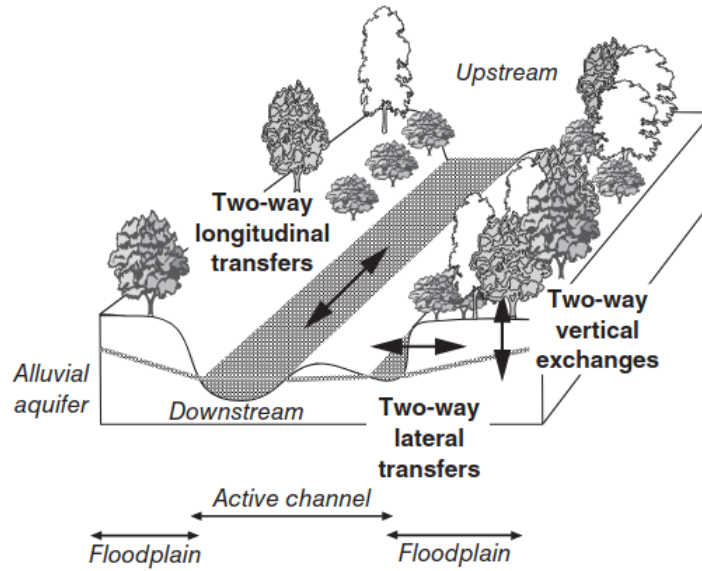


FIGURE 2.1 — Hydrosystème fluvial avec les trois axes bidirectionnels : longitudinal (amont/aval), vertical (surface/souterrain), latéral (chenal/marges) (Kondolf et Piégay, 2016)

les processus morphodynamiques internes tels que l'érosion, le dépôt ou le transport. Une variation de ces variables constitue une perturbation dans le système, créant un déséquilibre entre l'énergie disponible et les matériaux à transporter, modifiant les processus.

Le fonctionnement naturel d'un cours d'eau tend à maintenir un équilibre (HOOVER MACKIN, 1948). La relation entre les flux et les processus qui garantissent cet équilibre a été formalisée par le modèle de la balance de Lane¹ (LANE, 1955) :

$$Q_s * D(50) \propto Q_l * S$$

où :

Q_s : correspond à la charge solide²

$D(50)$: au diamètre médian des sédiments

Q_l : au débit liquide

S : à la pente

Ce modèle illustre l'ajustement morphologique du cours d'eau pour maintenir sa fonction de transfert. Un excès d'énergie entraîne de l'érosion (latérale ou verticale),

1. Il s'agit d'un modèle théorique. Cette formule n'a donc pas vocation à être utilisée de manière quantitative, mais bien qualitative (LANE, 1955). Par ailleurs, elle ne constitue pas un objectif à atteindre dans le cadre de la gestion.

2. Pour Q_s on ne considère que la charge grossière (supérieur à 2mm) LANE, 1955

tandis qu’une charge sédimentaire excessive induit des dépôts, provoquant une aggradation. Les caractéristiques morphologiques susceptibles d’évoluer sous l’action de ces processus sont appelées variables d’ajustement et sont donc corrélatives des fluctuations des variables de contrôle (KONDOLF et PIÉGAY, 2016). On parle d’équilibre dynamique³ lorsque les variables morphologiques fluctuent autour de valeurs moyennes, traduisant un fonctionnement stable malgré les variations hydrosédimentaires. Les variables d’ajustement sont : la pente, la largeur, la profondeur, la sinuosité (ROLLET, 2007 ; DAVID, 2016) ou encore la granulométrie du lit. Ces ajustements sont essentiels à la capacité d’adaptation du cours d’eau, et lui confèrent son caractère résilient. La résilience désigne la capacité du cours d’eau à absorber une perturbation, à s’ajuster, et à retrouver un fonctionnement stable (éventuellement selon une configuration différente) dans un délai inférieur à la période de retour de celle-ci (modification des flux liquides ou solides).

Cependant, ces ajustements peuvent être contraints par le milieu : le substrat géologique peut limiter l’incision ; la présence d’un verrou peut contraindre la mobilité latérale et empêcher l’augmentation de la sinuosité ; la végétation riveraine peut stabiliser localement les sédiments et limiter l’érosion, agissant comme une contrainte à l’ajustement. Parfois, le cours d’eau ne parvient pas à retrouver sa configuration initiale en raison de rétroactions positives ou de seuil. Deux exemples illustrent cela : Si les débits sont trop importants par rapport à la charge sédimentaire, le cours d’eau s’incise, créant des berges perchées. Les débits nécessaires pour remobiliser les sédiments de ces berges devront alors être bien plus élevés et donc plus rares. Il en résulte une concentration des flux dans un chenal restreint et donc, de nouveau de l’incision (rétroaction positive). Si un matelas alluvial constitué de graviers et galets repose sur un substrat argileux, et que le cours d’eau s’incise jusqu’à éliminer ce matelas, le substrat (plus facilement mobilisable) sera rapidement érodé. Même si les flux reviennent à un état d’équilibre initial, la morphologie antérieure ne pourra plus être retrouvée. Dans le cas, où le cours d’eau ne serait pas en mesure de retrouver sa configuration initiale, il peut entrer dans un nouvel état morphologique stable, différent de l’état initial. Cette situation correspond à une métamorphose fluviale (SCHUMM, 1977).

Enfin, les ajustements morphologiques ne sont pas instantanés. Le temps de réponse peut se décomposer en deux temps (KNIGHTON, 1984) (2.2) : Le temps de réaction, qui correspond au délai entre une perturbation et le début de la réponse du système et le temps de relaxation, qui est la durée nécessaire pour atteindre un nouvel équilibre. Ce temps de réponse varie selon la nature de la perturbation, les caractéristiques du cours d’eau et les caractéristiques morphologiques observées (fig. 2.3). Il est important

3. L’équilibre n’est atteint que de manière très ponctuel. Il s’agit plutôt d’un quasi-équilibre (PETTS et AMOROS, 1996)

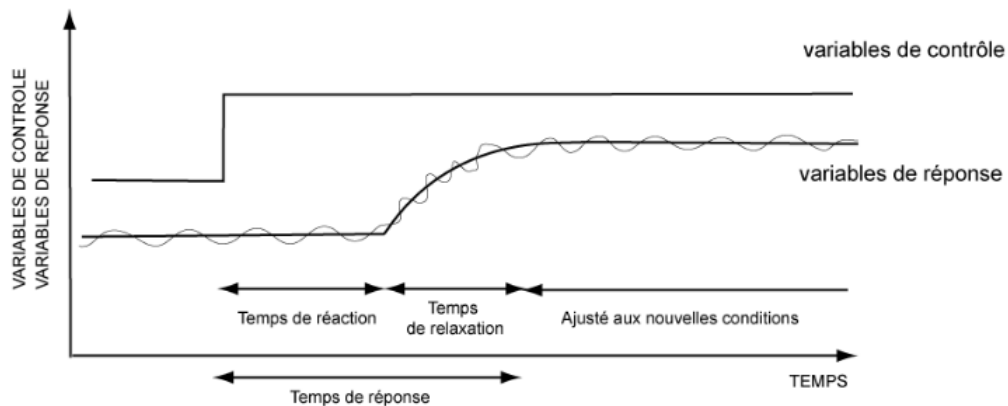


FIGURE 2.2 – Réponse du système fluvial à une modification des variables de contrôles KNIGHTON, 1984

de prendre en compte ces délais lorsque l'on analyse l'évolution morphologique d'un cours d'eau, afin de ne pas vouloir observer des ajustements de manière trop précoce.

En résumé, les cours d'eau sont des milieux dynamiques qui adaptent leur morphologie en fonction des flux entrants, eux-mêmes liés aux caractéristiques du bassin versant. L'un des objectifs majeurs du diagnostic fluvial est de documenter cette évolution, afin de mieux comprendre les dynamiques hydrologiques et sédimentaires passées. L'analyse de la morphologie permet ainsi de repérer des ruptures dans le fonctionnement du système. Cette approche historique met en évidence la trajectoire du cours d'eau et aide à mieux interpréter son état actuel à la lumière de son évolution.

2.2 Anthropisation des cours d'eau

Cette partie a pour objectif de fournir des éléments de compréhension sur les enjeux liés à l'anthropisation des cours d'eau, notamment à l'altération des flux présentés précédemment. Dans un second temps, nous nous intéresserons également à deux types de facteurs d'anthropisation bien représentés sur le linéaire étudié : les extractions en lit mineur et les barrages au fil de l'eau.

2.2.1 Enjeux autour de l'anthropisation des cours d'eau

Humain acteur et enjeu dans la gestion des cours d'eau

Aujourd'hui, un grand nombre de cours d'eau (notamment dans les pays industrialisés) présentent un niveau d'anthropisation élevé, dont les impacts sont désormais bien

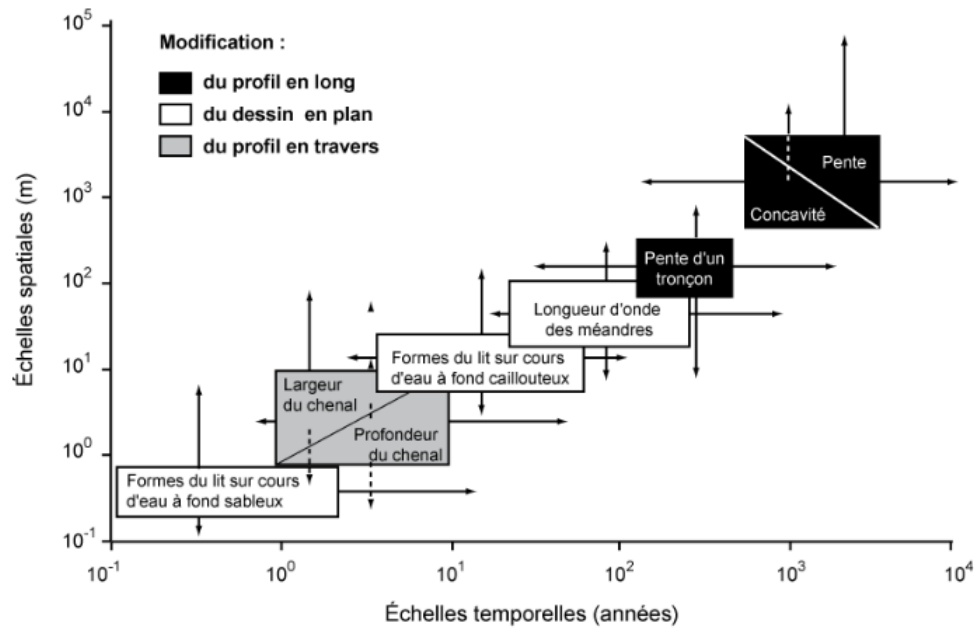


FIGURE 2.3 – Échelles spatiales et temporelles de l’ajustement des formes fluviales d’après ROLLET, 2007 modifié d’après KNIGHTON, 1984

documentés. De manière générale, une diminution des flux hydro-sédimentaires induisant une retraction, une incision, un pavage et une réduction de la mobilité latérale (DOWNS et PIÉGAY, 2019). Ces changements morphologiques ont pour conséquence une déconnexion des annexes fluviales, une simplification globale et une réduction du dynamisme. Le fonctionnement actuel des hydrosystèmes fluviaux, ainsi que leurs structures morphodynamiques, portent ainsi l’empreinte d’un héritage historique lié aux interventions humaines et d’une évolution naturelle (PETTS et AMOROS, 1996). L’homme n’est plus seulement un agent perturbateur externe : il est désormais un acteur et un enjeu important dans l’évolution, l’aménagement et la gestion des cours d’eau. Dans ce contexte, plusieurs auteurs parlent désormais d’anthroposystème fluvial (KONDOLF et PIÉGAY, 2016), soulignant l’intégration des enjeux humains dans la gestion des cours d’eau.

Services écosystémiques supportés par les cours d’eau et altération par les activités humaines

Les dynamiques hydro-sédimentaires jouent un rôle majeur dans le fonctionnement des cours d’eau et la fourniture de services écosystémiques. Pourtant, l’altération des flux solides et liquides peuvent mettre à mal ces bénéfices. Les cours d’eau fournissent une diversité de services écosystémiques essentiels à la fois pour les écosystèmes et les

sociétés humaines. Ils contribuent à la régulation des régimes hydrologiques, en limitant les crues et en soutenant les étiages, tout en jouant un rôle dans le stockage du carbone, notamment dans les zones humides associées. Leur importance est également cruciale pour l’approvisionnement en eau potable, l’irrigation agricole, ainsi que pour la fertilisation naturelle des sols par les dépôts sédimentaires lors des crues. Par ailleurs, les rivières assurent des fonctions écologiques fondamentales. Elles créent des habitats variés favorables à la biodiversité aquatique et jouent un rôle dans l’auto-épuration des eaux, améliorant ainsi leur qualité — un processus vital pour l’ensemble du vivant (WOHL, 2019). Ces services reposent sur un ensemble de caractéristiques (WOHL, 2019) qui ne peuvent se trouver que lorsque la dynamique hydro-sédimentaire est fonctionnelle. L’altération des flux, qu’ils soient hydrologiques ou sédimentaires, constitue l’une des principales causes de dégradation des cours d’eau. Elle se traduit notamment par une diminution de la connectivité latérale, verticale et longitudinale, affectant l’ensemble de l’hydrosystème (lit mineur, zones humides, nappe, plaine d’inondation, etc.).

2.2.2 État de l’art sur les effets morphologiques de principaux facteurs d’anthropisation

Dans cette partie, nous nous concentrerons sur les deux principaux facteurs d’anthropisation du linéaire étudié.

Extractions en lit mineur

Les matériaux alluviaux représentent une ressource essentielle pour le secteur industriel. En conséquence, cette ressource a fait l’objet d’une forte exploitation au cours du XXe siècle. Toutefois, cette activité n’est pas sans conséquences sur les cours d’eau, car elle les prive d’une part importante de leur charge sédimentaire. L’extraction de granulats peut conduire à des modifications significatives de la morphologie du chenal, dans ses dimensions verticale, transversale et longitudinale. Le creusement du lit peut créer des fosses, engendrant ainsi une concavité artificielle. Par ailleurs, ces extractions entraînent souvent un élargissement local du lit durant la phase d’exploitation. D’autres effets se manifestent pendant les opérations, notamment une augmentation de la turbidité de l’eau, qui modifie les propriétés physiques des habitats aquatiques, ainsi qu’une destruction locale d’habitats sensibles tels que les frayères. De plus, le colmatage du lit peut entraîner l’asphyxie de la microfaune et une perte de la capacité d’autoépuration (BEAUDELIN, 1989). Ces perturbations peuvent également modifier la distribution spatiale des radeaux et des mouilles (BATALLA, 2003).

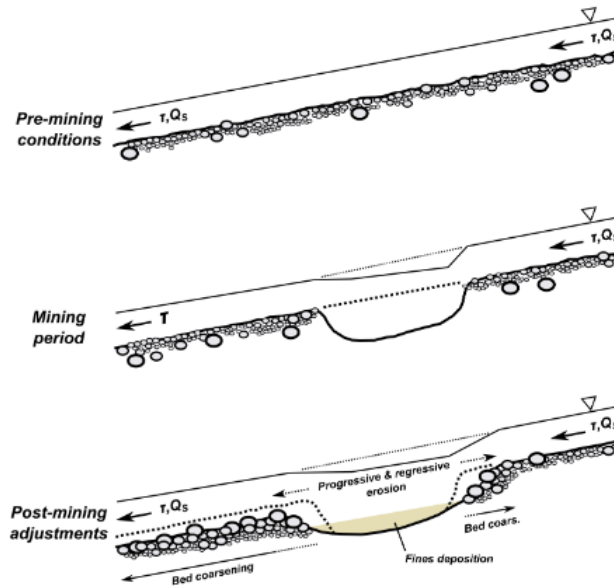


FIGURE 2.4 – Réponse morphologique du cours d'eau post-exploitation (BULTEAU, 2023) modifié selon (KONDOLF, 1997)

Bien que cette pratique soit aujourd'hui interdite⁴, elle a laissé un héritage durable dans le paysage alluvial et dans le fonctionnement hydro-sédimentaire des rivières concernées, notamment à cause du déficit sédimentaire qu'elle a engendré (JANTZI et al., 2017). Ce déficit se traduit notamment par une incision du lit (BEAUDELIN, 1989; PEIRY et al., 1994; BATALLA, 2003; ROVIRA et al., 2005), car la capacité de transport du cours d'eau devient trop importante par rapport à la disponibilité en matériaux (GALAY, 1983; ERSKINE, 1990; LANDON, 1999). Les concavités artificielles créées par les extractions forcent le cours d'eau à retrouver un nouveau profil d'équilibre en modifiant son profil en long (fig. 2.4). Cela peut engendrer à la fois une érosion régressive et une érosion progressive (BEAUDELIN, 1989; KONDOLF, 1997). À l'échelle locale, l'abaissement du lit modifie le niveau de base et augmente la pente entre l'amont et la fosse d'extraction. Cette augmentation de pente provoque une accélération de l'écoulement, favorisant l'érosion locale de l'amont de la fosse. Cette érosion se propage ainsi en amont : c'est l'érosion régressive. Au droit de la gravière, l'eau perd de l'énergie et dépose les matériaux érodés depuis l'amont, ce qui en fait un piège à sédiments. En aval, l'énergie du flux d'eau n'est pas dissipée par les sédiments qu'elle transporte puisqu'ils ont été piégés. Ce phénomène, connu sous le nom de "hungry water" (eau affamée) (KONDOLF, 1997), conduit à la progression vers l'aval de l'incision initiée localement :

4. Art.11.2.I de l'Arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières

c'est l'érosion progressive. Corrolaire de cette incision, les matériaux les plus fins sont exportés tandis que les plus grossiers ne sont pas entraînés. De ce transport selectif résulte la mise en place d'un pavage de surface (BATALLA, 2003), qui conduit à une réduction importante des échanges verticaux et du potentiel biologique. On note aussi un rétrécissement de la bande active (BRAVARD et al., 1999 ; LATAPIE et al., 2014). Le déficit sédimentaire, aggravé par la présence de la fosse d'extraction, peut provoquer un enfoncement du lit à l'aval, avec des effets pouvant se faire sentir sur plusieurs kilomètres (KONDOLF, 1997). Lorsque le linéaire affecté ne présente que peu de contraintes aux ajustements, c'est le lit de tout un cours d'eau qui peut s'enfoncer de plusieurs mètres, comme ce fut le cas sur la Loire où la charge sableuse, toujours mobile, ne permet pas le développement d'un pavage protecteur (GASOWSKI, 1994). Au contraire, l'incision peut être ralentie voire stoppée par la présence d'un point dur (seuil, substrat rocheux), ou par la formation d'un pavage trop grossier pour être mobilisé par le cours d'eau (CHAPUIS, 2012).

Les impacts morphologiques évoqués posent également des problèmes pour les infrastructures humaines, comme la déstabilisation des piles de pont (BEAUDELIN, 1989 ; MARSTON et al., 2003). Par ailleurs, l'abaissement de la ligne d'eau au droit des gravières, combiné à l'incision du lit, provoque une baisse du niveau de la nappe phréatique, entraînant le dépérissement de la ripisylve et des espèces animales qui en dépendent (BEAUDELIN, 1989). Ces effets peuvent persister pendant plusieurs siècles (KONDOLF, 1997), mais leur ampleur dépend de plusieurs facteurs, notamment : l'intensité des extractions passées, les apports sédimentaires en amont, et la nature des matériaux extraits (DÉPRET et al., 2021). Il semble que le sable joue un rôle important dans le comblement des fosses d'extraction (DÉPRET et al., 2021). En effet, plus la charge sableuse est importante, plus ces ajustements seront rapides.

2.2.3 Impacts des barrages au fil de l'eau et du court-circuitage

Les barrages hydroélectriques sont généralement associés au piégeage des sédiments en amont, ce qui entraîne un déficit sédimentaire à l'aval (PEIRY et al., 1994). En effet, dans certains cas, ces ouvrages peuvent bloquer jusqu'à 100 % de la charge de fond (VERICAT et BATALLA, 2006), empêchant ainsi le renouvellement du matelas alluvial (BATALLA, 2003). Ce déficit à l'aval provoque plusieurs phénomènes morphologiques, tels que l'incision du lit, le pavage du fond (BULTEAU, 2023) et l'élargissement du chenal (BATALLA, 2003). L'incision est souvent liée au phénomène de "hungry water" (KONDOLF, 1997) décrit ci-dessus, où l'eau appauvrie en sédiments devient plus érosive. Ce déficit peut alors se propager sur l'ensemble du linéaire aval, mais il peut être partiellement compensé par les affluents, à condition que ceux-ci ne soient pas soumis aux

mêmes pressions (SCHMIDT et WILCOCK, 2008). Il est également important de noter que l'envasement progressif des réservoirs réduit la capacité de stockage des barrages, nécessitant parfois des opérations de curage coûteuses.

Cependant, l'impact des barrages varie selon le type d'ouvrage et sa gestion. Dans ce contexte, nous nous concentrons ici sur les barrages au fil de l'eau, qui sont ceux présents sur le secteur d'étude. Ces barrages transversaux, de faible hauteur, inférieurs à celle des berges amonts, permettent aux écoulements de passer au-dessus (S. CSIKI et RHOADS, 2010). Généralement, ils sont situés dans les parties moyennes à basses des bassins versants, souvent dans des vallées larges et à faible pente (BULTEAU, 2023). Ils ne créent pas de discontinuités majeures pour les flux liquides. Lors des crues morphogènes, les débits de pointe ne sont généralement pas modifiés (IBISATE et al., 2013), car les réservoirs des barrages au fil de l'eau ont une faible capacité de stockage, souvent inférieure à un jour (BULTEAU, 2023), ce qui ne permet pas d'absorber les débits de crues. Concernant le transit sédimentaire, ces barrages peuvent également piéger une partie des sédiments, à l'instar des seuils. Cela peut entraîner une diminution de la granulométrie vers l'aval. Cependant, cet impact peut être atténué si l'ouvrage se remplit partiellement, permettant ainsi un passage progressif de la charge de fond (PEARSON et PIZZUTO, 2015 ; IBISATE et al., 2013), à condition qu'aucune opération de curage ne soit réalisée.

Par ailleurs, certains barrages dévient une partie de l'eau vers des canaux ou conduites forcées, privant ainsi le chenal naturel d'une partie de ses flux liquides, ce qui peut altérer sa capacité à transporter les sédiments (BAKER et al., 2011). Ce processus peut réduire la fréquence des crues morphogènes (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2019), provoquer un rétrécissement du chenal (IBISATE et al., 2013 ; BULTEAU et al., 2022) avec un envasement par la végétation riveraine, une plus faible mobilité des sédiments (ARNAUD et al., 2015) et une réduction de la taille des particules dans le chenal (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2022). Ces effets sont principalement dus à la réduction des flux hydrologiques et peuvent être moins marqués en aval des restitutions (BULTEAU et al., 2022).

Enfin, certains barrages au fil de l'eau sont équipés de vannes de fond ou de clapets permettant d'effectuer des transparences sédimentaires lors des crues, pour faciliter le passage des sédiments vers l'aval. Ces opérations, visent à maintenir la mobilité du lit et à favoriser la diversité des habitats en aval des ouvrages (DÉPRET et al., 2019). Ces opérations permettent également de contrôler le niveau de remplissage de la retenue par les sédiments (LOIRE et al., 2021). Il existe un consensus sur la nécessité de ces transparences (KONDOLF, 1997 ; BATALLA, 2003 ; BULTEAU, 2023). Lorsque le barrage est ouvert pendant les crues, en particulier lors des débits égaux ou supérieurs au débit d'entraînement des sédiments, l'impact sur le transit sédimentaire peut être quasi nul

(CHAPUIS, 2012), voire permettre un passage total de la charge de fond (PETIT et al., 1996).

2.3 Impacts cumulés : approche hypothético-déductive en réponse

Afin de proposer des actions de gestion efficaces, il est important de connaître le rôle de chaque facteur dans les impacts observés, afin de cibler les actions sur les facteurs les plus influents. Dans la majorité des cas, les facteurs d’anthropisation ne sont cependant pas isolés. Pourtant, pendant longtemps, les études en géomorphologie fluviale se sont concentrées sur un seul facteur, sans prendre en compte le cumul des impacts de ces différents facteurs (PETTS et AMOROS, 1996), ou l’évolution naturelle du système (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2022). Les études portant sur les impacts associés aux facteurs d’anthropisation se sont majoritairement appuyées sur une approche dite *expert-based* (à dire d’expert). Cette méthode, qualifiée de *bottom-up* (ascendante), repose sur une démarche inductive (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2022) : à partir de données empiriques, on détecte des dysfonctionnements, que l’on attribue ensuite à un facteur donné, en fonction de la synchronicité et de la proximité spatiale entre le changement observé et la pression identifiée. Le croisement de plusieurs études entre effets observés et pressions permet alors d’établir des patterns, permettant de s’extraire d’une vision réductionniste. Cette approche s’est révélée pertinente dans les premiers temps de la discipline, car elle permettait de recueillir de nombreuses données et de formuler des premières interprétations. Toutefois, elle présente des limites, notamment un biais de confirmation (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2022 ; BULTEAU et al., 2024). Aussi, rien ne peut garantir que les régularités observées seront toujours vérifiables dans tous les contextes (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2022). Si cette approche se révèle efficace pour des contextes simples (peu de facteurs en jeu), ce n’est pas le cas de la plupart des anthroposystèmes fluviaux, où des multiples pressions se superposent à l’évolution du climat et à des changements importants d’occupation du sol.

Ainsi, pour permettre une attribution plus objective, l’usage d’une démarche hypothético-déductive a été préconisé (DOWNS et PIÉGAY, 2019), puis appliqué (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2022). Il s’agit cette fois d’une approche déductive, suivant un raisonnement inverse à celui de la méthode inductive. On part d’hypothèses, fondées sur les connaissances scientifiques établis au préalable, que l’on teste pour conclure sur leur validité ou invalidité. Les hypothèses doivent être testables (BULTEAU et al., 2024) et falsifiables (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2022). Cette démarche présente toutefois certaines limites :

elle permet de valider ou d’invalider des hypothèses, mais ne permet pas de découvrir de nouveaux facteurs ou variables cachées ou confondantes (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2022 ; BULTEAU et al., 2024).

La démarche hypothético-déductive peut être combinée à une approche BACI (Before-After Control Impact) afin d’établir des liens de causalité plus solides entre impact et pression (BULTEAU et al., 2022). Initialement utilisée pour évaluer l’efficacité des projets de restauration (MARTEAU et al., 2022), elle peut également être mobilisée pour documenter l’impact des pressions en comparant l’ avant/après pression et en comparant des tronçons impactés à des tronçons témoins non impactés. Cette méthode repose sur la comparaison des trajectoires d’évolution de chaque secteur, afin de mieux saisir les impacts spécifiques. En formulant plusieurs hypothèses et en isolant les facteurs, il devient possible d’attribuer plus précisément les impacts spécifiques à chaque facteur d’anthropisation, pris individuellement.

Pour mettre en œuvre cette démarche hypothético-déductive, F. Boutault propose dans sa thèse une méthode dont je me suis inspirée dans ce travail (BOUTAULT, 2020). La première étape consiste à réaliser un inventaire des pressions, qui sera présenté lors de la description de la zone d’étude (3.2.2). Cette partie se conclura par la deuxième étape : la formulation des hypothèses (3.3). La troisième étape consiste en la production de nouvelles données, quantitatives et adaptées aux hypothèses émises. Ces données seront présentées dans la partie résultats (5.3). Enfin, la dernière étape, qui concerne la validation ou l’invalidation des hypothèses, sera traitée dans la discussion (6.2).

Partie 3

Présentation de la zone d'étude et hypothèses de travail

Il est essentiel de replacer le cours d'eau dans le contexte de son bassin versant, en particulier de sa partie amont, afin de mieux comprendre les contraintes auxquelles il est soumis. Le linéaire étudié résulte en effet des dynamiques de circulation des flux en provenance de l'amont. Nous analyserons ensuite les pressions s'exerçant sur le cours d'eau, au droit du linéaire d'étude (3.1). Cette présentation permettra de formuler des hypothèses en lien avec le jeu de pressions observé.

3.1 Caractéristiques physiques du bassin versant et du tronçon d'étude

Le diagnostic hydro-sédimentaire s'intéresse à documenter la circulation de deux types de flux dans le système : d'une part, les flux solides (sédiments) ; d'autre part, les flux liquides. Pour cela, il est nécessaire de comprendre les caractéristiques physiques dans lesquelles il s'inscrit (géologie, relief, occupation du sol, climat), car ce sont ces caractéristiques du bassin versant qui déterminent la production primaire de ces flux, notamment à travers l'érosion des versants et les précipitations.

3.1.1 Caractéristiques topographiques et géologiques

La Garonne est un fleuve du sud-ouest de la France. Elle prend sa source en Espagne, dans les Pyrénées, et parcourt une distance d'environ 575km jusqu'à son embouchure dans l'océan Atlantique, au niveau de l'estuaire de la Gironde. Son bassin versant couvre une superficie d'environ 56000km². Ce bassin comprend deux massifs montagneux : les

Pyrénées au sud, et le Massif Central dans sa partie orientale.

Le tronçon d'étude s'étend sur 48 km, depuis la confluence avec la Neste (située à 78 km de la source) jusqu'à la confluence avec le Salat. Il se trouve dans la Garonne de Piémont (LAMBERT, 1989, portion du cours d'eau comprise entre la confluence avec la Neste et celle avec l'Ariège. La zone d'étude est située à la sortie immédiate de la zone montagneuse, à l'endroit où commence la plaine. À la confluence avec le Salat, la superficie du bassin versant atteint environ 2 679 km².

Le bassin versant présente une topographie très contrastée, combinant des zones de montagne au relief marqué et des secteurs de plaine. L'altitude varie de 130m à 3222m. Ce fort gradient altitudinal influence fortement les processus hydrologiques, géologiques et climatiques de la région. En effet, c'est dans la zone montagneuse, qui présente cette caractéristique, que se joue l'alimentation en flux, notamment en sédiments, pour l'ensemble du linéaire de la Garonne. Il s'agit en effet de la principale zone de production. Ainsi, les apports sédimentaires en aval dépendent directement de cette portion amont.

Le bassin versant de la Garonne recouvre une grande diversité de formations géologiques, témoignant d'une évolution structurale du centre vers le nord : La zone axiale, située au centre, est constituée principalement de formations primaires, avec des roches cristallines d'origine métamorphique et magmatique. Cette zone est bordée par des terrains secondaires, principalement calcaires, qui forment la périphérie de la zone montagnarde. Enfin, la zone de Piémont est constituée de formations tertiaires (collines de molasse) et quaternaires, comprenant notamment des terrasses alluviales anciennes.

Le relief actuel résulte d'une part de cette organisation géologique, et d'autre part de l'action des glaciers quaternaires. La dernière glaciation a atteint son maximum vers 35000BP (FERNANDES et al., 2021). Le glacier de la Garonne, à l'origine de la vallée actuelle, s'est étendu jusqu'au Comminges, où l'on observe encore aujourd'hui des moraines terminales. Le retrait des glaces, lors du réchauffement holocène, a libéré des surfaces surcreusées entre des points durs du relief. Ces dépressions ont parfois donné naissance à des lacs, comme cela a été observé dans la vallée de la Garonne (ARRICAU et CHAPRON, 2021). Le lac de la vallée a ensuite été comblé par des dépôts fluvioglaciaires, dont les paysages actuels alternant vallées larges et verrous géologiques (Saint-Béat, Labroquère), en sont hérités. La zone d'étude n'a pas été directement influencée par le passage des glaciers, contrairement aux secteurs situés en amont. Cependant, les matériaux sur lesquels s'écoule aujourd'hui la Garonne sont le résultat de cette histoire : d'une part, en raison de la production massive de sédiments liée à l'érosion glaciaire ; d'autre part, par la libération et la mobilisation progressive de ces stocks vers l'aval au cours de l'Holocène.

La structure géologique permet également de définir une zone de mobilité géolo-

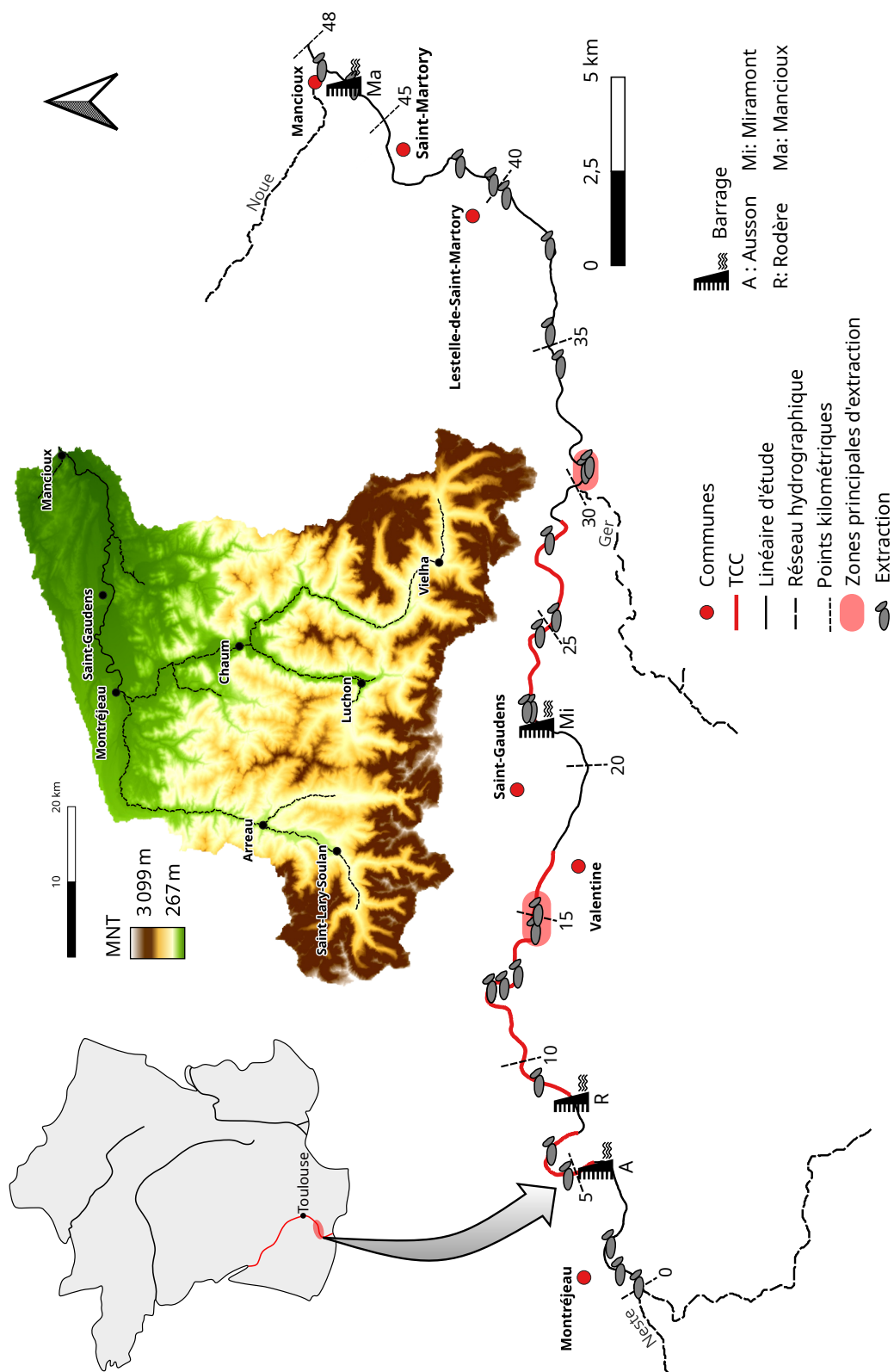


FIGURE 3.1 – Zone d'étude avec les principales pressions anthropiques

gique, correspondant aux alluvions actuelles et subactuelles, bordées par des terrasses alluviales anciennes. Ces dernières sont constituées de matériaux fluvioglaciaires, résultant de la remobilisation des dépôts morainiques issus des phases glaciaires. Sur le tronçon étudié, l'espace de mobilité géologique est parfois particulièrement développée, avec une largeur pouvant atteindre 1 km, notamment au niveau de Pointis-de-Rivière. Cette large plaine alluviale offre au cours d'eau la possibilité d'évoluer librement dans cet espace, favorisant ainsi sa mobilité latérale. À l'inverse, un verrou géologique situé au niveau de la commune de Valentine réduit de manière significative l'espace de mobilité géologique, limitant par conséquent la mobilité latérale du cours d'eau. En aval de Saint-Martory, on observe également un changement de faciès au niveau du fond du lit. Alors que la Garonne s'écoule majoritairement sur un matelas alluvial composé d'alluvions grossières (graviers, galets) dans le secteur d'étude, elle s'écoule directement sur le substrat rocheux plus résistant en aval de Saint-Martory. Ce changement limite l'incision du lit et freine ainsi la mobilité verticale du cours d'eau.

3.1.2 Caractéristiques hydrologiques

Les débits observés sur le tronçon étudié sont influencés par les apports de la Garonne amont, de la Neste et du Ger, après la confluence. ce tronçon se caractérise par un régime de crue nivo-pluvial, la période d'étiage s'étendant de juillet à octobre, tandis que les hautes eaux se produisent de novembre à juin, avec une activité maximale en mai, liée à la fonte des neiges (EGIS, 2022).

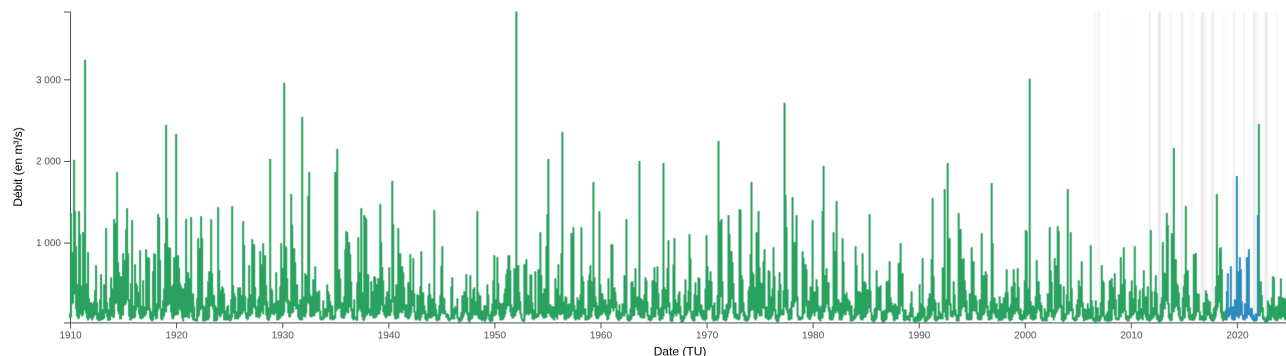


FIGURE 3.2 – Chronique des débits moyens journaliers de 1910 à 2025, station de Portet-sur-Garonne (3, s. d.)

Les débits caractéristiques mesurés à la station de Valentine¹ sont les suivants :

-
1. La station de Valentine enregistre des débits de la Garonne partielle. Les débits interannuels sont

QJ10 (débit moyen journalier dépassé en moyenne 10 jours par an) : 146 m³/s

QJ0,5 (dépassé en moyenne une fois tous les deux jours) : 40,2 m³/s

QJ355 (dépassé en moyenne 355 jours par an) : 16,5 m³/s

La crue de référence pour la Garonne pyrénéenne est l'épisode du 23 au 24 juin 1875, avec un débit estimé à 1300 m³/s à Saint-Gaudens. D'autres crues historiques sont également recensées, notamment celle de 1897, avec un débit de 1200 m³/s, et plus récemment, celle de 2013, avec un débit de 600 m³/s enregistré à Saint-Gaudens (EGIS, 2022). La seule chronique hydrologique longue actuellement disponible est celle de la station de Portet-sur-Garonne (3.2). Il est toutefois essentiel de noter que la confluence avec l'Ariège, située entre la zone d'étude et cette station, constitue un apport hydrologique majeur. Par conséquent, cette chronique ne reflète pas toujours la dynamique hydrologique, notamment en ce qui concerne les crues, au niveau de la zone d'étude.

3.2 Caractéristique et évolution de la dynamique hydro-sédimentaire au sein du bassin versant et dans le tronçon d'étude

Pour documenter l'évolution hydro-sédimentaire sur le secteur d'étude, il convient tout d'abord de connaître le contexte hydro-sédimentaire général dans lequel celui-ci s'inscrit.

3.2.1 Évolution de la dynamique hydro-sédimentaire dans la partie amont du bassin versant

Nous nous intéresserons ici à cette dynamique pour la partie amont du bassin versant, notamment la Garonne amont. En effet, les effets observés en amont ont tendance à se propager vers l'aval, sauf si un affluent est en capacité de les atténuer ou de les résorber.

calculés à partir des 499 QmM(débits moyens mensuels) les plus valides du 01/01/1984 au 01/07/2025. Les débits caractéristiques ont été produits à partir des 15199 QmJ(débits moyens journaliers) les plus valides du 01/01/1984 au 10/08/2025. 3, s. d., consulté le 11/08/2025

Conséquence de la sortie du petit-âge glaciaire et du changement d'occupation du sol

Du Moyen Âge jusqu'au XXe siècle, l'une des activités principales dans le secteur est l'agro-pastoralisme. Cette activité nécessite le maintien d'espaces ouverts, impliquant une déforestation massive, ce qui a pour conséquence une érodabilité accrue des sols. Au plus fort du Petit Âge Glaciaire (PAG), à la fin du XIXe siècle, l'hydrologie, alors bien plus dynamique qu'aujourd'hui, entraîne une crise érosive majeure. En réponse à cette problématique, une politique de reboisement des versants et de correction torrentielle, à l'aide d'ouvrages visant à stabiliser le profil en long, est mise en place par les services RTM (Restauration des Terrains en Montagne) (MÉTAILIÉ, 2006). A cela s'ajoute une déprise pastorale, favorisant le reboisement naturel d'espaces autrefois pâturés. Ces dynamiques ont pour conséquence une stabilisation des versants et du profil en long au début du XXe siècle, qui conduit alors à une forte baisse de la production sédimentaire primaire (BULTEAU, 2023). De manière synchrone, le climat évolue avec la fin du PAG, induisant une réduction du dynamisme hydrologique (ANTOINE, 2009) (fig. 3.3), ce qui, en plus de la diminution de la production, limite la mobilité des sédiments vers l'aval.

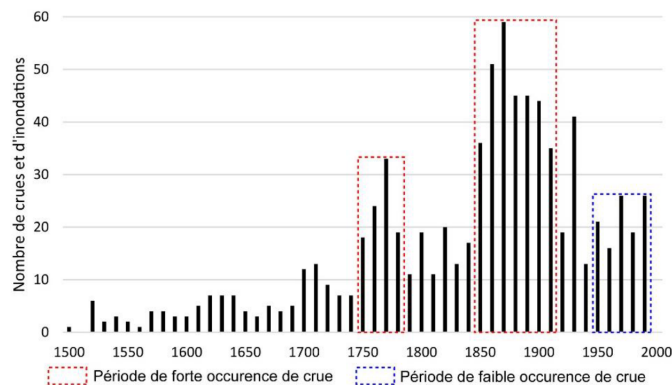


FIGURE 3.3 – Nombre d'inondations et crues torrentielles recensées par décennie dans les Pyrénées entre 1500 et 2000 ; source : BLANPIED et al., 2018 selon ANTOINE, 2009

Conséquence des activités hydroélectriques

Le second facteur marquant de la dynamique et des paysages fluviaux de la Garonne amont est la production hydroélectrique. Les tronçons amont (Garonne Espagnole et Pique en amont de Luchon) ont connu au cours du 20ème siècle des aménagements très précoces, dès 1920, ayant affecté durablement la régime hydrologique et le transit sédimentaire de ces secteurs. L'ensemble des pressions mentionnées participent au déficit

sédimentaire généralisé (ARTELIA, 2015). Il en résulte des effets morphologiques bien documentés, notamment sur la Garonne amont : rétraction de la bande active, incision, pavage de surface et abandon de chenaux secondaires dans certains secteurs comme en aval des barrages (BULTEAU, 2023).

En conclusion, la Garonne amont est marquée par un déficit sédimentaire important, équivalent à plusieurs siècles d’apports sédimentaires. La production hydroélectrique dans la partie amont perturbe l’hydrologie, mais cet effet s’atténue vers l’aval, où l’hydrologie reste relativement naturelle. On observe néanmoins une baisse globale des débits, liée à la sortie du Petit Âge Glaciaire. La compréhension du fonctionnement de l’amont du bassin versant est essentielle pour appréhender le contexte hydro-sédimentaire dans lequel s’inscrit notre tronçon d’étude, situé en aval. Celui-ci est en effet soumis, en plus des pressions propres à son linéaire, à celles héritées de l’amont, conformément au fonctionnement du continuum fluvial.

3.2.2 Anthropisation du tronçon d’étude

Dans un premier temps, nous présenterons le jeu de pressions qui concerne la zone d’étude. Ensuite, un focus sera fait sur deux pressions majeurs : les extractions en lit mineur qui constitue un héritage et les barrages au fil de l’eau, toujours en fonctionnement. Ces pressions sont susceptibles d’entraîner des altérations sur les flux liquides et solides

L’hydrologie est altérée par le détournement partiel des flux liquides en plusieurs points du linéaire. À la hauteur de Saint-Martory, une prise d’eau alimente le canal de Saint-Martory, d’une longueur de 71 km en direction de Toulouse, avec un débit nominal prélevé de 10 m³/s. Le linéaire est également affecté par du court-circuitage, en lien avec la présence d’anciens canaux conçus pour l’alimentation de moulins ou d’usines.

Par ailleurs, plusieurs infrastructures présentes sur le linéaire entravent la continuité sédimentaire vers l’aval. On recense ainsi dix-neuf seuils sur la Garonne Moyenne. Parmi eux, huit présentent un impact faible, deux un impact très faible, deux un impact modéré, et sept un impact fort (EGIS, 2021). Ces ouvrages ont pour fonction principale la dérivation d’une partie du débit, soit pour alimenter des canaux, soit pour la production hydroélectrique. Quatre de ces seuils dépassent une hauteur de 50 cm, ce qui favorise un stockage des sédiments en amont et un déficit sédimentaire en aval.

En revanche, le linéaire semble peu affecté par les protections de berges ou l’endiguement. Seule une protection de berge située en amont de la confluence avec le ruisseau du Lavet est susceptible d’entraver localement la mobilité latérale du cours d’eau.

Deux types de pressions apparaissent néanmoins comme majeures à l’échelle du

linéaire (fig. 3.4) : les extractions de matériaux dans le lit mineur et les aménagements hydroélectriques, notamment les barrages au fil de l'eau, dont certains entraînent le court-circuitage d'une partie du linéaire.

Les extractions en lit mineur ont débuté dans les années 1940 et se sont poursuivies jusqu'en 1994, date à laquelle une loi a interdit cette pratique. Les années 1960 et 1970 ont vu une concentration particulièrement forte de ces activités. Suite à leur interdiction, le lit majeur a également été affecté par l'exploitation de gravières situées le long du linéaire. Certaines d'entre elles ne sont plus exploitées aujourd'hui, comme la gravière de la Hierle, tandis que d'autres sont toujours actives, par exemple à Beauchalot ou à Valentine. Toutefois, c'est bien l'extraction en lit mineur qui constitue la pression la plus directe sur la morphologie du lit et sur le transport sédimentaire. Les gravières en lit majeur ne présentent un risque pour le transit sédimentaire que dans le cadre d'un épisode de crue morphogène, susceptible d'entraîner leur capture par le cours d'eau (*e.g.*, la gravière de Taillebourg a fait l'objet d'une capture lors de la crue de 2022).

La seconde pression majeure est liée à la présence de barrages et au captage d'importants volumes d'eau pour l'alimentation de canaux de dérivation, provoquant le court-circuitage de tronçons entiers du lit naturel. Le linéaire étudié comprend quatre barrages. Trois d'entre eux sont des barrages mobiles associés à une production hydroélectrique continue. Ils dérivent une partie des débits en amont pour alimenter des centrales situées le long de canaux parallèles au lit de la Garonne. Ces dérivation engendrent un court-circuitage conséquent : à l'échelle de la Garonne Moyenne, près de 38% du linéaire, soit 18.5 km, sont ainsi affectés.

Le premier de ces barrages, situé à Ausson, a été construit en 1930. Il est équipé de trois évacuateurs de crue à volets déversoirs. Sa hauteur de chute est de 2,1 m et il permet une dérivation allant jusqu'à 70 m³/s vers l'usine de Pointis. Le tronçon court-circuité en aval est d'environ 3 km. Le barrage suivant, celui de Rodère, construit en 1933, présente une hauteur de chute de 4,15 m et un volume de stockage maximal de 216 000 m³. Il est équipé de trois vannes de type « wagon » et de volets déversoirs. Le canal peut capter jusqu'à 85 m³/s pour alimenter successivement les usines de Camon et de Valentine, avec un court-circuitage d'environ 9 km. Le troisième barrage, situé à Miramont, date de 1931. Il s'agit du plus long barrage mobile du linéaire étudié, avec cinq passes du même type. Il présente une hauteur de chute de 2,1 m et son canal capte jusqu'à 60 m³/s en direction des centrales de Gentille puis de Saint-Sernin. Le tronçon court-circuité s'étend sur environ 7 km.

Ces trois barrages sont conçus pour permettre des « transparences » lors des épisodes de crue. À partir d'un débit de 200 m³/s (état de vigilance entre 150 et 200 m³/s), la production hydroélectrique est interrompue et la totalité des flux liquides et solides est

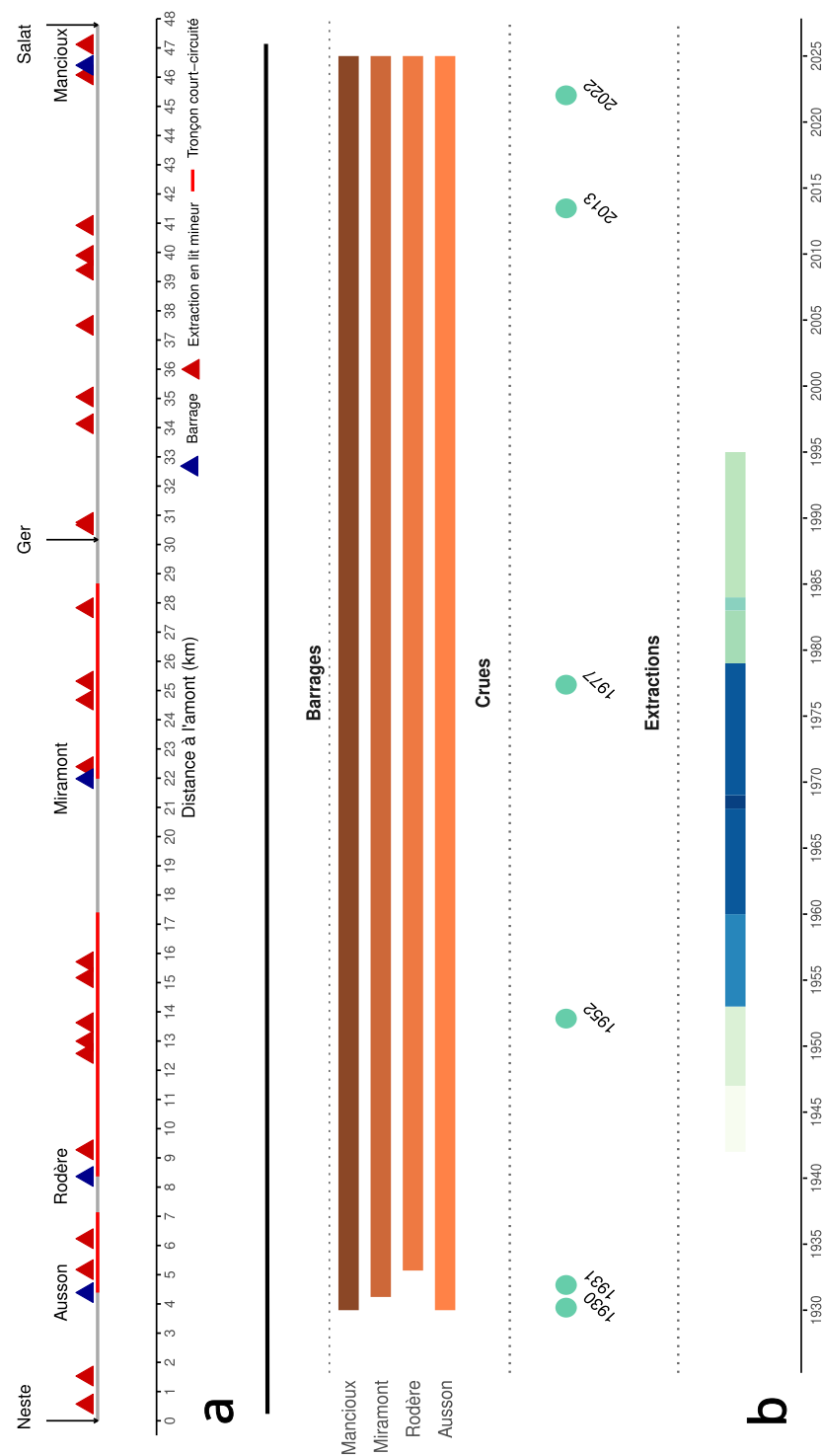


FIGURE 3.4 – Pressions anthropiques principales sur le tronçon d'étude ; a) Distribution spatiale b) Chronologie

renvoyée dans le lit principal. Cela permet à la fois de favoriser le transit sédimentaire vers l’aval et de combler les retenues à l’amont.

Le dernier barrage présent sur le linéaire est un ouvrage de type poids béton, également au fil de l’eau. Sa hauteur de chute est de 8,20 m, avec une capacité utile de 10 000 m³. Contrairement aux précédents, il ne permet pas de transparence. Toutefois, selon EDF, aucune problématique d’accumulation de sédiments n’a été identifiée à ce jour. La date précise de sa construction ne nous a pas été indiquée, mais les photographies aériennes et les données historiques suggèrent qu’il était déjà en place dans les années 1930 ou 1940. Ce barrage entraîne un court-circuitage minime, limité à son seul emplacement.

Bien que l’on dispose aujourd’hui d’informations claires sur les modalités de gestion en crue de ces ouvrages, l’historique de leur exploitation reste incertain. On peut donc légitimement s’interroger sur la mise en œuvre, ou non, des transparences au cours du XXe siècle. En l’absence de telles pratiques, les impacts sur le transit sédimentaire sont bien plus marqués. Dans sa cartographie géomorphologique de la vallée de la Garonne (1989), R. Lambert souligne d’ailleurs les effets de ces obstacles, en rappelant que : « Aujourd’hui, les barrages de retenue installés dans le lit de la Garonne sont tous engravés tant la dynamique fluviale est active et l’attaque des berges concaves efficace. » (LAMBERT, 1989), témoignant d’une gestion peut-être différente de l’actuelle.

3.2.3 Connaissances actuelles sur l’impact hydro-sédimentaire des pressions

Un certain nombre de connaissances ont déjà été produites sur le fonctionnement hydromorphologique du secteur d’étude, notamment à l’occasion des travaux réalisés par Artelia en 2015 (ARTELIA, 2015) et EGIS en 2022 (EGIS, 2022).

De manière générale, le bassin versant dans lequel s’inscrit le tronçon étudié présente des stocks sédimentaires potentiellement mobilisables importants (EGIS, 2022). Toutefois, l’étude met en évidence des problèmes de connectivité, à la fois longitudinale (amont/aval) et latérale, qui empêchent le transit effectif des sédiments depuis les zones de production vers les zones de transfert, là où se situe le tronçon d’étude (EGIS, 2022). Cette déconnexion a des conséquences notables sur le fonctionnement du lit, en particulier par une incapacité du matelas alluvial à se renouveler, faute d’apports sédimentaires suffisants en provenance de l’amont.

En ce sens, Artelia (2015) estime l’ampleur du déficit sédimentaire entre -300 000 et -1 000 000 m³ pour le tronçon compris entre la confluence avec la Pique et la commune de Valentine (ARTELIA, 2015). Les effets de ce déficit se traduisent notamment par

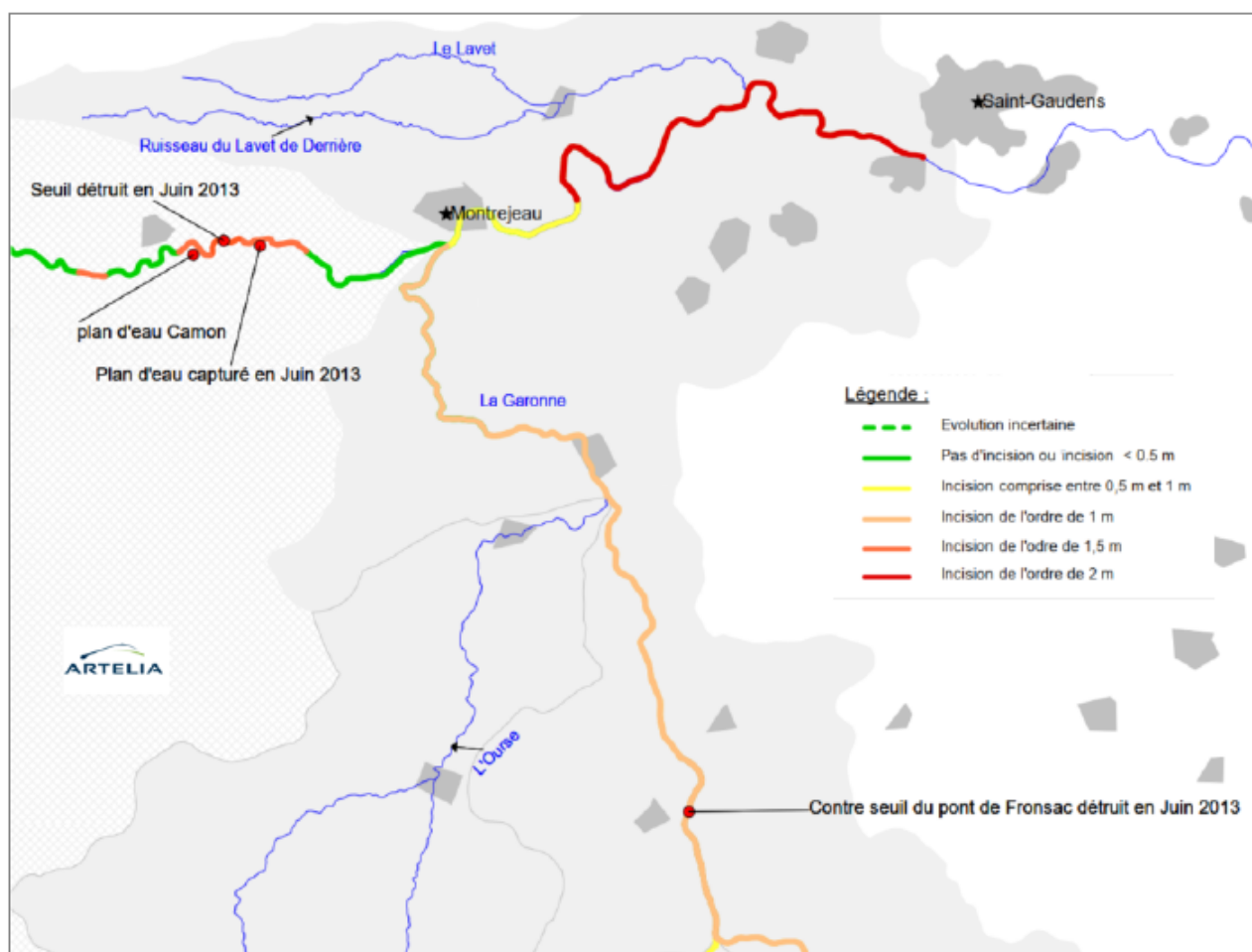


FIGURE 3.5 – Incision de la Garonne et de la Neste ; source : issu de EGIS, 2022 selon les données produites par ARTELIA, 2015

une incision du lit, observable sur le profil en long. Cette incision est estimée entre 0,5 m et 1 m sur le tronçon allant de la confluence avec la Neste jusqu'au barrage d'Ausson (fig. 3.5). En aval de ce dernier, jusqu'à Valentine, l'incision serait encore plus marquée, atteignant localement jusqu'à 2 m (ARTELIA, 2015). À partir de Saint-Martory, le profil en long devient plus stable, ce qui s'explique notamment par la nature géologique du fond du lit, qui agit comme une contrainte à l'ajustement. En effet, en aval de cette commune, la Garonne s'écoule directement sur le substrat rocheux, ce qui limite fortement la poursuite du processus d'incision (EGIS, 2022). Ce changement de dynamique favorise une évolution du cours d'eau par augmentation de sa sinuosité, afin de réduire la pente hydraulique. L'ajustement du profil est toujours en cours, et certaines zones situées en aval du Ger ne semblent pas encore avoir atteint un nouvel état d'équilibre selon les données d'EGIS. Ces données devront être vérifiées, voire précisées, à la lumière des résultats produits au cours de ce travail.

3.3 Formulation des hypothèses

Les connaissances préexistantes issues de la littérature scientifique (2.2), ainsi que le recensement des pressions exercées sur le linéaire (3.2.2), permettent de formuler plusieurs hypothèses (2.3).

H1 : Les extractions de matériaux dans le lit mineur, effectuées entre les années 1950 et 1990, ont privé le cours d'eau d'une partie de sa charge sédimentaire. De plus, la formation de concavités artificielles agit comme un piège à sédiments, obligeant le cours d'eau à ajuster son profil en long par des processus d'érosion régressive et progressive. Ces activités impactent les flux solides (Qs^-), tandis que les flux liquides restent inchangés ($Ql^=$). Ce déséquilibre entraîne une rétraction du lit (W^-), un enfoncement de son niveau (Z^-), ainsi qu'une augmentation de la taille des particules (D^+), pouvant conduire à un phénomène de pavage sur les marges de la fosse. Au droit des extractions, la granulométrie tend plutôt à s'affiner en raison du dépôt de particules plus fines (D^-).

H2 : On recense trois barrages mobiles avec un prélèvement partiel des flux liquides au profit des canaux des centrales hydroélectriques. Ces barrages sont également gérés pour permettre le transit de la charge de fond lors des épisodes de crue. De plus, durant ces épisodes, les vannes des canaux sont fermées, restituant l'intégralité du débit au cours d'eau. Ce mode de gestion n'impacte donc ni le transport solide ($Qs^=$), ni le débit liquide ($Ql^=$) pendant les crues morphogènes. Aucun changement morphologique n'est donc attendu sur ces tronçons ($W^=$, $Z^=$). Cependant, en période de fonctionnement normal, les débits sont modifiés (Ql^-). On peut ainsi s'attendre à une diminution de la taille des particules dans le tronçon court-circuité (D^-), avec un colmatage par des

TABLE 3.1 – Tableau des hypothèses ; W correspond à la largeur, Z à la hauteur du cours d'eau et D au diamètre des sédiments

Hypothèse	Type d'impact	Variables contrôles	Changements morphologiques
H1	Extraction	Q_s^- & Q_l^-	W^- & Z^- & $D^{+/-}$
H2	Barrage	$Q_s^=$ & $Q_l^{-/=}$	$W^=$ & $Z^=$ & $D^{-/=}$

sédiments plus fins. Cet effet reste cependant réversible, puisque l'ensemble de la charge sédimentaire fine peut être remobilisée lors des crues.

Partie 4

Méthode

Afin de documenter l'évolution morphologique du cours d'eau, d'analyser la mobilité sédimentaire et de répondre aux différentes hypothèses formulées, une approche triple et complémentaire a été adoptée.

Dans un premier temps, l'analyse historique vise à retracer l'évolution morphologique au cours du XX^e et du début du XXI^e siècle. Les sources mobilisées et les méthodes de traitement de données seront détaillées. L'approche expérimentale repose, quant à elle, sur des observations de terrain. Une section présentera les protocoles utilisés pour la collecte des données, ainsi que leur traitement informatique. Enfin, une dernière partie sera dédiée à l'approche hypothético-déductive, centrée sur le choix des tronçons impacts et contrôles, dans le but de tester les hypothèses énoncées (3.3).

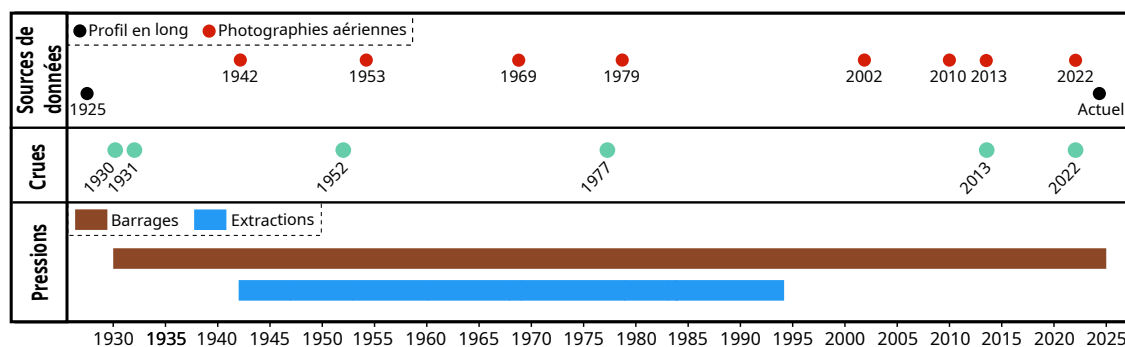


FIGURE 4.1 – Données utilisées pour l'analyse de l'évolution morphologique et perturbations naturelles (crues) et anthropiques (pressions)

4.1 Approche historique

L’approche historique s’articule en plusieurs étapes. Une première consiste à identifier et analyser les pressions exercées sur le cours d’eau, qu’elles soient d’origine naturelle ou anthropique, susceptibles d’altérer les flux liquides et/ou solides. Dans un second temps, nous évaluerons l’évolution morphologique du cours d’eau, à travers l’étude de la planimétrie et du profil en long (fig. 4.1). L’objectif est de mettre en regard les dynamiques morphologiques constatées avec les différentes pressions identifiées, afin de tenter de distinguer les effets spécifiques de chaque activité humaine ou changement environnemental sur le tronçon étudié.

4.1.1 Inventaire des pressions

Il a tout d’abord été nécessaire de documenter les différentes pressions, qu’elles soient anthropiques ou naturelles, qui influencent les flux solides et liquides.

Pressions naturelles

Les données concernant les pressions naturelles proviennent essentiellement de la bibliographie existante et d’études internes, notamment le document relatif au Plan de Gestion Hydrosédimentaire (PGH), en particulier pour l’aspect hydrologique.

Pressions anthropiques

Deux pressions anthropiques majeures ont été recensées sur le linéaire : les extractions en lit mineur et les barrages au fil de l’eau (2.2).

Les informations relatives aux extractions proviennent d’un rapport réalisé par EGIS pour le SMGA, qui recense les gravières actuelles mais également les gravières historiques. Ce sont ces dernières qui nous intéressent ici, dans la mesure où ce travail se concentre sur les extractions en lit mineur, lesquelles ne peuvent être postérieures à la loi de 1994 qui les interdit. Ce document fournit également des données sur les barrages et seuils existants. Le recensement des barrages a été complété par les informations disponibles sur le site d’EDF Ma rivière et moi, qui présente les barrages, les centrales hydroélectriques, ainsi que quelques caractéristiques techniques. Enfin, une visite de trois ouvrages en compagnie d’EDF (barrages d’Ausson, de Mancieux et de Saint-Vidian) a permis d’approfondir nos connaissances sur les modalités de gestion, notamment en période de crue.

La précision des données, notamment concernant les dates d’extraction, reste peu suffisante. En effet, la base de données d’EGIS indique souvent les dates de début d’ex-

Date	Q _{max} (m ³ .s ⁻¹)	Qualification	Ortho av.	Ortho ap.
02-03/02/1952	4350	Q50	1942	1953
20/05/1977	3250	Q20	1969	1979
18-19/06/2013	3530	Q50	2010	2013
10-11/01/2022	3520	Q20	2019	2022

TABLE 4.1 – Tableau des orthophotographies utilisées pour documenter les effets post-crue. Débits mesurés à la station de Portet-sur-Garonne

ploitation, mais rarement celles de fin. Une évaluation visuelle a donc été réalisée à partir de photographies aériennes pour confirmer la présence d’extractions et estimer les périodes d’activité. Cette méthode donne une première estimation, mais reste imprécise. On observe notamment une hétérogénéité dans l’intensité des extractions au fil du temps. Par exemple, certaines périodes de recolonisation végétale entre deux phases d’exploitation suggèrent une activité discontinue sur certains sites. Il n’a donc pas été possible de réaliser un inventaire précis et exhaustif de toutes les extractions en lit mineur et de leur chronologie et encore moins des volumes extraits. En ce qui concerne les barrages, les sources mobilisées offrent une bonne vision de l’état actuel de l’exploitation hydroélectrique et de sa chronologie. En revanche, les modalités de gestion passées, notamment en ce qui concerne la transparence en crues, restent inconnues.

4.1.2 Évolution de la bande active et des surfaces érodées et construites

Géoréférencement des photographies aériennes

L’analyse de l’évolution en plan constitue une étape nécessaire pour documenter les processus de divagation, d’érosion et de construction, ainsi que certaines activités anthropiques telles que les extractions de gravier dans le lit du cours d’eau.

Le choix des années étudiées repose sur plusieurs critères (table 4.1)¹ : d’une part, l’encadrement des grandes crues (dépassant le Q20), et d’autre part, la disponibilité de photographies aériennes en fonction des campagnes d’acquisition couvrant l’ensemble de la zone d’étude. Deux types de données ont été mobilisés : Pour les années 1953, 2002, 2010, 2013, 2019 et 2022, la planimétrie a été réalisée directement à partir des flux WMS mis à disposition par les géoservices de l’IGN (2, s. d.). Pour les années non géoréférencées, telles que 1942, 1969 et 1979, les photographies aériennes ont été téléchargées via le site « Remonter le temps » de l’IGN (4, s. d.).

1. Débits et qualification pour la station de Portet-sur-Garonne, 3, s. d.

Pour ces dernières, un géoréférencement manuel a été nécessaire afin de couvrir l'intégralité de la zone d'étude. Le géoréférencement a été effectué à l'aide de l'outil "géoréférencement" du logiciel QGIS, en prenant comme référence l'année la plus proche disponible en flux WMS afin de limiter les erreurs de géoréférencement. En moyenne, dix points de contrôle ont été placés par image. Les recherches menées par Hughes et al. en 2006 (HUGHES et al., 2006) ont montré une faible amélioration de la médiane des erreurs au delà de 8 GCP (Ground Control Point). Une augmentation du nombre de points de contrôles permet tout de même une réduction des valeurs extrêmes. Ces points de contrôles sont majoritairement des points durs (bâtiments, intersection de routes etc.) même si la rareté de ce type de points dans des zones agricoles ou boisées nous a contraint à avoir recours également à des points "mous" (e.g. arbres). Bien que l'utilisation de points aux bords nets soient préférables, les recherches de Hughes et al. tendent à démontrer que la différence entre l'utilisation de ces deux types de points n'est pas très significative (HUGHES et al., 2006). Différents algorithmes ont été testés, mais le plus satisfaisant s'est révélé être le polynôme de degré 2, qui a donc été majoritairement utilisé. La pertinence de l'utilisation de cet algorithme est conforme à ce qui a pu être observé dans le cadre de travaux de recherche (HUGHES et al., 2006). Le graphique témoigne d'une erreur médiane réduite ainsi que une distance inter-quartile minimale par rapport à polynomial un ou trois.

Cette étape a parfois été complexe en raison de la qualité variable des photographies aériennes : angle de prise de vue non-zénithal, résolution faible, présence d'ombres ou de formes floues. Ces éléments ont pu limiter la précision du géoréférencement. Nous avons donc souhaité quantifier cette erreur. Une première approche consiste en l'utilisation du RMSE (racine carrée de l'erreur quadratique moyenne) qui est calculé directement par l'outil de QGIS au moment du placement des GCP. Celui-ci a été pris en compte au moment du géoréférencement mais les recherches de Hughes et al., témoignent de l'importance d'avoir recours à d'autres méthodes d'évaluation des erreurs complémentaires (HUGHES et al., 2006).

Pour estimer l'erreur induite, dix points de repère ont été définis le long du linéaire, sur la base de l'orthophotographie de 2022 (flux WMS). Ces repères, sont tous visibles pour la période 1942-2022 et ont été choisis principalement parmi les points dits « durs » (HUGHES et al., 2006) afin de ne pas cumuler les erreurs de placement de points en plus des erreurs de déformation inhérentes au géoréférencement. Pour chaque point, les coordonnées longitudinales et latitudinales de chaque année ont été relevées. Un calcul de somme quadratique des écarts (erreurs quadratiques moyennes) a été effectué afin de quantifier les incertitudes. On obtient des erreurs médianes inférieures à 5m sauf pour l'année 1969 qui s'en rapproche. Ces erreurs sont estimées comme acceptables eu égard

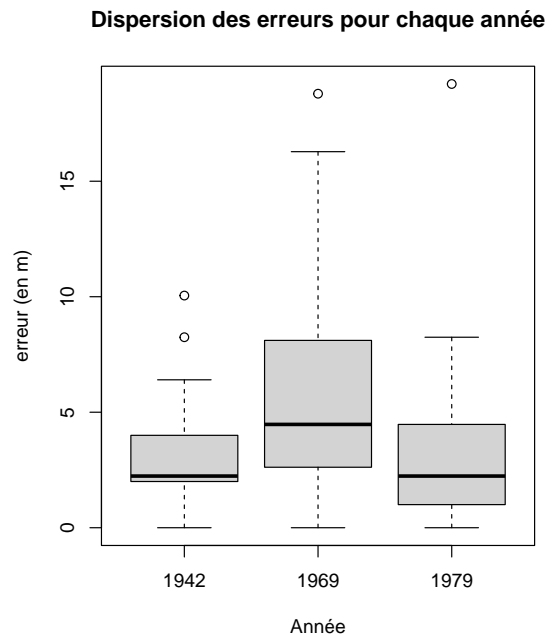


FIGURE 4.2 – Erreur de géoréférencement

à la littérature scientifique qui recense des erreurs médianes similaires de l'ordre de plus ou moins 5m (HUGHES et al., 2006). Cependant, les auteurs précisent que malgré des erreurs médianes acceptables, localement les erreurs peuvent être bien plus importantes. Ici, nous retrouvons ce cas avec des *outliers* qui témoignent d'erreurs proches de 20m. Ces erreurs ne sont pas anecdotiques à une échelle locale si on souhaite par la suite digitaliser les bandes actives et les comparer d'une année sur l'autre, comme c'est notre cas dans ce travail.

Digitalisation de la bande active, calcul des aires et largeurs

Une fois l'ensemble des années géoréférencées, la digitalisation de la bande active a pu être réalisée dans un système d'information géographique (SIG). Tout d'abord, il convient de définir ce qu'est la bande active pour déterminer quelles zones sont à inclure ou exclure. Dans sa thèse, M. Chapuis (CHAPUIS, 2012) propose la définition suivante :

La bande active est ici définie comme la portion du lit nu ou comprenant une strate arbustive ou arborée sur moins de 50 % de la surface de la forme géomorphologique. Nous nous basons ici sur un critère de végétation qui détermine la stabilité (ou le caractère "en cours de stabilisation") de la forme géomorphologique.

La bande active désigne ainsi les surfaces susceptibles d'être remobilisées par le cours d'eau. Les zones densément végétalisées, notamment les îlots fluviaux végétalisés, en sont exclus, tandis que les îlots "nus" sont inclus. À ce titre, la bande active se distingue de la bande fluviale, car cette dernière intègre les îlots végétalisés (CHAPUIS, 2012).

La première étape du traitement consiste à digitaliser les rives gauche et droite sous forme de polygones, ainsi que les îlots fluviaux végétalisés. Ces éléments sont ensuite utilisés pour générer un polygone représentant la surface de la bande active, en excluant les zones végétalisées. Cette opération est répétée pour chaque année.

La fusion des polygones de toutes les années permet d'identifier les emprises maximales de la rive gauche et de la rive droite, toutes années confondues. À partir de ce polygone global, une centerline (ligne représentant le centre du cours d'eau) a été générée à l'aide de l'algorithme de Voronoï (outil polygone de Voronoï de QGIS). Des points ont ensuite été calculés tous les 250 mètres le long de cette ligne afin de créer des transects correspondants à chaque point (fig. 4.3). Le choix d'un intervalle de 250 mètres s'appuie sur la littérature scientifique existante, où cette distance est fréquemment utilisée pour ce type de travaux (ROLLET, 2007 ; CHAPUIS, 2012 ; BOUTAULT, 2020). Ces transects ont ensuite permis de découper les polygones de la bande active pour chaque année en tronçons de 250 mètres. Pour chaque tronçon, la surface a été calculée à l'aide de la calculatrice de champs intégrée à QGIS. La largeur moyenne de chaque tronçon a ensuite été déterminée à l'aide de la formule suivante : $l = \frac{A}{L}$ où l correspond à la largeur, A à l'aire et enfin L à la longueur soit 250 mètres (à l'exception du dernier tronçon qui mesure 38 mètres).

Il convient de noter que la digitalisation de la bande active est fortement soumise à l'effet observateur (CHAPUIS, 2012). Cela s'explique notamment par la présence de végétation arborée et arbustives, qui peut masquer partiellement les berges, ainsi que par la qualité variable des photographies aériennes, en particulier lorsqu'elles sont en noir et blanc : les niveaux de gris ne sont pas toujours assez contrastés et provoquent une limite floue entre les surfaces agricoles et le lit du cours d'eau. Ces problèmes génèrent des erreurs dans le calcul des surfaces, ainsi que des décalages artificiels de la position du cours d'eau lorsque l'on compare la bande active d'une année sur l'autre.

Enfin, une analyse de détection de ruptures a été conduite afin d'identifier des segments homogènes présentant des changements significatifs de tendance le long du linéaire. Cette analyse a été réalisée à l'aide de l'algorithme *changepoint*, disponible dans le logiciel R, qui permet de détecter des points de changement dans la moyenne et/ou la variance d'une série de données. Les ruptures ont été déterminées en analysant les écarts par rapport à la moyenne et à la variance sur l'ensemble du linéaire. En complément,

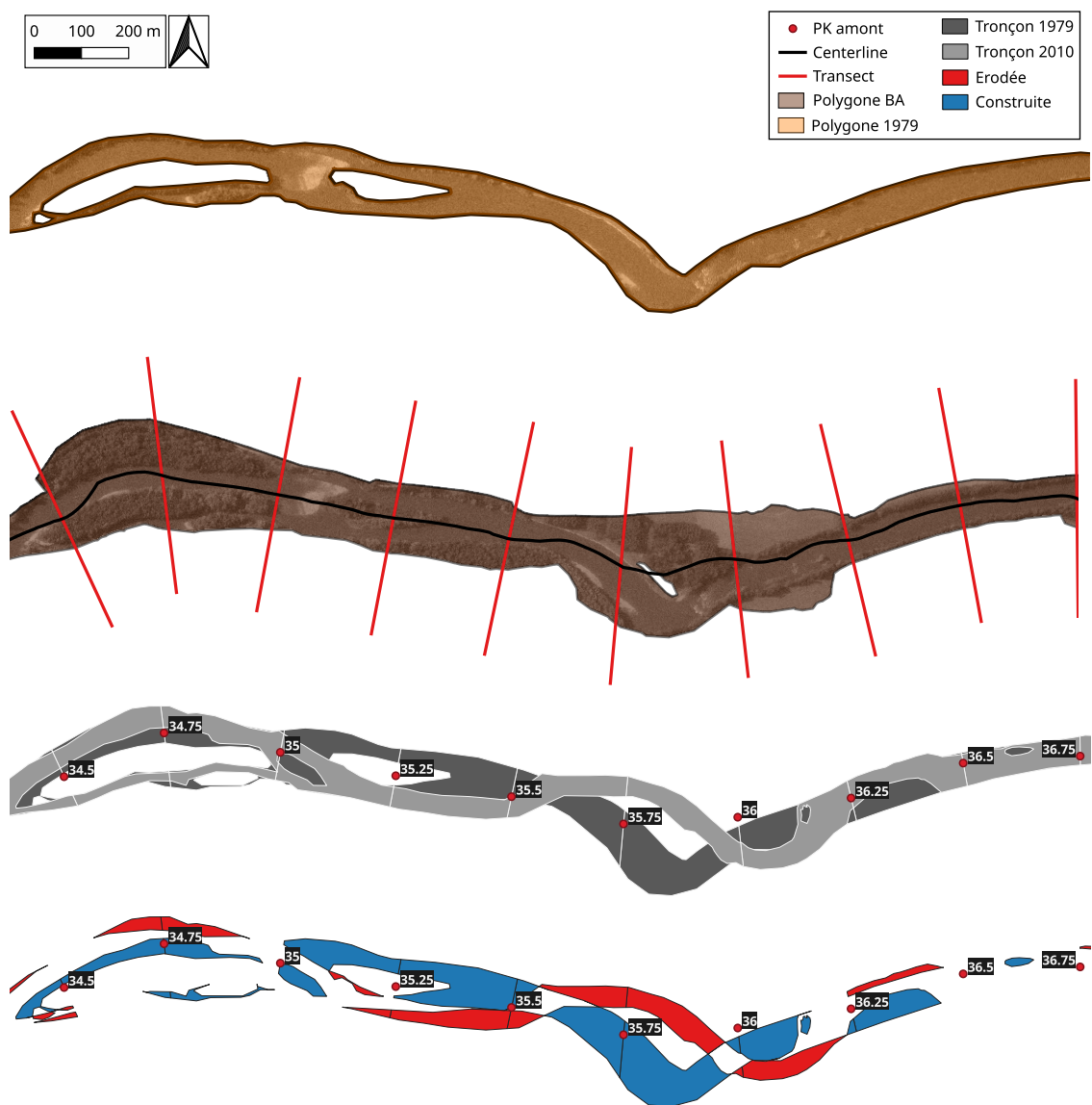


FIGURE 4.3 – Processus de digitalisation de la bande active

des tests de Wilcoxon ont été appliqués pour évaluer statistiquement la significativité des différences observées entre les segments identifiés.

Digitalisation des surfaces construites et érodées

La superposition des bandes actives de deux années consécutives permet de distinguer trois types de zones : une zone commune de bande active, les zones érodées et les zones construites.

Il convient ici de bien définir ces différentes zones. Les surfaces érodées correspondent à des zones anciennement végétalisées qui sont devenues partie intégrante de la bande active (ROLLET, 2007). Les surfaces construites désignent, à l'inverse, des zones précédemment intégrées à la bande active, mais qui ont été colonisées par la végétation (équivalent de "végétalisées" dans la thèse de A.J. Rollet (ROLLET, 2007)).

Le traitement informatique permettant de générer ces différentes zones a été réalisé sous QGIS. Les polygones de bande active ont été obtenus à partir de la digitalisation des bandes pour deux dates successives. Ensuite, une soustraction entre les polygones des deux années a permis d'identifier chaque zone spécifique à chaque date, ces dernières correspondant respectivement aux zones érodées et aux zones construites.

Cependant, des erreurs de géoréférencement et de digitalisation ont généré de nombreux polygones éronés qui ne traduisent pas de réels processus d'érosion ou de construction. Il a donc été nécessaire de filtrer ces polygones afin de ne conserver que les plus pertinents. Un premier tri a été effectué de manière automatique. En nous basant sur la littérature scientifique (ROLLET, 2007) et l'évaluation de nos marges d'erreur, nous avons considéré qu'un déplacement de la bande active inférieur à 5 mètres n'était pas significatif. Par conséquent, tous les polygones présentant une largeur inférieure à cette valeur ont été exclus de l'analyse.

Pour ce faire, chaque polygone a été enfermé dans un rectangle minimal, permettant d'estimer une longueur approximative. Une largeur approximée a ensuite été calculée à l'aide de la calculatrice de champs de QGIS, selon la formule suivante : $l = \frac{A}{L}$ où l est la largeur approximée, A l'aire du polygone et L la longueur aproximée du rectangle. Les entités dont la largeur calculée était inférieure à 5 mètres ont ainsi été filtrées et supprimées de l'analyse. Cependant, après ce premier filtrage automatique et l'observation des polygones restants, certains se sont révélés encore non significatifs, correspondant principalement à des artefacts liés aux erreurs de digitalisation ou de géoréférencement. Comme vu précédemment, 5 mètres est une erreur moyenne mais localement des décalages bien plus importants sont à noter. Par ailleurs, certaines zones identifiées comme « érodées » ne résultent pas d'une dynamique naturelle, mais sont directement liées aux activités anthropiques, notamment les extractions en lit mineur. Ces dernières peuvent

élargir artificiellement la bande active et ce, de manière significative. Afin de mieux qualifier les différents types de polygones, une typologie a été établie lors du tri manuel avec une évaluation visuelle de chaque polygone :

- e0** : surfaces érodées valides résultant de dynamiques naturelles
- e1** : surfaces érodées valides imputables à des activités anthropiques (extractions, aménagements)
- e2** : surfaces érodées non valides (Erreurs de géoréférencement et de digitalisation)
- c0** : surfaces construites valides
- c1** : surfaces construites non valides (Erreurs de géoréférencement et de digitalisation)

Il n'a pas été jugé pertinent d'ajouter une classe de surfaces construites liées à des activités anthropiques, dans la mesure où la revégétalisation observée n'est pas issue de plantations mais bien d'un processus naturel. Toutefois, il faut noter que certaines phases de recolonisation végétale interviennent suite à l'abandon d'anciennes zones d'extraction. Cette dynamique peut donc, être liée à des activités humaines indirectement. Chaque polygone s'est ainsi vu attribuer un type parmi ceux définis ci-dessus. Les polygones classés comme non valides (e2 et c1) ont ensuite été exclus des analyses ultérieures. Il est important de souligner que cette typologie présente des biais : certains polygones peuvent couvrir à la fois des zones valides et non valides. L'utilisation des orthophotographies en flux WMS réduisent significativement les erreurs comme en témoigne le peu de polygones non valides pour les années qui disposent de ces sources (2).

4.1.3 Évolution du profil en long

Reconstitution des profils en long

La reconstitution des profils en long permet de comparer un profil ancien à un profil actuel, afin d'identifier les tendances à l'incision ou à l'exhaussement du lit du cours d'eau.

Le profil ancien utilisé provient des relevés effectués en 1925 par le service du Nivellement Général de la France (NGF) pour le compte des Grandes Forces Hydrauliques (GFH). Ce profil s'étend de la confluence avec le Salat jusqu'au pont SNCF de Montréjeau, situé légèrement à l'aval de la confluence avec la Neste. Ces données ont été récupérées via le site Géodésie de l'IGN (plus disponible actuellement).

Chaque point de mesure relevé comporte à la fois un point kilométrique² (PK) et une altitude (z). Cependant, les PK de ce profil ne sont pas directement comparables

2. distance à la confluence Neste

à ceux de la centerline générée auparavant. En effet, les PK des GFH ont été calculés depuis l’aval vers l’amont, alors que ceux de la centerline le sont dans le sens opposé (de la confluence avec la Neste vers celle avec le Salat). Par ailleurs, le linéaire mesuré par le service NGF est de 45,9 km, contre 47,8 km pour la centerline. Cette différence de longueur du tronçon induit nécessairement des erreurs lors de la comparaison des profils en long, car les points kilométriques (PK) ne peuvent pas être directement alignés. Il est donc indispensable de recalculer les PK du profil ancien, afin de répartir l’écart de manière homogène sur l’ensemble du linéaire.

Pour reprojeter les anciens points de mesure sur la centerline actuelle, il a fallu identifier des points de repère communs sur les deux profils. Le profil des GFH mentionne plusieurs lieux remarquables (moulins, usines, captages, ponts, etc.), dont certains ont pu être retrouvés à l’aide des photographies aériennes de 1953 (flux WMS), de la carte IGN de 1950 (flux WMS), ainsi que du cadastre napoléonien et du cadastre revisité (1, s. d.). Cet exercice s’est avéré complexe, car nombre de ces repères ont disparu ou ont changé de nom au fil du temps (moulin, usine etc.). De plus, il existe un manque de données entre la période couverte par le cadastre napoléonien dans la première moitié du XIX^e siècle et 1942, année de la première campagne de photographie aérienne sur la zone. Néanmoins, il a été possible de retrouver 24 points de repères. Une fois les repères identifiés et les PK de la centerline appliqué à cela, les autres points de mesures ont été interpolés par régression linéaire pour obtenir des PK comparables à ceux de la centerline.

Les altitudes actuelles ont été obtenues à partir des dalles LiDAR HD, téléchargées sur le site des géoservices de l’IGN. Le nuage de points classifié a été traité sous QGIS, en ne conservant que les points correspondant à l’eau. Ces dalles ont ensuite été fusionnées en un unique nuage de points. Pour chaque point de mesure, le point LiDAR le plus proche de la centerline (ou le plus cohérent) a été sélectionné afin de récupérer l’attribut altimétrique z . Cette méthode permet de superposer les deux profils en long (1925 et actuel) et de calculer le delta d’altitude entre les deux périodes, révélant ainsi les processus d’incision ou d’exhaussement.

Calcul du volume d’incision

Le delta ainsi obtenu permet de calculer un volume incisé entre 1925 (date du relevé GFH) à la date du relevé LiDAR. La bande active de l’année 2010 a été retenue pour ce calcul car elle correspond à la période où la bande active était la plus réduite parmi les années étudiées. Ce choix permet ainsi d’estimer un volume minimum d’incision.

Les valeurs de delta z ont été interpolées à 1 mètre, afin d’obtenir des valeurs pour chaque point kilométrique. Par ailleurs, les largeurs de bande active issues de l’analyse

planimétrique ont été associées aux PK correspondant au centre de chaque polygone, puis interpolées elles aussi à 1 mètre, là aussi, afin d'obtenir une valeur approximative de la largeur de bande active à chaque point kilométrique.

Cela permet de calculer un volume incisé selon la formule suivante :

$$V = L * l * H$$

où :

V volume incisé

L longueur du tronçon (1m)

l largeur interpolée

H delta z interpolé

4.2 Approche expérimentale

Cette seconde approche, complémentaire, permet de préciser nos connaissances sur le transport sédimentaire, en vue de mieux calibrer les futures actions potentielles de gestion (*e.g.*, recharge sédimentaire) mais également de documenter l'impact des activités anthropiques sur le transport sédimentaire. Alors que l'approche historique reposait sur le traitement de données déjà collectées (4.1), cette nouvelle étape du diagnostic requiert l'acquisition directe de données sur le terrain, suivie de leur traitement. Ces deux étapes seront détaillées dans cette partie, qui se divise en deux types d'analyse : d'une part, l'analyse granulométrique et d'autre part, le traçage sédimentaire à l'aide de puces à radiofréquence (RFID).

4.2.1 Granulométrie

L'étude de la distribution longitudinale de la taille des sédiments constituant le lit d'un cours d'eau permet de refléter les variations passées du régime hydro-sédimentaire et informe sur les potentielles discontinuités du transport sédimentaire (*e.g.*, mise en place d'un pavage en lien avec un déficit sédimentaire, changement de la capacité de transport).

Prélèvement et caractérisation de la taille des sédiments sur le terrain

Sur le linéaire de la Garonne hydroélectrique, 11 barres sédimentaires ont été échantillonnées afin d'établir un patron longitudinal de la taille des sédiments. Les mesures

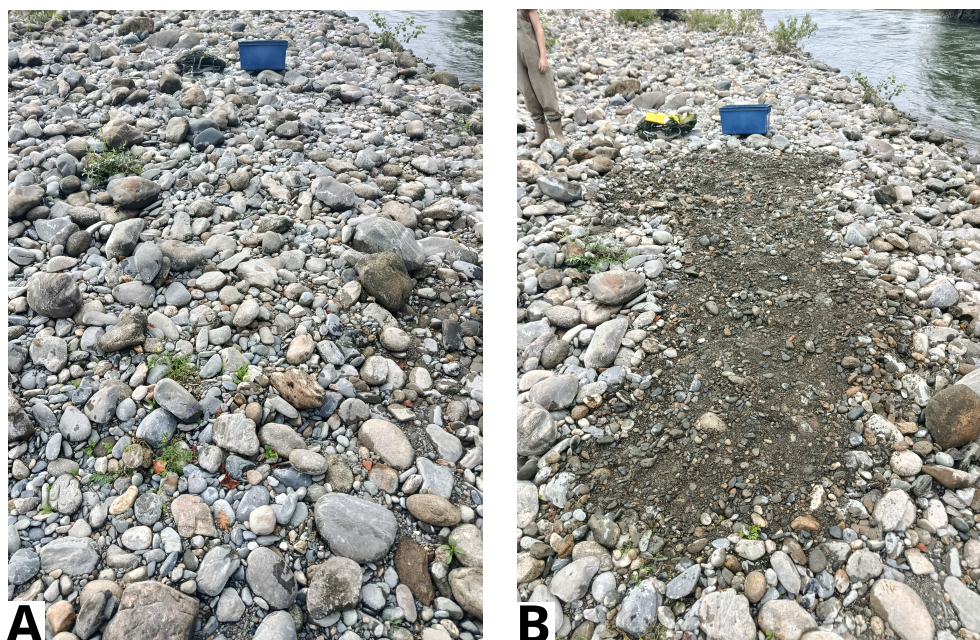


FIGURE 4.4 – Zone échantillonnage granulométrique. A- Couche de surface B- couche de subsurface

ont été effectuées en tête de banc afin de refléter au mieux la capacité de transport du cours d'eau et d'évaluer la granulométrie de la charge grossière en transit.

Sur chacune de ces barres, entre 100 et 161 particules de la couche de surface ont été prélevées entre le 19/08/2025 et le 22/08/2025, selon le protocole établi par Wolman (GORDON WOLMAN, 1954) et reprécisé par Rice & Church (RICE et CHURCH, 1998) et Bunte & Abt (BUNTE et ABT, 2001). Ces particules ont ensuite été mesurées grâce à un gabarit granulométrique de terrain, et distribuées selon les classes suivantes : <4 mm, 4-8 mm, 8-11 mm, 11-16 mm, 16-22 mm, 22-32 mm, 32-45 mm, 45-64 mm, 64-90 mm, 90-128 mm, 128-180 mm, 180-256 mm, 256-360 mm, 360-512 mm et > 512 mm (BUNTE et ABT, 2001). Après cette première évaluation de la granulométrie de la couche de surface, cette couche a été retirée de la zone d'échantillonnage, et un nouveau prélèvement a été effectué sur la couche de subsurface (entre 100 et 124 particules selon les sites; BUFFINGTON, 1996; fig. 4.4).

Calcul des diamètres caractéristiques et estimation de l'indice de pavage

Le traitement informatique des données acquises sur le terrain permet d'obtenir deux jeux de variables reflétant le régime hydro-sédimentaire du cours d'eau.

D'un côté, les percentiles de la distribution ont pu être calculés. Ils sont présentés

dans les sections suivantes selon la forme DXX, où XX correspond à la valeur du percentile, et sont exprimés en millimètres (*e.g.*, D50 correspond au 50^{me} percentile de la distribution, correspondant donc au diamètre médian).

Dans un second temps, l'indice de pavage est calculé, comme le ratio entre le D50 de la couche de surface et le D50 de la couche de subsurface. Cet indice permet de localiser les déficits sédimentaires et d'estimer leur sévérité. Dans la littérature, il est classiquement mentionné qu'un indice de pavage inférieur à 2 est typique d'une couche d'armure fréquemment mobilisée, et que lorsque l'indice de pavage dépasse la valeur de 3, la couche de surface ne sera remobilisée par les crues les plus importantes uniquement. C'est donc au-delà de cette valeur qu'un déficit peut être caractérisé.

4.2.2 Estimation du transport solide avec traçage RFID

Principe du traçage sédimentaire par puces radiofréquences (RFID)

Afin de quantifier le transport sédimentaire, il est possible de recourir à des traceurs. Les traceurs sont des galets marqués, que l'on peut retrouver ultérieurement à l'aide de différents dispositifs, comme l'application de peinture ou l'intégration de puces radiofréquence (RFID) (HASSAN et ROY, 2016; BRENNAN et al., 2019; CASSEL et al., 2020; STÄHLY et al., 2020; BOUTAULT, 2020; BULTEAU, 2023). La distance parcourue par ces galets permet de documenter les modalités de déplacement des sédiments et, par extrapolation, d'inférer le comportement de la couche de surface. Cependant, les traceurs déposés uniquement en surface ne suffisent pas à décrire le comportement de l'ensemble de la couche active. En effet, ce protocole s'appuie sur l'hypothèse d'une homogénéité du déplacement dans toute la couche, ce qui a été réfuté (VÁZQUEZ-TARRÍO et al., 2019). Pour remédier à cette limite, les traceurs peuvent être insérés à différentes profondeurs, ce qui permet d'introduire une troisième dimension dans l'étude du transport sédimentaire (BOUTAULT, 2020; BULTEAU, 2023).

Dans le cadre de cette étude, un suivi basé sur des puces RFID a été retenu. Cette technique repose sur deux dispositifs, d'une part une puce RFID et d'autre part le lecteur de puces RFID avec une antenne pour les détecter. Les puces sont en capacité de transmettre un numéro d'identifiant dès lors qu'elles sont dans le rayon de transmission de l'antenne du lecteur (environ 1m). Ces puces sont insérées dans la roche puis injectées dans le cours d'eau. Le principe consiste à relever précisément la position de chaque traceur au moment de son injection, puis de rechercher sa nouvelle position à l'issue de la période d'observation. La distance entre ces deux positions représente le déplacement effectif de la particule. L'injection des traceurs est réalisée en amont de la période de hautes eaux, tandis que leur détection est effectuée à l'étiage. Ce choix repose sur le fait

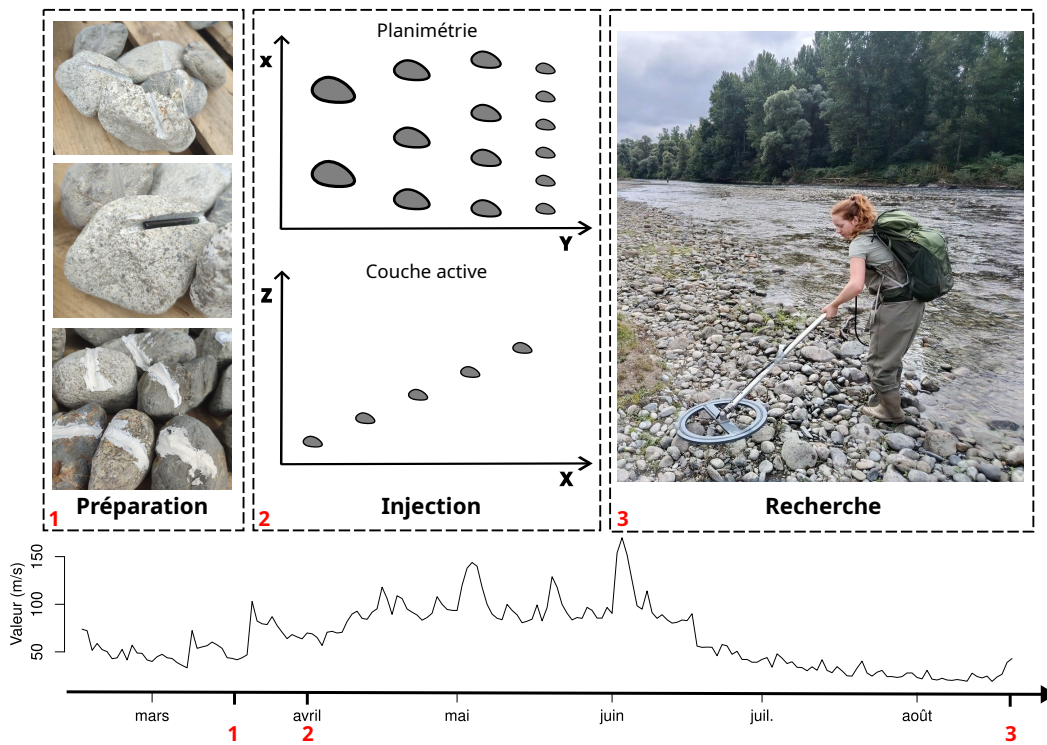


FIGURE 4.5 – Protocole du traçage avec puces RFID

que la mobilité des particules est principalement induite par les débits de hautes-eaux, moments où l'énergie du cours d'eau est suffisante pour déplacer la charge de fond.

Acquisition des données

Une première étape a consisté en la préparation des galets à injecter (fig. 4.5). Les matériaux ont été collectés le 19 mars 2025 au niveau du village de Oô. Ils proviennent d'un curage suite à la crue de la Neste d'Oô en septembre 2024. Avant la collecte, un plan de prélèvement a été établi afin de garantir un équilibre entre les différentes classes granulométriques. Les classes les plus faibles ont volontairement été surreprésentées, afin de compenser leur taux de retour généralement faible. La taille des particules a été déterminée à l'aide d'un gabarit granulométrique.

373 galets ont ensuite été équipés. Une entaille a été réalisée dans chacun d'eux pour y insérer une puce RFID, laquelle a été scellée à l'aide de silicone. Une fois les galets équipés, une base de données a été créée : chaque galet a été identifié en l'approchant de l'antenne RFID, ce qui a permis de récupérer son identifiant et de la consigner dans la base de données.

Une fois la phase de préparation achevée, les galets ont été injectés dans une zone prédéfinie, sélectionnée selon des critères tant scientifiques (présence de confluences, bancs alluviaux, seuils, barrages, etc.) que techniques (accessibilité du site, sécurité, etc.). L'injection a été réalisée le 2 avril 2025. Les galets ont été disposés selon un plan en transects, en fonction de leur classe de taille. Les sédiments les plus fins ont été positionnés à l'aval de la zone d'injection, tandis que les galets les plus grossiers ont été placés à l'amont. Cette disposition vise à éviter la superposition des galets, dans la mesure où les galets les plus petits sont plus facilement remobilisés. En cas de superposition, les puces peuvent interférer entre elles, rendant leur détection plus difficile. Pour la couche active, ce sont 42 galets qui ont été enfouis à des profondeurs variables, allant de 5 cm à 30 cm. Contrairement au protocole habituellement suivi, les galets insérés dans la couche active n'ont pas été disposés en colonne (BOUTAULT, 2020), mais répartis individuellement le long du transect à différentes profondeurs. Cette méthode alternative a été privilégiée car elle ne nécessite pas l'utilisation de puces actives, une solution plus coûteuse. Chaque galet inséré dans la couche active a fait l'objet d'une géolocalisation précise, tandis que, pour les galets déposés en surface, seule l'extrémité du transect a été géolocalisée.

Enfin, à l'issue de la première période d'observation, la recherche peut-être menée. Sur le terrain, une trace GPS continue est enregistrée tout au long de la recherche des traceurs. Cette trace permet, d'une part, de vérifier sur le terrain que la prospection est rigoureuse, et d'autre part, lors du traitement des données. C'est en effet à partir de cette trace, désagrégée en un fichier de point présentant une mesure par seconde, que la position des traceurs est définie. Finalement, au niveau méthodologique, cette trace permet d'évaluer la proportion de la bande active ayant été prospectée.

Traitement des données

Une fois la position XYZ des traceurs définies grâce à la trace GPS, leur position au sein du continuum amont-aval est estimée en leur affectant un PK. Cette étape est réalisée par une simple jointure spatiale, en projetant les points correspondant aux traceurs sur la ligne centrale du cours d'eau, désagrégée en points équidistants d'un mètre.

Deux métriques sont ensuite calculées pour évaluer la qualité de la prospection et la robustesse du jeu de données acquises. Les taux de retour sont définis par le nombre de traceurs retrouvés divisé par le nombre de traceurs injectés. La proportion de la bande active prospectée est calculée en définissant une zone tampon autour de la trace de prospection et en rapportant la superficie de cette zone tampon à celle de la bande active. La distance utilisée pour l'estimation de la zone tampon est de 5 m,

correspondant à la réalité sur le terrain du balayage du fond du lit avec l'antenne.

Le calcul des volumes charriés prend en compte les modalités du transport solide. En effet, on distingue deux grands modes du transport par charriage, fonction de l'intensité et de la durée de la crue. Lors de crues d'intensité faible, le transport s'effectue de manière particulière (ou transport partiel) : le débit seuil de rupture de la couche d'armurage n'étant pas atteint, la mobilité se cantonne aux particules les plus petites de la couche de surface. Au contraire, lorsque le débit seuil de rupture de l'armure est dépassé, tous les grains de la couche de surface sont mobilisés et la mobilité s'exerce sur une certaine profondeur, appelée couche active. Afin de bien différencier ces deux modes de transport, deux formules sont utilisées, toutes deux estimant un volume charrié total comme la somme du volume charrié de chaque classe granulométrique. Ces deux formules ont été dérivées de l'approche du transport solide par 'vélocité virtuelle', initialement proposée par Wilcock (WILCOCK, 1997) et plus récemment réemployée par Mao et al. (MAO et al., 2017), Brenna et al. (BRENNA et al., 2020), et Bulteau et al. (BULTEAU et al., 2024).

$$V_{\text{partiel}} = \sum_{\text{fraction}_i}^{\text{fraction}_n} (P_{i_{\text{SURF}}} \cdot M_i \cdot L_i \cdot W_a \cdot D_i) \quad (4.1)$$

Où :

- i : correspond à la classe granulométrique (en mm)
- V_{partiel} : au volume charrié partiel (m^3)
- $P_{i_{\text{SURF}}}$: à la portion de la surface
- M_i : au débit massique de transport (en kg/m^2).
- L_i : à la distance moyenne parcourue (en m)
- W_a : à la largeur du chenal actif (en m)
- D_i : à la taille moyenne des paricules de i (en m)

$$V_{\text{total}} = \sum_{\text{fraction}_i}^{\text{fraction}_n} (P_{i_{\text{L}}} \cdot L_i \cdot W_a \cdot D_s) \quad (4.2)$$

Où :

- i : correspond à la classe granulométrique (en mm)
- V_{total} : au volume charrié total (m^3)
- $P_{i_{\text{L}}}$: à la portion volumique
- L_i : à la distance moyenne parcourue (en m)
- W_a : à la largeur du chenal actif (en m)
- D_s : à l'épaisseur de la couche active

4.3 Mise en pratique de l’approche hypothético-déductive : choix des tronçons impacts et contrôles

Suite à la formulation des hypothèses (3.3), une sélection des tronçons a été effectuée afin de tester leur validé (table 4.2). Deux types de tronçons ont été distingués : des tronçons impacts, soumis à une pression spécifique, servant à tester les hypothèses formulées ; un tronçon de référence (ou tronçon contrôle), exempt des pressions étudiées, utilisé comme base comparative. La sélection des tronçons a été soumise à plusieurs contraintes, notamment la densité et le cumul des pressions. De manière générale, le cours d’eau présente un niveau d’anthropisation élevé, rendant difficile le choix de tronçons soumis à une seule pression à la fois.

Dans la mesure du possible, les tronçons impactés ont été choisis de manière à isoler chaque facteur de pression. Ainsi, chacun d’eux est soumis à un unique type de pression, afin de faciliter l’établissement de relations causales lors de l’interprétation des résultats. Pour assurer une comparabilité entre tronçons, une longueur standardisée de 2km a été retenue. Lorsque cela était possible, deux tronçons impactés ont été sélectionnés pour chaque hypothèse, dans le but de réduire le risque de biais liés à des effets locaux et de renforcer la robustesse des comparaisons. Cela a été possible pour l’hypothèse 2 et le contrôle, mais pas pour la première hypothèse.

TABLE 4.2 – Tronçons impacts et contrôles

Hypothèse	Impact (PK en Km)	Contrôle (PK en Km)
H1	29.5-31.5	18-20 & 43-45
H2	10-12 & 25.5-27.5	

Ces analyses ont permis d’obtenir de nombreux résultats, dont les principaux seront présentés dans la section suivante.

Partie 5

Résultat

Cette section a pour objectif de présenter les principaux résultats relatifs à l'évolution planimétrique du cours d'eau (largeur et hauteur), à la caractérisation du sédimentaire, ainsi qu'aux observations spécifiques relevées dans les tronçons impacts et contrôles.

5.1 Approche historique

Cette partie vise à documenter l'évolution morphologique du cours d'eau. Les principales caractéristiques morphologiques qui seront documentées sont la largeur de la bande active (W) -et, par conséquent, sa superficie- ainsi que la hauteur du cours d'eau¹.

5.1.1 Évolution planimétrique

1. Comme précisé dans la partie méthodologie (4.1.3), nous ne pouvons pas connaître directement l'altitude du fond du lit, mais uniquement celle de la surface de l'eau en période d'étiage.

TABLE 5.1 – Résultat analyse planimétrique. S av. correspond à la surface au début de la période, tandis que S ap., à la surface à l'issue de la période. La différence de surface entre les deux dates est exprimée en valeur absolue (Δ), par année (Δ/an) et également en pourcentage ($\Delta(\%)$). La p-value résulte du test de wilcoxon (S- significatif, NS- non-significatif). Se1 correspond à la surface érodée valide (anthropiques et naturelles) et Sc1 à la surface construite valide. Le ratio entre les deux rend compte de la tendance majoritaire sur la période (<1 construction ; >1 érosion).

Période	Tronçon(PK)	S av.(ha)	S ap.(ha)	Δ (ha)	$\Delta(\%)$	Δ/an (ha)	p-value	Se1(ha)	Sc1(ha)	Se1/Sc1(ha)
Période 1	1942-1953	306.05	276.79	-29.26	-9.5%	-1.09	0 / NS	NA	NA	NA
	1953-1969	276.79	255.25	-21.54	-8.4	-1.66	0 / NS	NA	NA	NA
	1942-1969	306.05	255.25	-50.8	-20	-1.88	0 / NS	25.49	66.29	0.38
	1969-1979	255.25	287.65	32.4	12.7	3.24	0 / NS	38.55	11.99	3.21
Période 2	1979-2002	287.65	249.47	-38.18	-13.27	-1.66	0 / NS	NA	NA	NA
	2002-2010	249.47	244.98	-4.49	-1.8	-0.56	0.85 / S	NA	NA	NA
	1979-2010	287.65	244.98	-42.67	-14.83	-1.38	0 / NS	23.70	63.30	0.37
	2010-2013	244.98	305.09	60.11	24.54	20.04	0 / NS	55.64	0.2	278.2
Période 3	2013-2019	305.09	270.6	-34.49	-11.3	-5.74	0 / NS	6.93	32.43	0.21
	2019-2022	270.6	280.84	10.24	3.78	3.41	0.48 / S	16.23	4.43	3.66
	2013-2022	305.09	280.84	-24.25	-7.95	-2.69	0 / NS	23.16	36.86	0.63

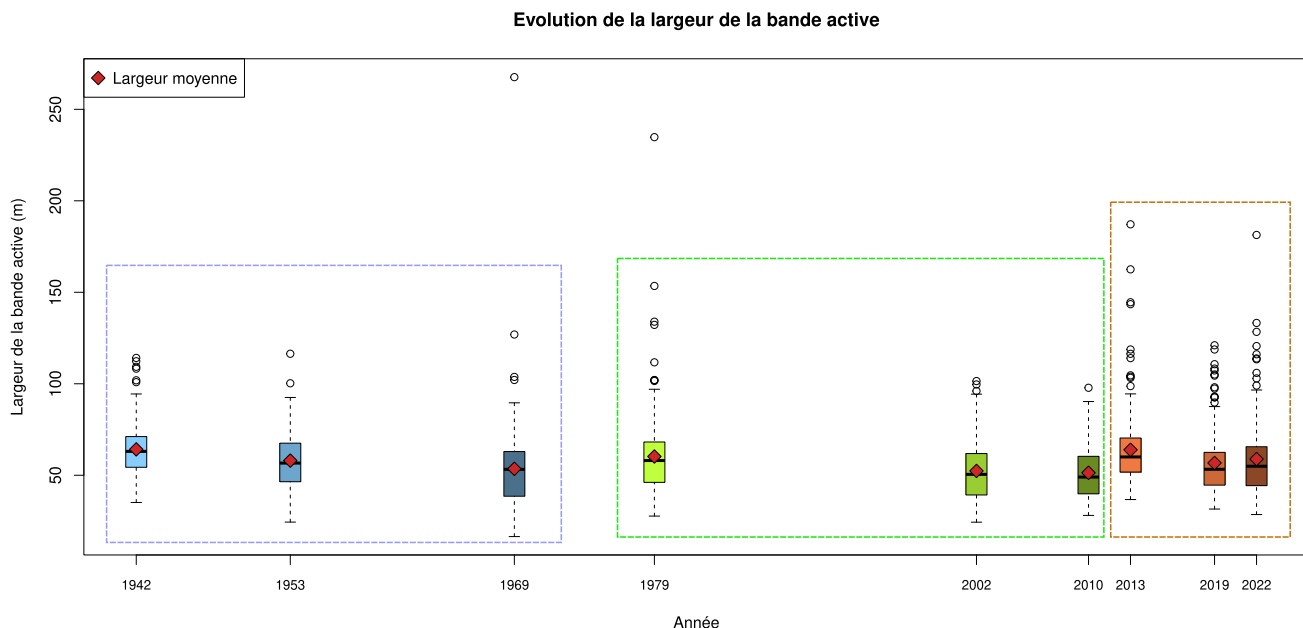


FIGURE 5.1 – Évolution de la largeur de la bande active

En observant l'évolution de la largeur du cours d'eau, on distingue trois grandes phases, séparées par des ruptures nettes. Chaque phase semble suivre un schéma similaire : une rétraction progressive de la bande active, suivie d'une rupture correspondant à un élargissement significatif de cette bande, avec ou sans stabilisation ultérieure de la largeur (fig. 5.1).

- De 1942 à 1969 : Cette première phase se caractérise par une diminution progressive de la surface de la bande active (-1.88 ha/an). Les variations de largeur entre chaque année sont statistiquement significatives (table 5.1). Par ailleurs, sur l'ensemble de la période 1942-1969, la surface construite est supérieure à la surface érodée (fig. 5.3), ce qui explique la rétraction de la bande active accompagnée d'une colonisation par la ripisylve.
- De 1969 à 1979 : Cette décennie marque une rupture avec la phase précédente, caractérisée par un élargissement de la bande active de 32.4 ha. Cette dynamique s'explique par une érosion prédominante sur cette période (valeur $Se1/Sc1$ largement supérieur à 1 table 5.1) .
- De 1979 à 2010 : Cette nouvelle phase est marquée par une reprise de la rétraction de la bande active (-1.38 ha/an), avec notamment la formation accrue de surfaces construites. Les largeurs mesurées en 1979 et 2002 sont significativement différentes, ce qui traduit une évolution notable. En revanche, aucune différence significative n'est observée entre les années 2002 et 2010 avec une p-value de

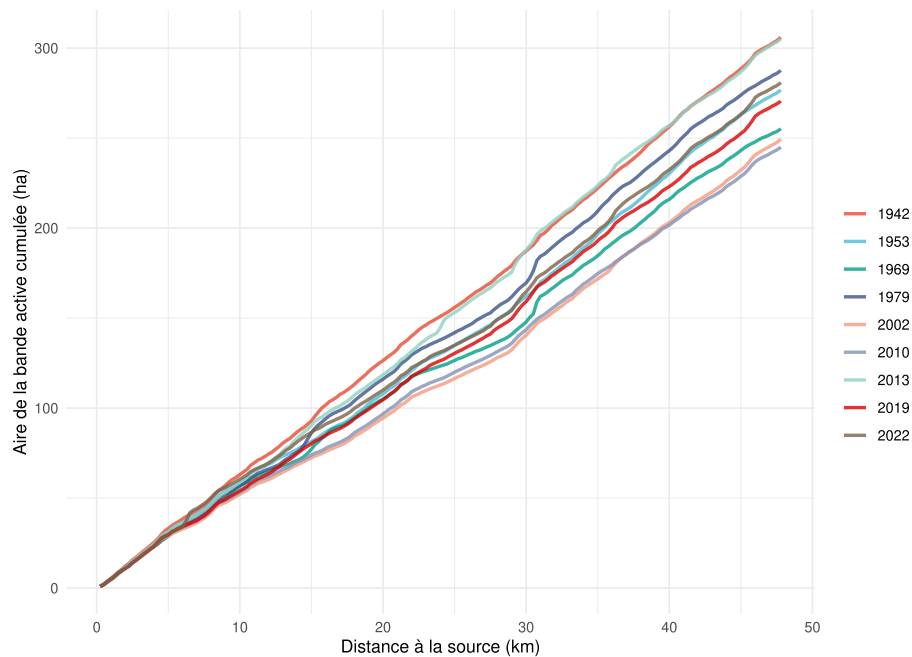


FIGURE 5.2 – Évolution de la surface cumulée de la bande active

0.85, ce qui suggère une stabilisation de la largeur vers la fin de cette phase. D'ailleurs on note un taux de rétraction annuelle (-0.56 ha/an) très inférieur à la première phase (-1.66 ha/an).

- De 2010 à 2013 : Cette courte période constitue une deuxième rupture, succédant à la phase de stabilisation précédente. Elle présente une dynamique d'érosion largement dominante (ratio érosion/construction de 278.2), entraînant une augmentation notable de la largeur de la bande active, estimée à 60,11 hectares.
- De 2013 à 2022 : Il s'agit de la troisième phase de rétraction de la bande active, avec une diminution progressive suivie d'une stabilisation, à l'image de la phase précédente. En effet, les largeurs mesurées en 2019 et 2022 ne présentent pas de différence significative (p-value de 0.48). Il est toutefois à noter que, pour la période 2013-2019, la formation de surfaces construites est supérieure à l'érosion, alors que c'est l'inverse qui s'observe sur la période 2019-2022 (table 5.1).

Ces résultats permettent de mettre en évidence des dynamiques globales à l'échelle du tronçon. Cependant, la présence de valeurs aberrantes (fig. 5.1) ainsi que les ruptures observées sur le graphique des surfaces cumulées de bande active (fig. 5.2) témoignent de l'hétérogénéité du linéaire. Il est donc nécessaire de cibler les tronçons qui connaissent une trajectoire différente afin de mieux comprendre leur dynamique spécifique.

Pour cela, une analyse des points de rupture a été menée, permettant de mettre en

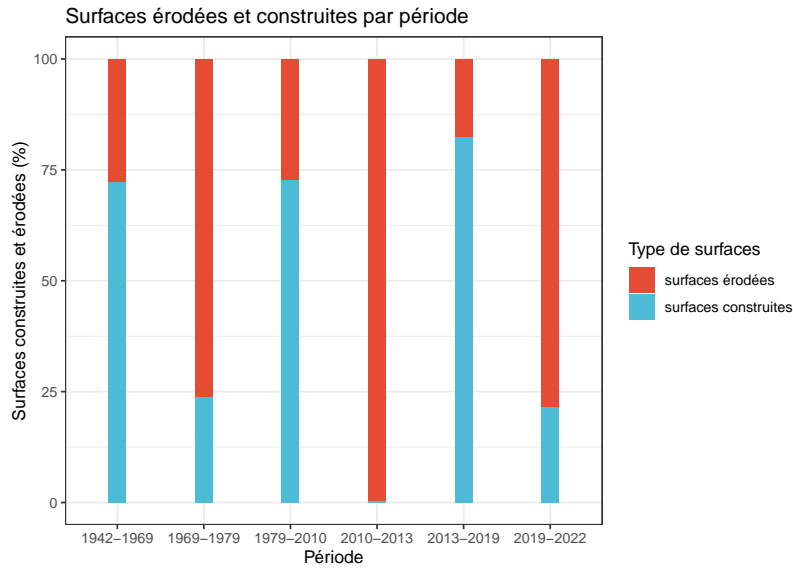


FIGURE 5.3 – Evolution des surfaces érodées et construites par période

évidence des tronçons homogènes présentant une évolution spécifique (fig. 5.4). Il en ressort notamment des tronçons plus étroits, bien visibles en 1956, 2002 et 2010. Par ailleurs, certains tronçons connaissent un élargissement significatif dans les années 1960 et 1970.

Conclusion sur l'évolution planimétrique A l'échelle du linéaire, on distingue trois périodes caractérisées par une rétraction, suivie d'une rupture, puis d'un élargissement significatif. Certaines de ces périodes se terminent par une stabilisation de la largeur de la bande active, ce qui peut indiquer l'atteinte d'un nouvel équilibre. Par ailleurs, certains tronçons semblent connaître une évolution spécifique et locale. Plusieurs tronçons sont affectés par une rétraction, ce qui pourrait refléter une faible remobilisation des berges et des îlots, en lien avec une hydrologie réduite, favorisant ainsi la colonisation de ces espaces par la végétation. Enfin, les points de rupture détectés varient au fil du temps, témoignant d'une certaine mobilité latérale du cours d'eau. Après avoir analysé l'évolution latérale du cours d'eau, notre attention se portera désormais sur son évolution verticale.

5.1.2 Évolution du profil en long

Dans cette section, nous chercherons à mettre en évidence les dynamiques d'incision ou d'exhaussement du lit. Contrairement à l'analyse de la bande active, pour laquelle

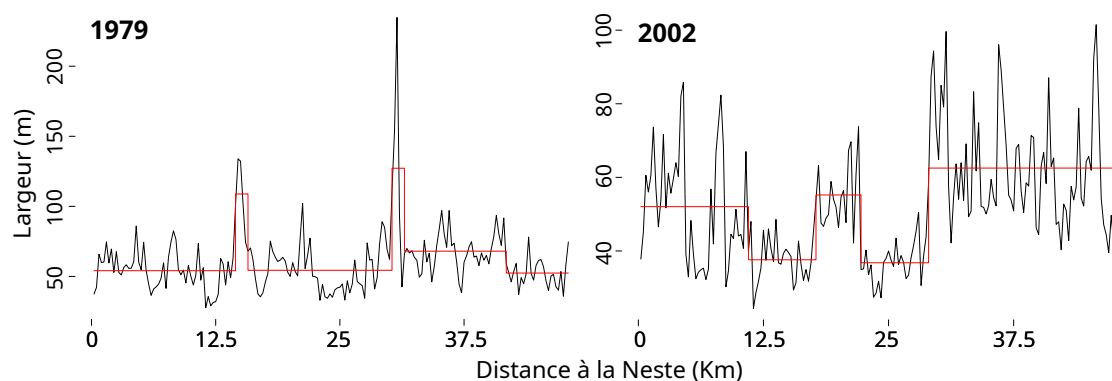


FIGURE 5.4 – Résultat de l’analyse des points de ruptures (*change point*) pour l’année 1979 et 2002

une approche diachronique a pu être mise en œuvre, l’évolution du profil en long a pu être étudiée seulement pour deux périodes, en raison d’un manque de données.

La comparaison des deux profils en long (fig. 5.5) permet d’observer une tendance à l’incision (table 5.2). Cependant, cette dernière n’est pas du tout homogène sur toute la zone et des grands secteurs d’incision se dessine, à commencer par un secteur situé entre les PK 4.3 et 6.8, ainsi qu’un autre entre 8.4 et 12.5, avec une remontée vers 10.3. Un secteur particulièrement incisé se situe entre 12.5 et 17.4, avec une différence maximale de -5.1 m autour du PK 15.4. Les autres secteurs du linéaire montrent des incisions plus modérées, notamment entre 22 et 24, 30 et 32, et enfin entre 37 et 39.5.

TABLE 5.2 – Delta des profils en long GFH et actuel

Minimum	1er quart.	Médiane	Moyenne	3e quart.	Maximum
-5.1m	-1.5m	-0.6m	-0.79	-0.05	2

Par ailleurs, les résultats du travail mené sur les zones d’incision et d’exhaussement permettent également de proposer une quantification globale du déficit sédimentaire (5.6). En prenant comme référence la largeur de la bande active en 2010, l’estimation obtenue indique un déficit de l’ordre de 2 000 000 m³.

Conclusion sur l’évolution verticale On observe une incision généralisée, comme en témoigne un delta moyen négatif. Cependant, cette tendance n’affecte pas le linéaire de manière homogène, et plusieurs secteurs apparaissent significativement impactés. Cette dynamique d’incision est particulièrement marquée dans la partie amont. Cette

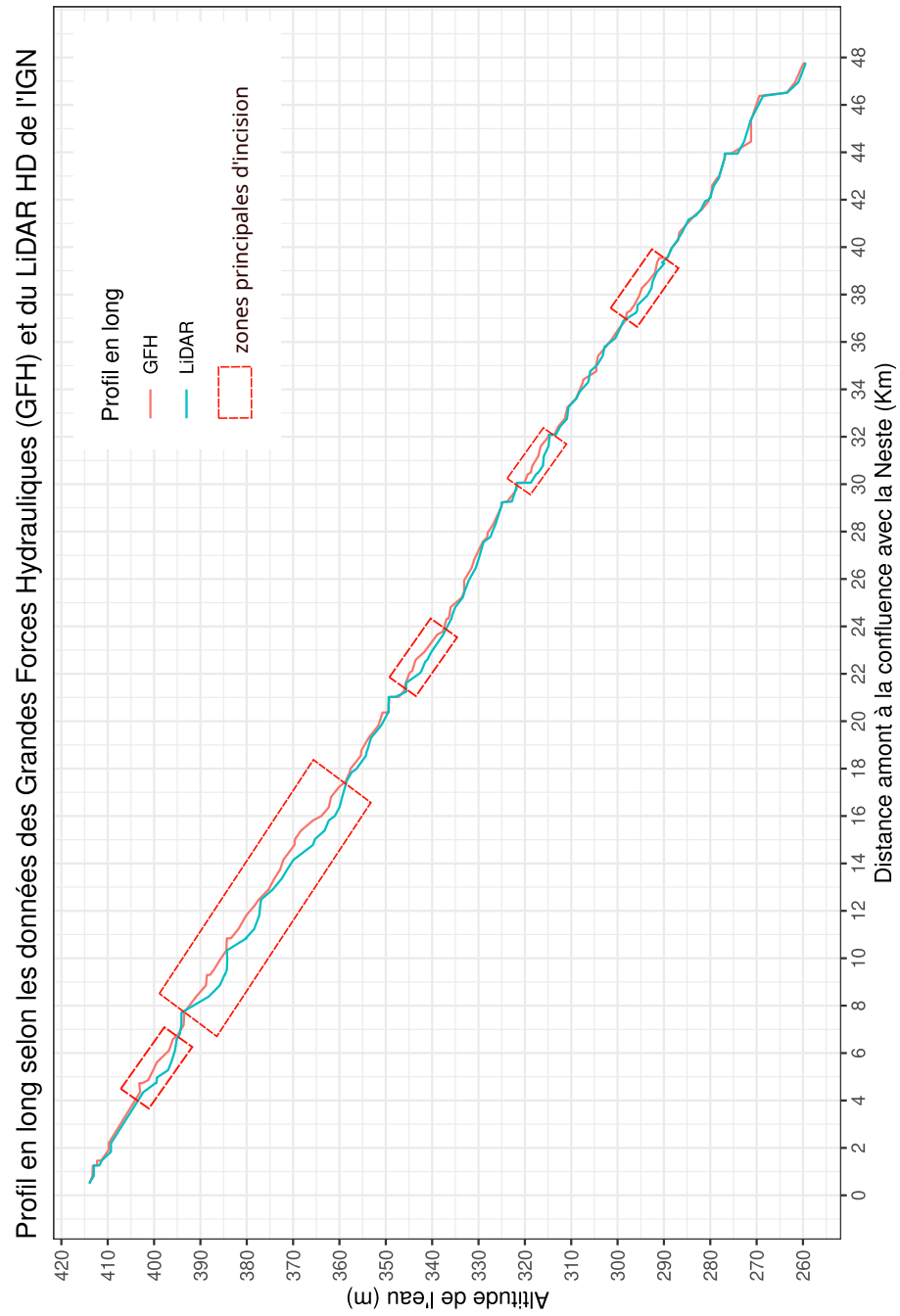


FIGURE 5.5 – Évolution du profil en long de 1925 à nos jours

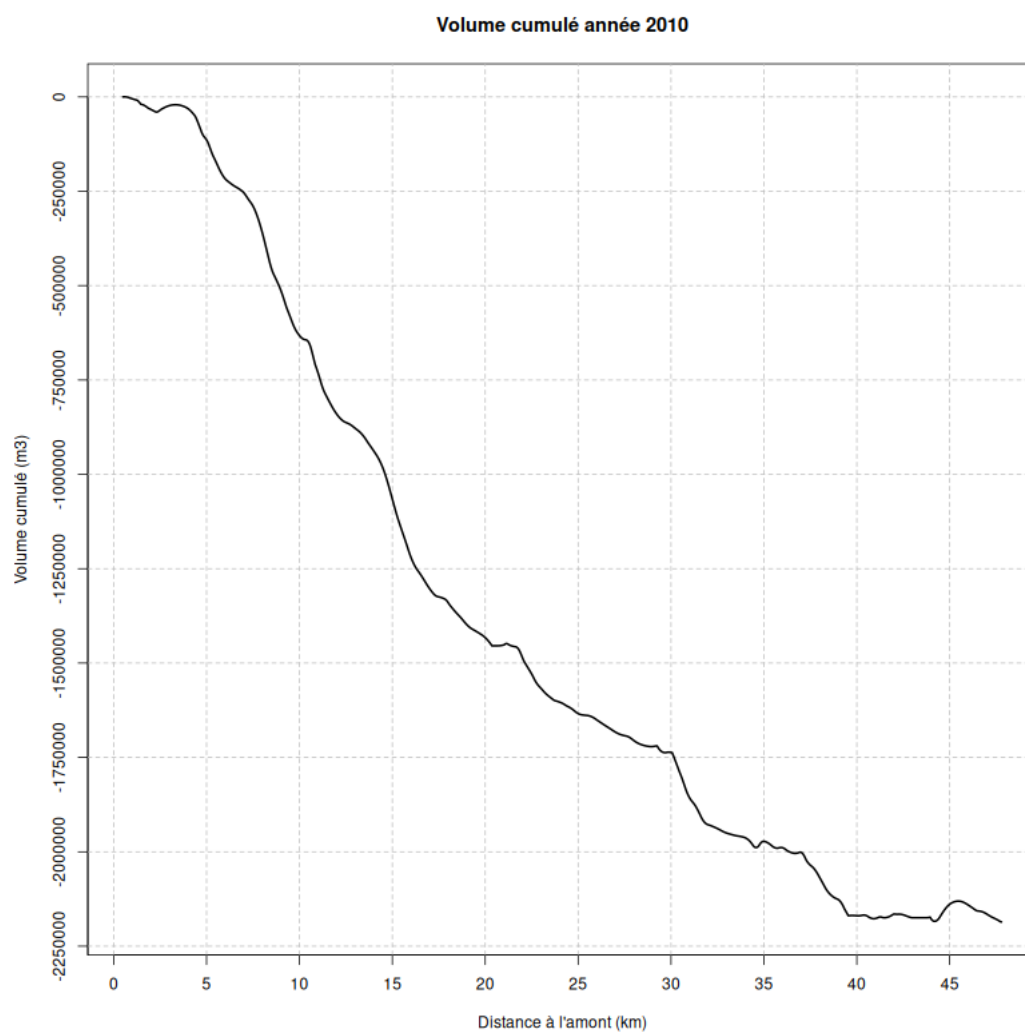


FIGURE 5.6 – Estimation du déficit sédimentaire

incision traduit la présence d'un déficit sédimentaire avec une capacité de transport supérieur aux matériaux disponibles.

Conclusion sur l'évolution morphologique Ces résultats permettent de documenter l'évolution morphologique du cours d'eau, mettant ainsi en évidence des déséquilibres dans les apports sédimentaires et liquides. Cependant, afin de mieux évaluer la nature de ces déséquilibres et leurs conséquences sur la mobilité des sédiments, il convient de s'interroger sur la dynamique hydro-sédimentaire actuelle, à travers les résultats issus de l'approche expérimentale.

5.2 Approche expérimentale

L'approche expérimentale vise à mieux évaluer les dysfonctionnements observés dans la dynamique hydro-sédimentaire, notamment liés à un déséquilibre entre les flux liquides et sédimentaires. À ce titre, l'analyse granulométrique permet d'identifier un éventuel affinement ou grossissement des particules, en lien avec la continuité sédimentaire propre à chaque classe de taille. Par ailleurs, le calcul de l'indice de pavage fournit des informations sur le degré de pavage du lit, pouvant traduire des apports liquides excédant la disponibilité en matériaux grossiers. Quant au traçage sédimentaire, il vise à documenter les débits de mise en mouvement pour chaque classe granulométrique. L'évaluation des distances parcourues ainsi que la profondeur de mobilisation de la couche active permet alors d'estimer les volumes de sédiments charriés.

5.2.1 Analyse granulométrie

Le patron longitudinal de la taille des sédiments est fortement hétérogène sur le linéaire de la Garonne hydroélectrique. Trois tendances peuvent être distinguées (fig. 5.7).

Entre la confluence avec la Neste (PK0 ; GAV1) et le TCC du barrage d'Ausson (PK5 ; GAV2), la granulométrie et l'indice de pavage augmente largement : le D50 passe de 43 mm pour à 109 mm, et l'IP passe de 2.3 à 3.8 pour GAV1 et GAV2, respectivement. Ce secteur semble ainsi marqué par le déficit sédimentaire, potentiellement imputables (1) au blocage de la charge de fond par le barrage d'Ausson, (2) à la réduction des apports en provenance de la Neste et/ou de la Garonne, ou encore (3) à la période de faible hydraulité que la Garonne expérimente depuis Janvier 2022.

Le secteur compris entre le barrage d'Ausson et la confluence avec le Ger (PK31 ; GAV7) est quant à lui caractérisé par un fort affinement granulométrique (i.e. le D50 passe de 109 mm à GAV2 à 45 mm à GAV7) ainsi que par une réduction graduelle de

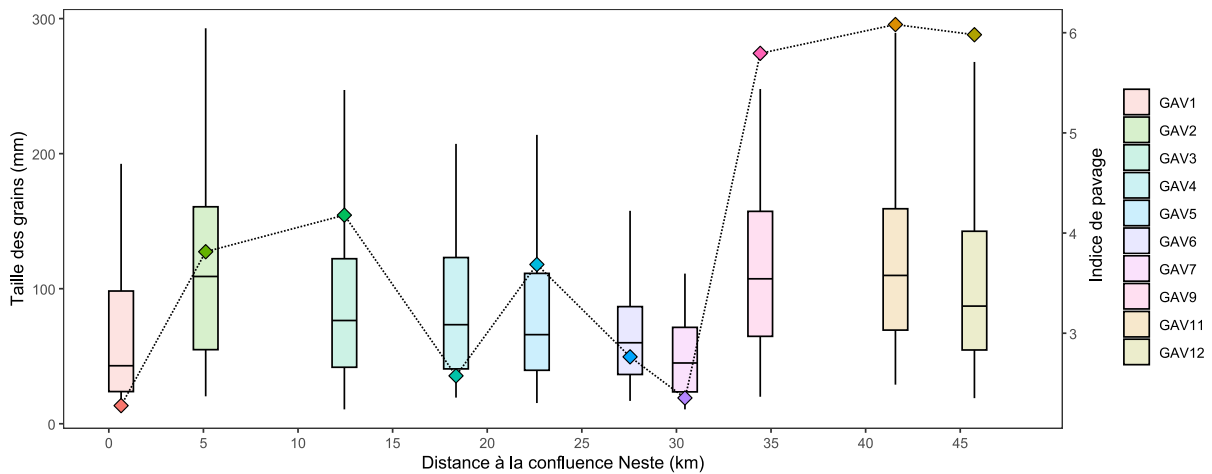


FIGURE 5.7 – Distribution de la taille des grains pour chaque zone d'échantillonnage avec indice de pavage

l'indice de pavage (*i.e.*, l'IP passe de 3.8 à GAV1 à 2.4 à GAV7). Contrairement au tronçon plus en amont, ce secteur semble donc moins durement affecté par le déficit sédimentaire. Bien que les valeurs d'IP soient élevées, elles avoisinent ou minorent la valeur seuil de 3, indiquant que le substrat est encore aisément remobilisable par des crues d'intensité faible à moyenne.

Finalement, le secteur compris entre le Pont de Montespan (PK32) et la confluence avec le Salat (PK48) semble affecté par un déficit sédimentaire très important. Les trois sites de prélèvement situés dans ce secteur (GAV9 à GAV 12) présentent tous les trois des diamètres caractéristiques élevés (D50 compris entre 87 et 110 mm, D84 compris entre 171 et 182 mm), ainsi que des valeurs d'IP supérieures à 5.5, témoignant de ce déficit.

Conclusion sur l'analyse granulométrique Il apparaît que le linéaire est fortement soumis au phénomène de pavage, traduisant un déficit sédimentaire généralisé, conformément aux observations formulées dans les études antérieures. Cependant, cette tendance n'est, une fois encore, pas homogène. Il conviendra donc de s'interroger sur les causes de cette hétérogénéité (6).

5.2.2 Anayse par traçage sédimentaire

Si l'évolution des processus a pu être documentée dans le temps et l'espace à travers les autres analyses, le traçage sédimentaire, quant à lui, n'a pu être réalisé qu'en un seul

point. Néanmoins, les résultats obtenus peuvent permettre de définir les seuils de mise en mouvements des particules par classe de taille, ainsi que de proposer une première estimation des volumes de sédiments charriés pour un débit donné.

Qualité de la prospection

Depuis l'injection jusqu'au traceur le plus en aval, le linéaire du chenal actif est de 455 m. La superficie du chenal actif est de 27 887 m², et celle de la zone prospectée est de 17 332 m². La proportion prospectée du chenal actif est de 62%.

Avec 372 traceurs injectés et 224 traceurs retrouvés, le taux de retour global de la prospection, toutes classes de tailles confondues, est de 60%. Compte tenu de la taille du cours d'eau, ce taux de retour peut être qualifié de correct. Il semble également cohérent avec la proportion du chenal actif prospectée (62 %). Les taux de retour sur les classes de taille les plus petites sont plus faibles, passant de 100% pour les 128-180 mm à 21 % pour les 11-22 mm (table 5.3). Ce résultat est classique, et les résultats peuvent être considérés comme robustes.

TABLE 5.3 – Résultat des prospections RFID. La taille désigne la borne inférieure de la classe granulométrique, la distance correspond à la distance parcourue entre l'injection et la détection, Nbr injecté correspond au nombre de galets injectés, Nbr retrouvé au nombre retrouvé, et Nbr mobilisé au nombre de galets mobilisés.

Taille	Distance (m)	Nbr injecté	Nbr trouvé	Nbr mobilisé	Taux retour	Taux mobilité
11	104	48	10	8	0.21	0.8
22	105.08	101	50	42	0.49	0.84
32	35.21	58	33	20	0.57	0.61
45	31.72	50	32	13	0.64	0.41
64	29.68	40	34	11	0.85	0.32
90	7.14	29	21	1	0.72	0.05
128	5.8	10	10	0	1	0

Caractéristiques du transport solide

Le débit maximum atteint lors de la période de suivi est de 170 m³/s à la station de Valentine (03/06/2025, 3, s. d.), ce qui correspond à une crue de faible intensité, inférieure à la crue annuelle. Le transport s'est effectué de manière particulière, avec les classes de tailles les plus petites se déplaçant significativement plus loin que les plus grosses (fig. 5.8). La mobilité s'est réellement cantonnée aux particules dont l'axe b est inférieur à 90 mm. En effet, la proportion des particules

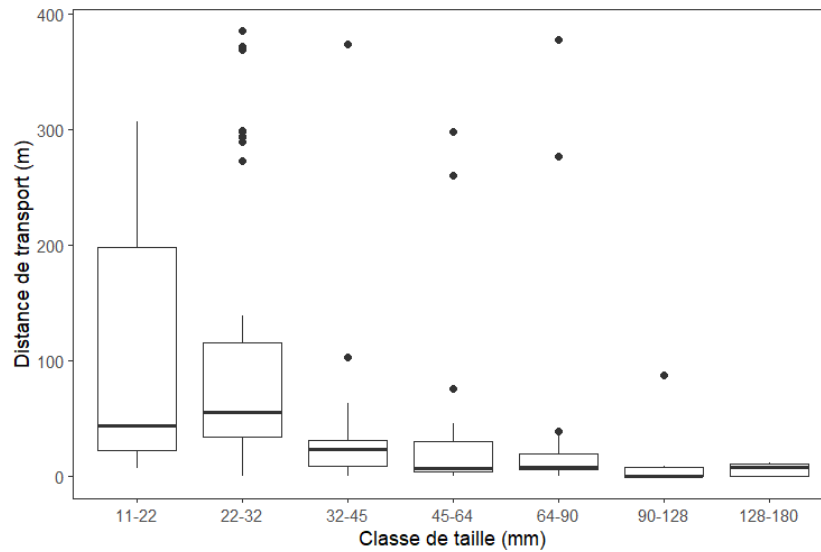


FIGURE 5.8 – Distribution de la distance de déplacement des particules selon leur classe de taille

mobiles entre l’injection et la recherche est comprise entre 32% et 84% pour les particules de taille inférieure, et chute à 5% pour les particules plus grossières (fig. 5.8). Ce résultat permet déjà d’estimer que pour un débit de pointe avoisinant les 170 m³/s à la station de Valentine, les plus grosses particules mobilisables sont comprises dans la classe 64-90 mm.

Calcul des volumes charriés

Compte tenu de la nature particulière du transport lors de la période de suivi, la formule utilisée pour évaluer les volumes charriés est la formule (4.1). Le tableau (table 5.4) résume les valeurs des différents paramètres de la formule.

Conclusion sur le traçage sédimentaire Il apparaît que, même pour des débits inférieurs à celui de la crue annuelle, la mise en charge des particules de diamètre inférieur à 90 mm est possible. Bien que l’ensemble de la couche sédimentaire n’ait pas été remobilisé au cours de la période d’observation, ces dynamiques traduisent une mobilité encore active, impliquant un transport au moins partiel des matériaux.

Ces résultats ont permis d’apporter des éléments de réflexion quant à l’évolution morphologique du cours d’eau ainsi qu’à son fonctionnement hydro-sédimentaire actuel. Toutefois, il demeure délicat d’établir une relation de causalité directe entre chaque facteur anthropique et son impact spécifique, en raison du cumul de ces différentes

TABLE 5.4 – Résultat du calcul des volumes charriés (4.1)

Classe (mm)	Pi	Mi	Li(m)	Di(m)	Wa(m)	Vcharrié(m^3)
11-22	0.17	0.8	104	0.0165	61	14.2
22-32	0.14	0.84	105	0.027	61	20.3
32-45	0.14	0.61	35	0.0385	61	7
45-64	0.18	0.41	32	0.0454	61	7.9
64-90	0.22	0.32	30	0.077	61	9.9
90-128	0.08	0.05	7	0.109	61	0.2
128-180	0.02	0	6	0.154	61	0
TOTAL						59.6

influences. Dans la section suivante, nous chercherons à caractériser l'évolution de la bande active, du profil en long et de la granulométrie, tant dans les tronçons impacts que dans les tronçons contrôles, afin de mieux cerner la part relative de chaque facteur dans les dynamiques observées.

5.3 Résultats de l'approche hypothético-déductive

Dans cette dernière partie, consacrée à l'évolution morphologique du cours d'eau, nous tenterons de caractériser l'évolution de la bande active et du profil en long ainsi que la granulométrie (largeur W, altitude Z et granulométrie D) des tronçons contrôles et impacts, afin de répondre aux problématiques soulevées par les impacts cumulés.

Lorsqu'on observe le graphique de l'évolution de la largeur moyenne de chaque tronçon par rapport à la moyenne de l'ensemble du linéaire (fig. 5.9), trois groupes distincts apparaissent : un groupe présentant des valeurs supérieures, voire très supérieures, à la moyenne ; un groupe dont les valeurs fluctuent autour de la moyenne ; et enfin un groupe dont les valeurs sont majoritairement inférieures. Le premier et le dernier groupe correspondent aux tronçons impacts, tandis que les tronçons contrôles se situent dans le deuxième groupe. Des tests de Wilcoxon ont été réalisés afin de valider l'existence d'une différence statistiquement significative par rapport à la moyenne globale du linéaire. Les résultats vont dans le sens des observations : une p-value inférieure à 0,05 pour les tronçons impacts et supérieure au seuil de significativité pour les tronçons contrôles. Toutefois, bien que ce test soit intéressant, il ne nous indique ni le sens de la différence, ni sa nature (naturelle ou anthropique).

En ce qui concerne la hauteur (fig. 5.10), la valeur du delta entre les deux profils en long indique que les tronçons contrôles sont moins incisés que la moyenne du linéaire étudié. Les tronçons impacts connaissent une incision plus importante que la moyenne

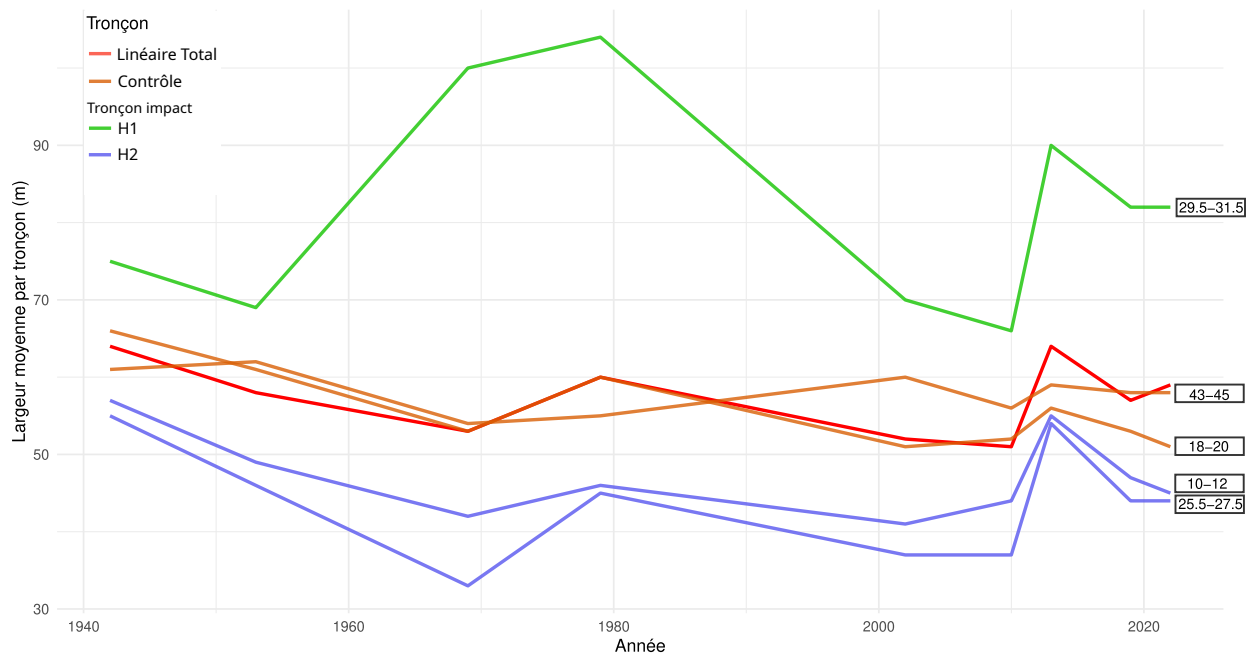


FIGURE 5.9 – Évolution de la largeur moyenne de la bande active du linéaire et de chaque tronçons

globale.

Chaque tronçon impacts et contrôles ont fait l'objet d'un échantillonnage (fig. 5.11). Les tronçons témoins correspondent aux échantillons GAV4 et GAV12. L'hypothèse H1 a été examinée à partir des tronçons GAV7. Enfin, l'hypothèse H2 a été testée sur la base des échantillons GAV3 et GAV6.

La section suivante présente de manière détaillée les résultats obtenus pour chacun des trois critères considérés, dans chaque tronçon impact et contrôle.

Tronçons contrôles

18-20 ² Ce tronçon présente peu de variations et suit relativement bien les fluctuations liées à l'hydrologie, avec un léger élargissement observé en 1979 et en 2013. La diminution progressive de la largeur de la bande active n'est pas incompatible avec des facteurs naturels, tels que la diminution de la fréquence et de la puissance des épisodes morphogènes. On observe également une incision modérée (-0,6 m), légèrement inférieure à la moyenne globale du linéaire (-0,7

2. Les numéros de tronçons indiquent la distance depuis l'amont pour le début et la fin de chaque tronçon (par exemple, 18-20 correspond à la portion située entre le 18e et le 20e kilomètre depuis l'amont).

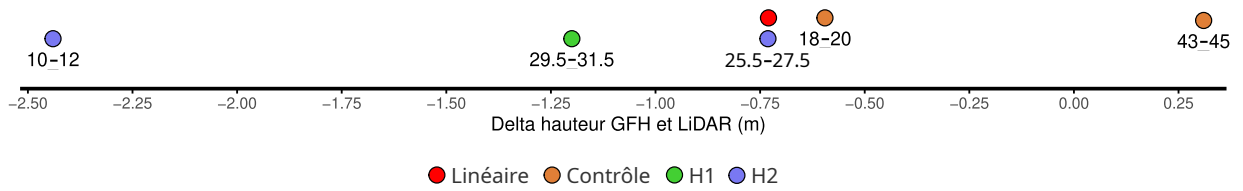


FIGURE 5.10 – Incision moyenne du linéaire et de chaque tronçons entre 1925 et aujourd’hui

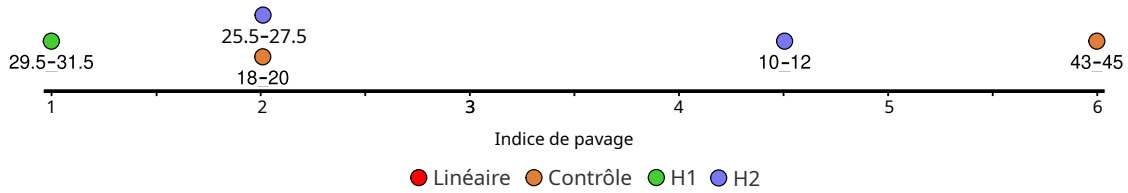


FIGURE 5.11 – Indice de pavage des tronçons impacts et contrôles

m), avec un écart de seulement 0,1 m. Cette valeur témoigne d’une évolution cohérente avec le comportement général du cours d’eau. Enfin, on observe un indice de pavage faible.

43-45 Ce second tronçon témoin présente également peu de variations en largeur de bande active. La dynamique observée est relativement stable et suit les tendances hydrologiques générales. En ce qui concerne le profil en long, ce tronçon montre un léger exhaussement (+0,31 m), possiblement lié à des erreurs de mesure ou de recalage altimétrique. Si la taille médiane des particules semble cohérente avec celle du premier tronçon contrôle (D50 dans la classe granulométrique 64–90 mm), l’indice de pavage, en revanche, s’en distingue nettement, avec une valeur élevée (IP = 6) indiquant un pavage très marqué. On notera néanmoins la présence d’un important ouvrage transversal aux alentours du PK 44, qui pourrait localement perturber le transit sédimentaire. Par ailleurs, une partie du cours d’eau est captée au profit du canal de Saint-Martory, ce qui peut également avoir une influence sur la dynamique sédimentaire et hydraulique.

H1

29.5–31.5 Ce tronçon se caractérise par un élargissement très marqué entre 1942 et 1969. Ensuite, la bande active se rétracte dès 1969 jusqu’en 2010. Un second élargissement est visible entre 2010 et 2013, bien qu’il soit nettement moins pro-

noncé que le premier. Concernant l’hypothèse qu’il illustre, nous nous intéressons à la dynamique entre 1942 et 2002. Ce tronçon a fait l’objet d’extractions en lit mineur de manière assez précoce : dès 1942 en rive gauche, puis à partir de 1953 en rive droite. Les extractions cessent en rive gauche en 1984. Ainsi, la période d’observation pertinente pour documenter l’impact de ces extractions se situe entre 1956 et 2002, en tenant compte du temps de réponse documenté pour ce type de perturbation (10^0 à 10^1 ans) (PETTS et AMOROS, 1996). Concernant la hauteur du cours d’eau, on observe une incision moyenne de -1,2 m. Cette valeur est relativement proche de la moyenne sur l’ensemble du linéaire (-0,7 m) mais reste tout de même notable. Dans ce secteur, la taille médiane des sédiments est relativement faible comparée à celle des tronçons témoins (seulement 45 mm contre 90 mm dans les tronçons témoins). L’indice de pavage proche de 1 traduit sûrement une erreur dans le choix du tronçon. En effet, un échantillonnage direct dans la zone d’extraction induit sûrement une granulométrie biaisée. On notera que, bien que la réponse morphologique en largeur semble clairement liée aux extractions, la lecture de ce tronçon reste complexe. Il est en effet affecté par un court-circuitage qui diminue les apports liquides, mais aussi par la confluence avec le Ger, qui renforce ces apports. La dynamique y est donc multifactorielle.

H2

10–12 Ce tronçon présente une variabilité faible, hormis un pic en 2013. Bien que les valeurs soient légèrement inférieures à la moyenne du linéaire, aucune évolution notable n’est observable sur la période considérée. Doit-on en conclure que le barrage n’a eu aucun impact ? La période d’observation débute en 1942, mais la retenue a été construite dans les années précédentes. Il est donc possible que le cours d’eau ait déjà atteint un nouvel équilibre morphologique. En l’absence de données antérieures à 1942, il est difficile de documenter précisément l’impact du barrage de Rodère. En revanche, l’incision observée est significative (-2,44 m), soit plus du double de l’incision moyenne sur le linéaire. Cette valeur témoigne d’un enfoncement réel du lit dans ce tronçon. Enfin, l’indice de pavage est supérieur à 3, ce qui traduit la présence d’un pavage, bien qu’il reste inférieur à celui observé dans l’un des tronçons témoins (GAV12). La taille médiane (D50) est, quant à elle, comparable à celle mesurée dans les tronçons contrôles.

25.5–27.5 Ce dernier tronçon est également plus étroit que la moyenne, avec des largeurs parfois très faibles (*e.g.*, 33 m en 1969). La tendance suit toutefois globalement celle du linéaire : rétraction, élargissement en 1979, puis rétraction à nouveau avant un pic en 2013. On remarque cependant une rétraction plus

marquée entre 1956 et 1969 que sur le reste du linéaire. Cette largeur plus faible pourrait évoquer un effet du court-circuitage, mais aucune preuve spécifique ne permet de l'affirmer clairement sur la période observée. En terme d'incision, celle-ci reste modérée (-0,7 m), comparable à la moyenne du linéaire. Quant à la granulométrie, le D50 est cette fois inférieur à celui observé dans les tronçons témoins, accompagné d'un indice de pavage faible, traduisant l'absence de pavage significatif.

Conclusion sur l'approche hypothético-déductive L'analyse des tronçons impacts et contrôles ne permet pas de tirer de manière univoque des conclusions sur l'ensemble des paramètres étudiés. Toutefois, certaines tendances émergent selon les types d'impacts. Concernant la largeur, une réduction semble caractériser les tronçons situés au niveau des secteurs court-circuités (H2b). À l'inverse, les secteurs ayant fait l'objet d'extractions apparaissent plutôt marqués par un élargissement du lit, en particulier durant les phases d'extraction, mais cette dynamique peut également se maintenir dans le temps, comme en témoigne le cas du secteur de la Hierle, qui reste aujourd'hui encore large et soumis à une remobilisation lors des crues (notamment celle de 2013). En ce qui concerne la hauteur, les tronçons contrôles présentent une faible incision. Le tronçon de l'hypothèse 1 connaît une incision. Les secteurs court-circuités, quant à eux, sont affectés par l'incision, parfois de manière significative. Enfin, du point de vue de la granulométrie, il reste difficile d'identifier des tendances nettes, les tronçons associés à une même hypothèse montrant des résultats peu cohérents, tant en ce qui concerne la taille médiane (D50) que l'indice de pavage.

L'ensemble des résultats produits grâce aux trois approches doit maintenant être discuté, afin de répondre aux questions soulevées en introduction de ce travail.

Partie 6

Discussion et perspectives

Dans cette partie, nous reviendrons sur les principales questions soulevées lors de l'élaboration du diagnostic. Dans un premier temps, nous aborderons la trajectoire d'évolution de la Garonne Moyenne. Par la suite, nous répondrons à la question de l'impact de l'anthropisation du cours d'eau, tout en s'interrogeant sur la pertinence d'une approche hypothético-déductive. Nous examinerons également la fonctionnalité actuelle du cours d'eau. Enfin, nous proposerons des pistes permettant de prolonger et/ou de compléter le diagnostic actuel.

6.1 Trajectoire d'évolution morphologique de la Garonne Moyenne

Grâce à l'approche historique, nous avons pu mettre en évidence une évolution morphologique de la Garonne Moyenne en trois phases, en fonction des pressions exercées sur le cours d'eau. Cette chronologie de l'évolution a été principalement établie à partir des données planimétriques, car la hauteur du lit et la granulométrie ne permettent pas une analyse diachronique comparable.

Phase 1 1930-1960 : Cette période est marquée par la construction de barrages au début des années 1930. On y observe une première phase de rétraction, possiblement liée à une diminution de l'hydrologie. En effet, seules deux crues sont recensées durant cette décennie, puis plus aucune jusqu'en 1977. Toutefois, une rétraction plus prononcée est déjà visible sur certains tronçons, notamment en aval de la retenue de Miramont. Ces rétractions témoignent d'une modification du régime hydrologique sur certains segments court-circuités, mais peuvent également indiquer qu'un processus d'incision était déjà en cours, entraînant cette dynamique de rétraction.

Phase 2 1969-2013 : Cette deuxième phase se caractérise par d'importantes extractions de matériaux entre les années 1950 et 1990, avec un pic d'activité dans les décennies 1960 et 1970. D'un point de vue morphologique, une nouvelle phase de rétraction est observée, succédant à un élargissement significatif induit par la crue de 1977. Sur les tronçons concernés par les extractions, un élargissement marqué mais artificiel est perceptible, tandis que les secteurs situés en aval des retenues demeurent étroits. À la fin de cette période, le cours d'eau semble atteindre un nouvel état d'équilibre, comme en témoigne la faible évolution de sa morphologie entre 2002 et 2010.

Phase 3 2013-aujourd'hui : La crue de 2013 a considérablement élargi la bande active. Par ailleurs, au minimum à partir de cette date, les ouvrages hydroélectriques pratiquent des transparences, de sorte que cette gestion ne devrait plus induire de perturbations majeures sur les flux liquides et solides. À la suite de cet événement, on observe une homogénéisation des tronçons : les secteurs auparavant étroits se réélargissent, et, de manière générale, la surface de la bande active augmente. Cet élargissement semble se maintenir dans le temps, traduisant un nouvel état d'équilibre, comme en témoigne la faible évolution morphologique entre 2019 et 2022, période durant laquelle la bande active reste plus ouverte qu'avant 2013. Cela reflète une hydrologie redevenue dynamique, notamment dans les tronçons court-circuités. Toutefois, l'héritage des extractions reste marqué. La présence de fosses témoigne d'un profil en long encore en cours d'ajustement.

De manière générale, sur l'ensemble de la période d'observation, on constate une incision progressive, une augmentation significative du déficit sédimentaire, ainsi que la mise en place d'un pavage marqué. Ces évolutions témoignent de dysfonctionnements persistants dans le transport sédimentaire.

6.2 Impacts de l'anthropisation sur le linéaire de la Garonne Moyenne

Après avoir présenté l'évolution morphologique du cours d'eau au fil du temps, il convient désormais d'examiner la contribution respective des processus naturels et des perturbations d'origine anthropique dans cette dynamique évolutive. De manière générale, l'impact de l'anthropisation sur l'évolution morphologique des cours d'eau se manifeste à travers des phénomènes de rétraction, d'incision et de pavage.

6.2.1 Impact des barrages mobiles et du court-circuitage

Les barrages mobiles semblent pouvoir induire des perturbations significatives sur le transport sédimentaire ainsi que sur les flux liquides. D'un point de vue morphologique, on observe une rétraction marquée au niveau des tronçons court-circuités (cf. analyse des ruptures et approche hypothético-déductive). Cette tendance à la rétraction semble imputable à une diminution de l'hydrologie, d'autant plus que ces effets ne sont plus observés en aval de la restitution du débit total. Par ailleurs, une incision est systématiquement constatée à l'aval des retenues, pouvant se propager sur plusieurs kilomètres, comme en témoignent les zones d'incision importantes observées en aval immédiat des barrages. Les tronçons impacts confirment cette tendance, avec des valeurs d'incision supérieures à la moyenne du linéaire. En ce qui concerne le pavage, la tendance est moins claire : l'un des tronçons impacts présente effectivement un pavage marqué, tandis que l'autre n'en montre pas. Néanmoins, le déficit sédimentaire observé en aval de certains ouvrages, notamment les barrages d'Ausson et de Rodère, suggère que ces infrastructures ont probablement contribué à la mise en place d'un pavage localisé. Cependant, la mise en œuvre de la transparence des ouvrages à partir de 2013 semble avoir permis le maintien des bénéfices liés à la crue de cette même année, en favorisant la réactivation des processus hydro-sédimentaires. Cette gestion paraît ainsi limiter, voire annuler, les impacts sur le transport solide et sur l'hydrologie en période de crue. Il convient néanmoins de souligner que l'hydrologie hors crue reste altérée, du fait du captage d'une partie des flux liquides au droit des retenues, dérivés vers les canaux.

6.2.2 Impact des extractions en lit mineur

Les extractions en lit mineur constituent principalement un héritage, étant donné l'arrêt de cette activité dans les années 1990. Cependant, l'approche historique permet de documenter les impacts passés de ces activités sur le cours d'eau, ainsi que leurs conséquences actuelles. Durant la période d'exploitation, ces extractions se sont surtout accompagnées d'un élargissement localisé au droit des gravières, comme en témoignent l'analyse des ruptures et surtout celle du tronçon impact. Ces zones tendent à se rétracter suite à la fin de l'exploitation. Cependant, le tronçon impact montre que le cours d'eau peut rester plus large que la moyenne du linéaire malgré cette rétraction, tout en présentant une érosion très efficace lors des crues (*e.g.*, cur de 2013). Les extractions entraînent également une incision parfois importante, comme le montre l'incision observée au niveau des deux grands secteurs d'extraction. En ce qui concerne la granulométrie, il est difficile d'établir un lien direct entre extraction et pavage, car l'échantillonnage a été réalisé directement dans la zone d'extraction, ce qui peut biaiser les résultats.

Toutefois, on note un déficit sédimentaire très important au droit des secteurs d'extraction, notamment celui situé à 15 kilomètres de l'amont (PK15), déficit qui ne peut être mis en relation avec une érosion progressive liée aux barrages¹. Cette incision et le déficit sédimentaire associé sont donc à mettre en relation avec les extractions. Il en va de même pour le secteur de la Hierle, où un déficit sédimentaire est également lié aux extractions. Ainsi, on peut attribuer un déficit d'au minimum 375 000 m³ aux extractions, sans prendre en compte les incisions régressives et progressives.

6.2.3 Apport et limite de l'approche hypothético-déductive

L'approche hypothético-déductive semble pertinente pour certains critères, notamment la largeur et la hauteur du lit, pour lesquels les résultats apparaissent relativement cohérents. En revanche, les résultats relatifs à la granulométrie sont plus hétérogènes et ne permettent pas de confirmer clairement les hypothèses formulées. Les tendances observées pour ces deux critères semblent davantage liées à la position des tronçons sur le linéaire qu'aux pressions anthropiques exercées. En effet, on constate un pavage marqué en aval du linéaire, ainsi qu'une stabilisation du profil en long, aussi bien pour les tronçons impacts que pour les tronçons contrôles, toutes hypothèses confondues. Il reste donc difficile de tirer des conclusions robustes.

De plus, il n'a pas été possible de documenter la morphologie avant la construction des barrages, car la période d'observation débute après leur édification. Cela limite les interprétations possibles pour la planimétrie entre les tronçons impacts et contrôles. En effet, les tronçons impacts semblent connaître une évolution relativement similaire à celle des tronçons témoins. Cependant, ils présentent une largeur moindre. Il est difficile de déterminer s'ils étaient déjà étroits, en raison de facteurs locaux, ou s'ils ont subi une rétraction avant la période d'observation, liée aux barrages.

Les interprétations proposées dans cette section reposent en grande partie sur la comparaison entre la trajectoire d'un tronçon donné et celle du cours d'eau dans son ensemble. Cette approche suppose implicitement que la moyenne calculée à l'échelle du linéaire pourrait servir de référence, en tant que trajectoire représentative et relativement indépendante des impacts anthropiques. Or, ce postulat est discutable : le linéaire est globalement fortement impacté, tant par des facteurs naturels qu'anthropiques et ne peut donc être considéré comme une référence « neutre ». Pour autant, cette comparaison peut permettre de faire émerger des dynamiques significativement différentes, susceptibles de révéler des impacts localisés plus marqués. La démarche la plus rigoureuse consiste à comparer chaque tronçon aux deux tronçons témoins. Ces derniers ne

1. En effet, un seuil situé entre le barrage et le secteur d'extraction fait office de point dur, arrêtant l'érosion.

présentent pas de différences significatives par rapport à la moyenne du linéaire, ce qui limite le risque de biais. Ainsi, même si la moyenne du linéaire n'est pas une référence idéale, son utilisation dans le cadre de cette analyse reste utile.

Par ailleurs, une autre limite importante concerne le choix des tronçons. Comme indiqué dans la partie méthodologique, il est difficile de sélectionner des tronçons exempts d'impacts cumulés, ceux-ci étant présents sur une grande partie du linéaire. De plus, les tronçons étudiés ne mesurent que 2 km chacun et peuvent être fortement influencés par les dynamiques en amont et en aval. Pour rappel, nous avons évoqué, par exemple, les extractions dont l'influence peut s'étendre sur plusieurs kilomètres via les processus d'érosion progressive et régressive. Bien qu'ils aient été présentés comme des entités distinctes et bien délimitées, cette représentation est en réalité artificielle. Ces tronçons s'inscrivent dans un continuum longitudinal, où les dysfonctionnements situés en amont peuvent avoir des répercussions directes sur les tronçons situés en aval.

6.3 De la morphologie à la fonctionnalité

Après avoir documenté l'évolution morphologique du cours d'eau, il est intéressant de s'intéresser à sa fonctionnalité actuelle. Pour ce faire, les cinq critères de fonctionnalité proposés par Wohl seront utilisés (WOHL, 2019) : intégrité physique et biologique, connectivité, résilience, hétérogénéité et non-linéarité. Ces critères sont essentiels, car ce sont eux qui permettent de garantir les services écosystémiques. Nous aborderons dans cette partie les critères pour lesquels ce travail a permis d'apporter des éléments de réponse.

Intégrité

L'évolution morphologique du cours d'eau a révélé que celui-ci a subi d'importantes transformations, tant au niveau de sa morphologie que de ses processus. L'hydrologie a été relativement peu altérée, à l'exception des tronçons court-circuités, tandis que le transport sédimentaire a connu des modifications majeures. En plus du déficit sédimentaire hérité de l'amont, des activités telles que les extractions et la construction de barrages ont accentué les problèmes liés au transit sédimentaire.

Non-linéarité

Les crues de 2013 et 2022 ont démontré que le cours d'eau pouvait répondre de manière non linéaire. En effet, certains tronçons se sont élargis beaucoup plus que d'autres, favorisant ainsi une connectivité efficace avec la plaine inondable.

Connectivité du cours d'eau

Afin de préserver les services écosystémiques, il est nécessaire que le cours d'eau soit connecté avec les autres entités de l'hydrosystème, que ce soit dans sa dimension longitudinale, latérale ou verticale. Dans ce travail, il n'a pas été possible de documenter la connectivité du cours d'eau dans sa dimension verticale.

Longitudinale Les résultats obtenus sur le transport solide ont mis en évidence un dysfonctionnement caractérisé par un déficit sédimentaire important. Cependant, les données issues du traçage RFID ont montré que les sédiments restent mobiles, au moins partiellement. Si les barrages ne devraient pas constituer un obstacle majeur à la continuité sédimentaire, leur gestion passée a pu contribuer à ce déficit en retenant tout ou partie de la charge solide. Ce déficit peut également s'expliquer par les extractions, et ne peut donc être imputé uniquement aux barrages. Dans tous les cas, la gestion actuelle semble favoriser une certaine continuité sédimentaire, même si l'analyse RFID n'a pas pu le confirmer formellement, en raison de débits inférieurs à l'état de crue et, par extension, à la mise en pratique d'une transparence au cours de la période d'observation.

Latérale L'analyse historique a mis en évidence une incision et une rétraction parfois très importantes sur certains secteurs. Ces phénomènes peuvent déclencher une rétroaction positive caractérisée par un cycle : incision, concentration des flux, abandon des annexes fluviales et rétraction du cours d'eau, puis nouvelle incision, et ainsi de suite. Cette dynamique peut entraîner une déconnexion du cours d'eau avec la plaine inondable, ce qui peut également provoquer une baisse du niveau de la nappe phréatique.

Cependant, ces observations doivent être nuancées, car une mobilité latérale reste toujours active, avec la formation de nouveaux chenaux, même après la période de forte anthropisation au XXe siècle.

Résilience

Comme mentionné précédemment, la mobilité latérale semble toujours active. En accentuant son méandrage, le cours d'eau peut à la fois se recharger en sédiments grâce à la mobilisation des matériaux stockés dans les berges, et réduire sa pente, ce qui diminue l'énergie disponible pour le transport sédimentaire. Toutefois, cette dynamique n'est possible que dans un contexte de crues morphogènes relativement fréquentes, permettant une remobilisation régulière des surfaces nouvellement érodées, avant que la végétation n'ait le temps de les recoloniser.

Par ailleurs, la crue de 2013 semble avoir contribué à une homogénéisation de la largeur du lit. Si l'hétérogénéité est généralement considérée comme un facteur favorable au maintien des services écosystémiques, les variations observées auparavant — avec certains tronçons étroits — semblaient plutôt résulter de dysfonctionnements dans l'équilibre entre apports solides et liquides. Dans ce cas, l'homogénéisation observée peut davantage être interprétée comme une normalisation du fonctionnement hydro-sédimentaire à l'échelle du linéaire, avec quelques tronçons localement élargis à la suite des crues, témoignant d'une mobilité latérale.

6.4 Perspectives

À l'issue du diagnostic réalisé dans le cadre de ce stage, il apparaît que la poursuite de l'acquisition de données est nécessaire afin de consolider les tendances identifiées et d'apporter des éléments de réponse aux interrogations qui demeurent, notamment en ce qui concerne les critères de fonctionnalité. Toutefois, ces résultats permettent déjà de réfléchir à quelques grandes lignes directrices concernant la gestion de ce linéaire.

6.4.1 Perspectives scientifiques

Acquisition de données supplémentaires

L'ajout de données correspondant à d'autres années permettrait de documenter de manière plus précise l'évolution du cours d'eau. En particulier, un manque notable de données concerne la période allant de 1979 à 2002. Un travail approfondi sur les données hydrologiques pourrait s'avérer très utile pour mieux comprendre l'évolution de l'hydrologie au cours de la période d'observation. Ce travail a été initié durant le stage, mais n'a pas pu être mené à son terme en raison d'incohérences et de lacunes dans les données issues des différentes stations.

En ce qui concerne la granulométrie, le nombre de sites échantillonnés est relativement satisfaisant, mais pourrait être renforcé. Cela n'a pas été possible durant le stage en raison de contraintes de temps, le prélèvement systématique des couches de surface et sub-surface représentant un coût important en termes de temps de terrain. L'ajout de nouveaux sites d'échantillonnage permettrait une meilleure compréhension de l'impact des différents facteurs anthropiques, notamment par l'application plus rigoureuse de l'approche BACI pour le choix des tronçons amont et aval des zones soumises aux pressions.

L'étude par puces RFID n'a pas non plus pu être menée à son terme, là encore en raison de contraintes temporelles. La zone prospectée pourrait être étendue jusqu'à

atteindre un secteur où la détection des puces devient plus rare. Ce travail se poursuivra dans les années à venir afin d’obtenir une période d’observation plus longue et, surtout, pour étudier la mise en mouvement des particules selon différentes classes de débits. Cela permettra également de proposer des estimations du volume charrié pour différents types de crue, et d’évaluer si un transport total de la couche active est encore possible dans le contexte hydrologique actuel.

6.4.2 Fonctionnalité

Les réponses aux critères de fonctionnalité restent encore préliminaires et mériteraient d’être davantage investiguées dans la suite du travail sur la Garonne Moyenne. Un changement d’échelle, vers une approche plus locale, pourrait permettre de mieux documenter les critères d’hétérogénéité et de non-linéarité. La résilience pourrait également être étudiée à cette échelle locale afin de mieux appréhender l’efficacité potentielle des actions de gestion.

6.4.3 Perspectives opérationnelles

Ce premier diagnostic devra être complété afin de mieux cibler les objectifs de gestion dans le cadre du Plan de Gestion Hydro-sédimentaire (PGH). Néanmoins, il a permis de confirmer la présence d’un déficit sédimentaire significatif. Des actions compensatoires pourraient être envisagées, telles que des recharges sédimentaires localisées dans des secteurs propices à l’érosion, afin de garantir une prise rapide de ces sédiments.

Certains tronçons, marqués par une incision prononcée et/ou un pavage important, mériteraient une attention particulière. Des interventions ciblées pourraient y être envisagées dans le but de restaurer une dynamique hydro-sédimentaire satisfaisante et par conséquent, de garantir le maintien des services écosystémiques qui en dépendent. Cependant, au vu du déficit important, la restauration totale des fonctions ne semble pas atteignable.

Dans les secteurs incisés, une intervention directe sur la morphologie du lit pourrait être proposée, telle que la mise en place de petits ouvrages transversaux pour limiter l’érosion régressive et progressive. De plus, puisque l’incision entraîne une déconnexion avec les annexes fluviales, il pourrait être intéressant de favoriser la reconnexion.

Conclusion

Ce travail a eu pour objectif d'établir un diagnostic hydro-sédimentaire de la Garonne Moyenne. Ce tronçon est soumis à un jeu des pressions anthropiques spécifiques : les extractions en lit mineur et les barrages au fil de l'eau. Il s'agissait, dans un premier temps, de documenter l'évolution morphologique du cours d'eau en tentant d'identifier la part imputable aux activités humaines. Dans un second temps, le but était d'évaluer les dysfonctionnements actuels dans le fonctionnement hydro-sédimentaire, à partir de données quantitatives et spatialisées. Pour cela, trois approches complémentaires ont été mobilisées, chacune apportant des éléments de réponse aux questions soulevées.

L'approche historique a permis de mettre en évidence une période antérieure à la crue de 2013 marquée par une rétraction de la bande active et une incision du lit. Ces dysfonctionnements semblent en grande partie liés aux pressions anthropiques. Les extractions ont contribué à l'incision du lit et au déficit sédimentaire, en privant le cours d'eau d'une partie de sa charge solide et en perturbant la continuité sédimentaire. Les barrages, quant à eux, ont également pu altérer le transit sédimentaire par une gestion passée moins favorable au passage des sédiments, comme en témoignent les incisions marquées à l'aval immédiat de ces ouvrages. Par ailleurs, la dérivation d'une partie des débits vers les canaux induit une rétraction de la bande active dans les tronçons court-circuités. Depuis la crue morphogène de 2013, la bande active a retrouvé une surface plus importante, traduisant l'atteinte d'un nouvel équilibre, plus similaire à celui pré-pressions. Toutefois, l'incision du lit reste visible et les ajustements morphologiques sont encore en cours.

L'approche expérimentale a confirmé l'existence d'un déficit sédimentaire important, révélateur d'un dysfonctionnement toujours actif du transport solide. Si l'hydrologie reste globalement peu altérée (hors court-circuitages), le transport sédimentaire semble plus fortement perturbé. Ce déficit se manifeste notamment par un pavage du lit, dégradant les caractéristiques morphologiques nécessaires au maintien des services écosystémiques : habitats pour la faune aquatique, capacités d'autoépuration, etc. Néanmoins, le traçage sédimentaire réalisé avec des puces RFID a montré qu'une partie de la charge de fond reste mobile, indiquant que la dynamique de transport n'est pas totalement interrompue. De plus, une certaine mobilité latérale persiste, ce qui pourrait contribuer partiellement à la recharge sédimentaire, sans toutefois compenser l'ensemble du déficit observé.

Enfin, l'approche hypothético-déductive a permis d'attribuer les impacts observés à une pression spécifique, venant ainsi renforcer les conclusions tirées précédemment à partir de l'approche inductive. Les extractions entraînent une augmentation temporaire de la surface de la bande active, effet qui tend toutefois à se résorber avec le

temps, en raison de l'abandon progressif des sites et de la recolonisation végétale. Elles provoquent également une incision parfois très marquée, pouvant atteindre plusieurs mètres. Le court-circuitage, quant à lui, engendre une diminution de la largeur de la bande active. En revanche, l'approche hypothético-déductive n'a pas permis de mettre en évidence de liens nets entre le pavage et une activité anthropique spécifique. Il s'agit vraisemblablement de l'effet combiné de l'ensemble des pressions anthropiques, en plus du déficit hérité de l'amont.

Ainsi, ce travail met en lumière la nécessité d'intégrer le déficit sédimentaire dans les futures stratégies de gestion. Même si le déficit semble trop important pour être entièrement comblé par des actions localisées, certaines mesures peuvent être envisagées. Il est notamment possible de poursuivre les mesures favorisant le transit sédimentaire via la mise en transparence des barrages, ou d'envisager des recharges sédimentaires ponctuelles dans les secteurs propices. La préservation ou la restauration de la connectivité avec les annexes fluviales doit également être priorisée pour maintenir une hétérogénéité des habitats favorable à la biodiversité. Enfin, la mobilité latérale, encore active, doit être préservée : dans ce cas, ne pas intervenir constitue une forme d'action en soi, essentielle au maintien d'une dynamique fluviale fonctionnelle.

Bibliographie

- ANTOINE, J.-M. (2009). L'histoire du climat par ses extrêmes. Sources géohistoriques et inondations dans les Pyrénées depuis le Petit Age Glaciaire. *Archéologie du Midi médiéval*, 27(1), 143-155. <https://doi.org/10.3406/amime.2009.1893>
- ARNAUD, F., PIÉGAY, H., SCHMITT, L., ROLLET, A. J., FERRIER, V., & BÉAL, D. (2015). Historical Geomorphic Analysis (1932–2011) of a by-Passed River Reach in Process-Based Restoration Perspectives : The Old Rhine Downstream of the Kembs Diversion Dam (France, Germany). *Geomorphology*, 236, 163-177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.009>
- ARNAUD, F. (2012). *Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne)*.
- ARRICAU, V., & CHAPRON, E. (2021). Archives historiques et sédimentaires des paysages lacustres du piedmont des Pyrénées (lacs de Barbazan et de Loures-Barousse, Haute Garonne, France). *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 21(1), 91-102. <https://doi.org/10.3406/edyte.2021.1449>
- ARTELIA. (2015). *Localisation et Gestion Possible Des Sédiments Des Cours d'eau de La Garonne Amont et de La Pique*.
- BAKER, D. W., BLEDSOE, B. P., ALBANO, C. M., & POFF, N. L. (2011). Downstream effects of diversion dams on sediment and hydraulic conditions of Rocky Mountain streams. *River Research and Applications*, 27(3), 388-401. <https://doi.org/10.1002/rra.1376>
- BATALLA, R. J. (2003). Sediment Deficit in Rivers Caused by Dams and Instream Gravel Mining. A Review with Examples from NE Spain. *Cuaternario y geomorfología*, 17, 7991.
- BEAUDELIN, P. (1989). Conséquences de l'exploitation des granulats dans la Garonne. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 60(4), 603-616. <https://doi.org/10.3406/rgpso.1989.3182>
- BLANPIED, J., CAROZZA, J.-M., & ANTOINE, J.-M. (2018). La connectivité sédimentaire dans la haute chaîne pyrénéenne par l'analyse de la crue de juin 2013 : le

- rôle des formations superficielles. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 24 (4), 389-402. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12718>
- BOUTAULT, F. (2020, décembre 17). *Etude de l'impact cumulé des facteurs d'anthropisation sur la Dordogne moyenne et préconisations en vue de la restauration écologique du cours d'eau* [Thèse de doctorat de l'université de Lyon]. Université Jean Moulin Lyon 3. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10836.32643>
- BRAVARD, J.-P., KONDOLF, g. 'mathias, & PIÉGAY, H. (1999). Environmental and Societal Effects of River Incision and Remedial Strategies. In *Incised River Channel*. John Wiley & Sons Ltd.
- BRENNAN, A., SURIAN, N., & MAO, L. (2019). Virtual Velocity Approach for Estimating Bed Material Transport in Gravel-Bed Rivers : Key Factors and Significance. *Water Resources Research*, 55(2), 1651-1674. <https://doi.org/10.1029/2018WR023556>
- BRENNAN, A., SURIAN, N., & MAO, L. (2020). Response of A Gravel - Bed River To Dam Closure : Insights From Sediment Transport Processes And Channel Morphodynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(3), 756-770. <https://doi.org/10.1002/esp.4750>
- BUFFINGTON, J. (1996). An Alternative Method for Determining Subsurface Grain Size Distributions of Gravelbedded River, 77(46).
- BULTEAU, T. (avec PIÉGAY, H., & BATALLA, R. J.). (2023, juin 9). *Dynamique et Discontinuité Hydro-Morphosédimentaire d'un Continuum Fluvial, Le Cas de La Garonne Amont* [These de doctorat]. Lyon, École normale supérieure. <https://theses.fr/2023ENSL0028>
- BULTEAU, T., BATALLA, R. J., CHAPRON, E., VALETTE, P., & PIÉGAY, H. (2022). Geomorphic Effects of a Run-of-the-River Dam in a Multi-Driver Context : The Case of the Upper Garonne (Central Pyrenees). *Geomorphology*, 408. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108243>
- BULTEAU, T., VÁZQUEZ-TARRÍO, D., BATALLA, R. J., & PIÉGAY, H. (2024). A multi-site and hypothesis-driven approach to identify controls on the bedload transport regime of an anthropised gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.5945>
- BUNTE, K., & ABT, S. R. (2001). Sampling Frame for Improving Pebble Count Accuracy in Coarse Gravel-Bed Streams. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(4), 1001-1014. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05528.x>
- CASSEL, M., PIÉGAY, H., FANTINO, G., LEJOT, J., BULTINGAIRE, L., MICHEL, K., & PERRET, F. (2020). Comparison of ground-based and UAV a-UHF artificial

- tracer mobility monitoring methods on a braided river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(5), 1123-1140. <https://doi.org/10.1002/esp.4777>
- CHAPUIS, M. (2012, mai 29). *Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance* [thèse de doct., Aix-Marseille Université]. <https://hal.science/tel-01285528>
- CSIKI, S., & RHOADS, B. L. (2010). Hydraulic and geomorphological effects of run-of-river dams. *Progress in Physical Geography : Earth and Environment*, 34(6), 755-780. <https://doi.org/10.1177/0309133310369435>
- CSIKI, S. J., & RHOADS, B. L. (2014). Influence of Four Run-of-River Dams on Channel Morphology and Sediment Characteristics in Illinois, USA. *Geomorphology*, 206, 215-229. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.009>
- DAVID, M. (2016, juin 20). *Dynamique fluviale de la Garonne à l'anthropocène : trajectoire d'évolution du tronçon fluvial compris entre les confluences de l'Ariège et du Tarn (Garonne toulousaine, 90 km)* [thèse de doct., Université Toulouse le Mirail - Toulouse II]. <https://theses.hal.science/tel-01358114>
- DÉPRET, T., PIÉGAY, H., DUGUÉ, V., VAUDOR, L., FAURE, J.-B., LE COZ, J., & CAMENEN, B. (2019). Estimating and Restoring Bedload Transport through a Run-of-River Reservoir. *Science of The Total Environment*, 654, 1146-1157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.177>
- DÉPRET, T., VIRMoux, C., GAUTIER, E., PIÉGAY, H., DONCHEVA, M., PLAISANT, B., GHAMGUI, S., MESMIN, E., SAULNIER-COPARD, S., de MILLEVILLE, L., CAVERO, J., & HAMADOUCHE, P. (2021). Lowland Gravel-Bed River Recovery through Former Mining Reaches, the Key Role of Sand. *Geomorphology*, 373, 107493. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107493>
- DOWNS, P. W., & PIÉGAY, H. (2019). Catchment-Scale Cumulative Impact of Human Activities on River Channels in the Late Anthropocene : Implications, Limitations, Prospect. *Geomorphology*, 338, 88-104. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.021>
- EGIS. (2022). *Etat Des Lieux et Diagnostic, Diagnostic Du Territoire SMGA*.
- ERSKINE, W. D. (1990). Environmental impacts of sand and gravel extraction on river systems. In *The Brisbane River : a Source Book for the Future* (p. 295-302). Australian Littoral Society. Récupérée août 25, 2025, à partir de https://www.researchgate.net/publication/233871181_Environmental_Impacts_of_Sand_and_Gravel_Extraction_on_River_Systems
- FERNANDES, M., OLIVA, M., VIEIRA, G., FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, J., DELMAS, M., GARCIA OTEYZA CIRIA, J., SCHIMMELPFENNIG, I., VENTURA, J., & TEAM, A. (2021, août 7). *Maximum Glacier Extent of the Penultimate Glacial Cycle*

- in the Upper Garonne Basin (Pyrenees) : New Chronological Evidence.* <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-788888/v1>
- GALAY, V. J. (1983). Causes of river bed degradation. *Water Resources Research*, 19(5), 1057-1090. <https://doi.org/10.1029/WR019i005p01057>
- GASOWSKI, Z. (1994). L'enfoncement du lit de la Loire / The entrenchment of the Loire's river bed. *Géocarrefour*, 69(1), 41-45. <https://doi.org/10.3406/geoca.1994.4236>
- GORDON WOLMAN, M. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 35(6), 951-956. <https://doi.org/10.1029/TR035i006p00951>
- HASSAN, M. A., & ROY, A. G. (2016). Coarse particle tracing in fluvial geomorphology. In *Tools in Fluvial Geomorphology* (p. 306-323). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118648551.ch14>
- HOOVER MACKIN, J. (1948). Concept of the Graded River. *GSA Bulletin*, 59(5), 463-512. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1948\)59\[463:COTGR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1948)59[463:COTGR]2.0.CO;2)
- HUGHES, M. L., MCDOWELL, P. F., & MARCUS, W. A. (2006). Accuracy Assessment of Georectified Aerial Photographs : Implications for Measuring Lateral Channel Movement in a GIS. *Geomorphology*, 74(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.001>
- IBISATE, A., DÍAZ, E., OLLERO, A., ACÍN, V., & GRANADO, D. (2013). Channel response to multiple damming in a meandering river, middle and lower Aragón River (Spain). *Hydrobiologia*, 712(1), 5-23. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1490-0>
- JANTZI, H., CAROZZA, J.-M., PROBST, J.-L., & VALETTE, P. (2017). Les extractions de granulats dans le lit mineur de la moyenne Garonne toulousaine durant la seconde moitié du xxe siècle. *Sud-Ouest européen. Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, (44), 83-96. <https://doi.org/10.4000/soe.3418>
- KNIGHTON, D. (1984). *Fluvial Forms and Processes : A New Perspective*. Arnold. <https://doi.org/10.4324/9780203784662>
- KONDOLF, G. M. (1997). Hungry Water : Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21(4), 533-551. <https://doi.org/10.1007/s002679900048>
- KONDOLF, G. M., & PIÉGAY, H. (2016). *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons.
- LAMBERT, R. (1989). Cartographie géomorphologique de la vallée de la Garonne. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 60(4), 637-648. <https://doi.org/10.3406/rgpso.1989.3187>

- LANDON, N. (avec BRAVARD, J.-P.). (1999, janvier 1). *L'évolution Contemporaine Du Profil En Long Des Affluents Du Rhône Moyen : Constat Régional et Analyse d'un Hydrosystème Complexe : La Drôme* [These de doctorat]. Paris 4. <https://theses.fr/1998PA040295>
- LANE, E. (1955). The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineer Ing. *Journal of the Hydraulics Division*, 81, 1-17.
- LATAPIE, A., CAMENEN, B., RODRIGUES, S., PAQUIER, A., BOUCHARD, J.-P., & MOATAR, F. (2014). Assessing Channel Response of a Long River Influenced by Human Disturbance. *CATENA*, 121, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.017>
- LOIRE, R., PIÉGAY, H., MALAVOI, J.-R., KONDOLF, G. M., & BÊCHE, L. A. (2021). From Flushing Flows to (Eco)Morphogenic Releases : Evolving Terminology, Practice, and Integration into River Management. *Earth-Science Reviews*, 213, 103475. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103475>
- MAO, L., PICCO, L., LENZI, M. A., & SURIAN, N. (2017). Bed material transport estimate in large gravel-bed rivers using the virtual velocity approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(4), 595-611. <https://doi.org/10.1002/esp.4000>
- MARSTON, R. A., BRAVARD, J.-P., & GREEN, T. (2003). Impacts of Reforestation and Gravel Mining on the Malnant River, Haute-Savoie, French Alps. *Geomorphology*, 55(1), 65-74. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00132-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00132-6)
- MARTEAU, B., MICHEL, K., & PIÉGAY, H. (2022). Can gravel augmentation restore thermal functions in gravel-bed rivers? A need to assess success within a trajectory-based before–after control–impact framework. *Hydrological Processes*, 36(2), e14480. <https://doi.org/10.1002/hyp.14480>
- MÉTAILIÉ, J.-P. (2006). La "dégradation Des Montagnes" Au XIX^e Siècle Dans Les Pyrénées. *Temps et espaces des crises de l'environnement*, p.191-210. <https://univ-tlse2.hal.science/hal-01192712v1>
- PEARSON, A. J., & PIZZUTO, J. (2015). Bedload Transport over Run-of-River Dams, Delaware, U.S.A. *Geomorphology*, 248, 382-395. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.025>
- PEIRY, J., SALVADOR, P.-G., & NOUGUIER, F. (1994). L'incision des rivières dans les Alpes du nord : état de la question / River incision in the Northern French Alps. *Géocarrefour*, 69(1), 47-56. <https://doi.org/10.3406/geoca.1994.4237>
- PETIT, F., POINSART, D., & BRAVARD, J. .-. (1996). Channel Incision, Gravel Mining and Bedload Transport in the Rhône River Upstream of Lyon, France ("Canal

- de Miribel"). *CATENA*, 26(3), 209-226. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00047-X](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00047-X)
- PETTS, G. E., & AMOROS, C. (Éd.). (1996). *The Fluvial Hydrosystems*. Chapman & Hall. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1491-9>
- RICE, S., & CHURCH, M. (1998). Grain size along two gravel-bed rivers : statistical variation, spatial pattern and sedimentary links. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(4), 345-363. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199804\)23:4<345::AID-ESP850>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199804)23:4<345::AID-ESP850>3.0.CO;2-B)
- ROLLET, A.-J. (2007, novembre 30). *Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain* [thèse de doct., Université Jean Moulin - Lyon III]. <https://theses.hal.science/tel-00221368>
- ROVIRA, A., BATALLA, R. J., & SALA, M. (2005). Response of a river sediment budget after historical gravel mining (the lower Tordera, NE Spain). *River Research and Applications*, 21(7), 829-847. <https://doi.org/10.1002/rra.885>
- SCHMIDT, J. C., & WILCOCK, P. R. (2008). Metrics for assessing the downstream effects of dams. *Water Resources Research*, 44(4). <https://doi.org/10.1029/2006WR005092>
- SCHUMM, S. A. (1977). *The Fluvial System*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/DOI:10.1002/esp.3290040121>
- STÄHLY, S., FRANCA, M. J., ROBINSON, C. T., & SCHLEISS, A. J. (2020). Erosion, transport and deposition of a sediment replenishment under flood conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(13), 3354-3367. <https://doi.org/10.1002/esp.4970>
- VÁZQUEZ-TARRÍO, D., TAL, M., CAMENEN, B., & PIÉGAY, H. (2019). Effects of continuous embankments and successive run-of-the-river dams on bedload transport capacities along the Rhône River, France. *The Science of the Total Environment*, 658, 1375-1389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.109>
- VÁZQUEZ-TARRÍO, D., TAL, M., PARROT, E., & PIÉGAY, H. (2022). Can We Incorrectly Link Armouring to Damming? A Need to Promote Hypothesis-Driven Rather than Expert-Based Approaches in Fluvial Geomorphology. *Geomorphology*, 413, 108364. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108364>
- VERICAT, D., & BATALLA, R. J. (2006). Sediment Transport in a Large Impounded River : The Lower Ebro, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology*, 79(1), 72-92. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.09.017>

- WILCOCK, P. R. (1997). Entrainment, displacement and transport of tracer gravels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(12), 1125-1138. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199712\)22:12<1125::AID-ESP811>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199712)22:12<1125::AID-ESP811>3.0.CO;2-V)
- WOHL, E. (2019). Forgotten Legacies : Understanding and Mitigating Historical Human Alterations of River Corridors. *Water Resources Research*, 55(7), 5181-5201. <https://doi.org/10.1029/2018WR024433>

Sitographie

1. (s. d.). *Archives Départementales*. Récupérée septembre 1, 2025, à partir de [archives.haute-garonne.fr](#)
2. (s. d.). *Géoservices*. Récupérée août 31, 2025, à partir de <https://geoservices.ign.fr/>
3. (s. d.). *HydroPortail*. Récupérée août 31, 2025, à partir de <https://hydro.eaufrance.fr/>
4. (s. d.). *Remonter Le Temps - IGN*. Récupérée août 31, 2025, à partir de <https://remonterletemps.ign.fr/>

Table des figures

1.1	Cartographie des 6 sous bassins versants et des cours d'eau classés "masses d'eau" sur le territoire du SMGA (SMGA, 2023)	11
1.2	Répartition du nombre d'actions par thématique du PPG Garonne Amont (SMGA, 2023)	12
2.1	Hydrosystème fuvial avec les trois axes bidirectionnels : longitudinal (amont/aval), vertical (surface/souterrain), latéral (chenal/marges) (Kondolf et Piégay, 2016)	17
2.2	Réponse du système fluvial à une modification des variables de contrôles KNIGHTON, 1984	19
2.3	Échelles spatiales et temporelles de l'ajustement des formes fluviales d'après ROLLET, 2007 modifié d'après KNIGHTON, 1984	20
2.4	Réponse morphologique du cours d'eau post-exploitation (BULTEAU, 2023) modifié selon (KONDOLF, 1997)	22
3.1	Zone d'étude avec les principales pressions anthropiques	29
3.2	Chronique des débits moyens journaliers de 1910 à 2025, station de Portet-sur-Garonne (3, s. d.)	30
3.3	Nombre d'inondations et crues torrentielles recensées par décennie dans les Pyrénées entre 1500 et 2000 ; source : BLANPIED et al., 2018 selon ANTOINE, 2009	32
3.4	angle=90	35
3.5	Incision de la Garonne et de la Neste ; source : issu de EGIS, 2022 selon les données produites par ARTELIA, 2015	37
4.1	Données utilisées pour l'analyse de l'évolution morphologique et perturbations naturelles (crues) et anthropiques (pressions)	40
4.2	Erreur de géoréférencement	44
4.3	Processus de digitalisation de la bande active	46

4.4	Zone échantillonnage granulométrique. A- Couche de surface B- couche de subsurface	51
4.5	Protocole du traçage avec puces RFID	53
5.1	Évolution de la largeur de la bande active	59
5.2	Évolution de la surface cumulée de la bande active	60
5.3	Evolution des surfaces érodées et construites par période	61
5.4	Résultat de l'analyse des points de ruptures (<i>changepoint</i>) pour l'année 1979 et 2002	62
5.5	Évolution du profil en long de 1925 à nos jours	63
5.6	Éstimation du déficit sédimentaire	64
5.7	Distribution de la taille des grains pour chaque zone d'échantillonnage avec indice de pavage	66
5.8	Distribution de la distance de déplacement des particules selon leur classe de taille	68
5.9	Évolution de la largeur moyenne de la bande active du linéaire et de chaque tronçons	70
5.10	Incision moyenne du linéaire et de chaque tronçons entre 1925 et aujourd'hui	71
5.11	Indice de pavage des tronçons impacts et contrôles	71
1	Organigramme du SMGA en date du 1 ^{er} août 2024	96
2	Évolution des surfaces érodées et construites entre 1942 et 1969	100
3	Évolution des surfaces érodées et construites entre 1969 et 1979	101
4	Évolution des surfaces érodées et construites entre 1979 et 2010	102
5	Évolution des surfaces érodées et construites entre 2010 et 2013	103
6	Évolution des surfaces érodées et construites entre 2013 et 2019	104
7	Évolution des surfaces érodées et construites entre 2019 et 2022	105
8	Essai de chronique hydrologique avec débits extrapolés pour la station de Mancieux. Cette analyse n'a pas pu aboutir pour des raisons de mauvaises qualités des données en entrée (incohérences et lacunes)	106
9	Zone d'étude avec les principales pressions anthropiques	108
10	Données utilisées pour l'analyse de l'évolution morphologique et perturbations naturelles (crues) et anthropiques (pressions)	109
11	Profil en long en 1925 et aujourd'hui. Cumul de la surface de la bande active en fonction des années	110

Liste des tableaux

3.1	Tableau des hypothèses; W correspond à la largeur, Z à la hauteur du cours d'eau et D au diamètre des sédiments	39
4.1	Tableau des orthophotographies utilisées pour documenter les effets post-crue. Débits mesurés à la station de Portet-sur-Garonne	42
4.2	Tronçons impacts et contrôles	56
5.1	Résultat analyse planimétrique. S av. correspond à la surface au début de la période, tandis que S ap., à la surface à l'issue de la période. La différence de surface entre les deux dates est exprimée en valeur absolue (Δ), par année (Δ/an) et également en pourcentage ($\Delta(\%)$). La p-value résulte du test de wilcoxon (S- significatif, NS- non-significatif). Se1 correspond à la surface érodée valide (anthropiques et naturelles) et Sc1 à la surface construite valide. Le ratio entre les deux rend compte de la tendance majoritaire sur la période (<1 construction; >1 érosion).	58
5.2	Delta des profils en long GFH et actuel	62
5.3	Résultat des prospections RFID. La taille désigne la borne inférieure de la classe granulométrique, la distance correspond à la distance parcourue entre l'injection et la détection, Nbr injecté correspond au nombre de galets injectés, Nbr retrouvé au nombre retrouvé, et Nbr mobilisé au nombre de galets mobilisés.	67
5.4	Résultat du calcul des volumes charriés (4.1)	69
1	Résultats du test de Wilcoxon; pXXXX = p-value pour l'année, S = statistiquement significatif et NS = pas significatif	97
2	Résultats surfaces érodées et construites. Se0 correspond à la totalité des surfaces érodées, Se1 aux surfaces érodées valides, et Se2 aux surfaces valides d'origine naturelle. Sc0 correspond à la totalité des zones construites et Sc1 aux surfaces construites valides	98

3	Résultats de l'analyse des points de ruptures sur les largeurs de bande active	99
---	--	----

Annexe

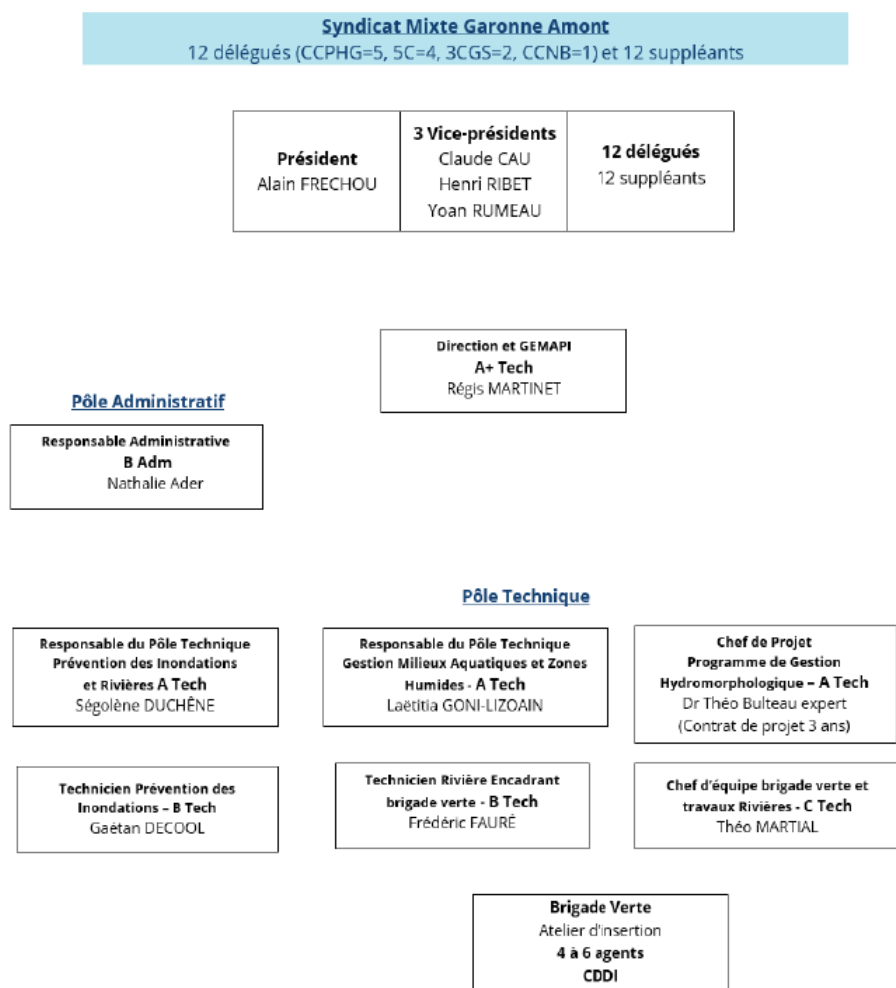


FIGURE 1 – Organigramme du SMGA en date du 1^{er} août 2024

Année	p1956	1956	p1969	1969	p1979	1979	p2002	2002	p2010	2010	p2013	2013	p2019	2019	p2022	2022
1942	0	NS	0	NS	0	NS	0	NS	0	NS	0.03	NS	0	NS	0	NS
1953			0	NS	0.14	S	0	NS	0	NS	0	NS	0.0026	NS	0.03	NS
1969					0	NS	0.25	S	0.44	S	0	NS	0	NS	0	NS
1979							0	NS	0	NS	0	NS	0	NS	0.07	S
2002									0.85	S	0	NS	0	NS	0	NS
2010											0	NS	0	NS	0	NS
2013												NS	0	NS	0	NS
2019													0	NS	0.48	S

TABLE 1 – Résultats du test de Wilcoxon ; pXXXX = p-value pour l'année, S = statistiquement significatif et NS = pas significatif

TABLE 2 – Résultats surfaces érodées et construites. Se0 correspond à la totalité des surfaces érodées, Se1 aux surfaces érodées valides, et Se2 aux surfaces valides d’origine naturelle. Sc0 correspond à la totalité des zones construites et Sc1 aux surfaces construites valides

Période	Se0	Se1	Se2	Se1/Se0	Se2/Se1	Sc0	Sc1	Sc1/Sc0
1942-1969	395 311	254 868	95 381	64%	37%	907 342	662 875	73%
1969-1979	612 465	385 512	168 756	63%	44%	298 274	119 900	40%
1979-2010	278 461	237 008	218 554	85%	92%	705 674	633 041	90%
2010-2013	569 630	556 413	556 413	98%	100%	10 569	2 183	21%
2013-2019	78 979	69 268	67 123	88%	97%	375 658	324 304	86%
2019-2022	187 352	162 354	105 146	87%	65%	87 043	44 338	51%

TABLE 3 – Résultats de l'analyse des points de ruptures sur les largeurs de bande active

PK amont (Km)	1942	1953	1969	1979	2002	2010	2013	2019	2022
5,13									X
6,38									X
10,63					X				
11,13						X			
14,13				X					
15,38				X					
17,38					X	X			
21,88					X	X			
22,13			X						
22,38		X							
23,13							X		
24,13									X
24,38							X		
26,88									X
27,38		X							
28,63			X		X	X			
28,88							X	X	
29,88			X	X					
30,63							X	X	
31,13			X	X					
41,38				X					

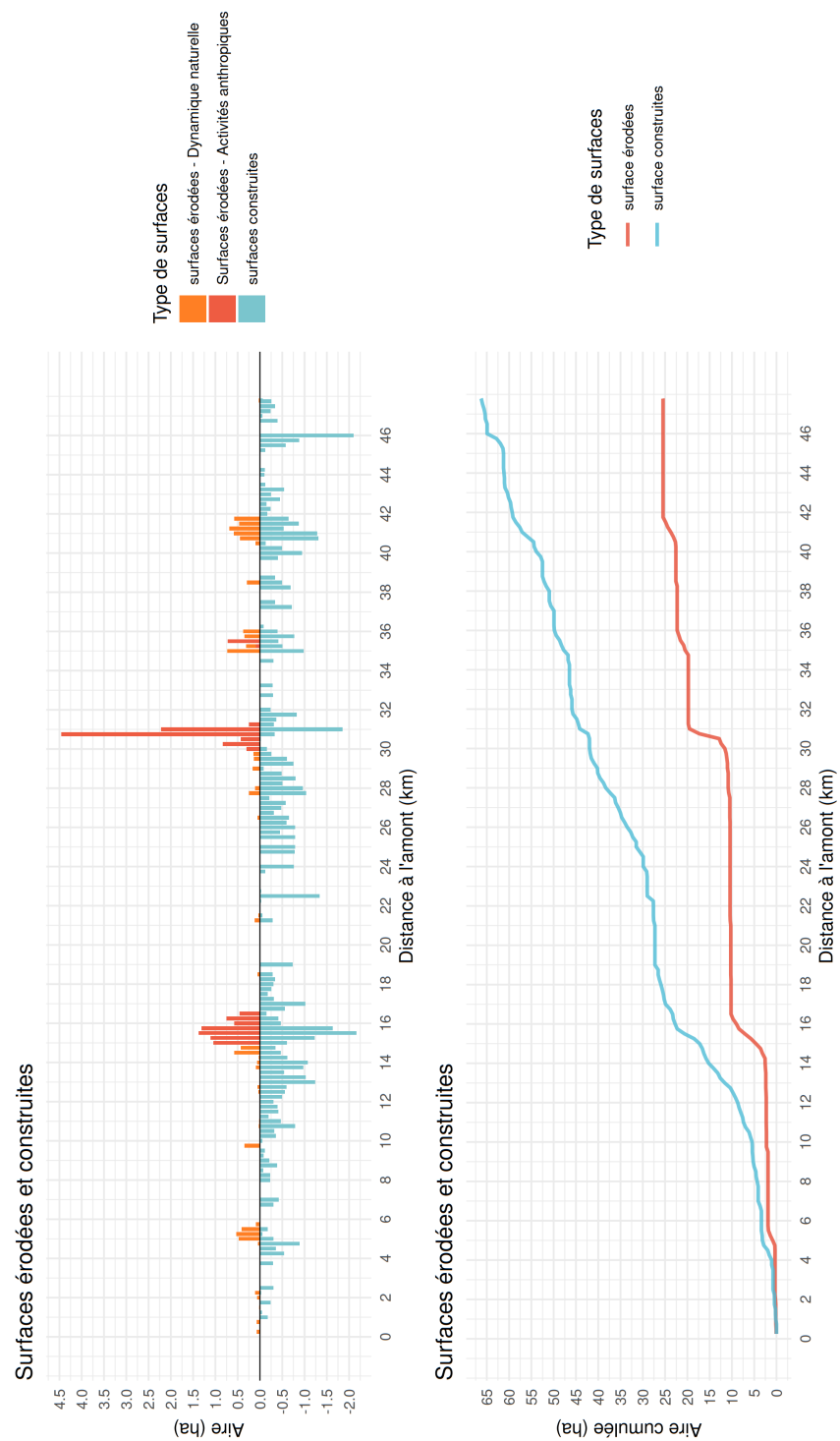


FIGURE 2 – Évolution des surfaces érodées et construites entre 1942 et 1969

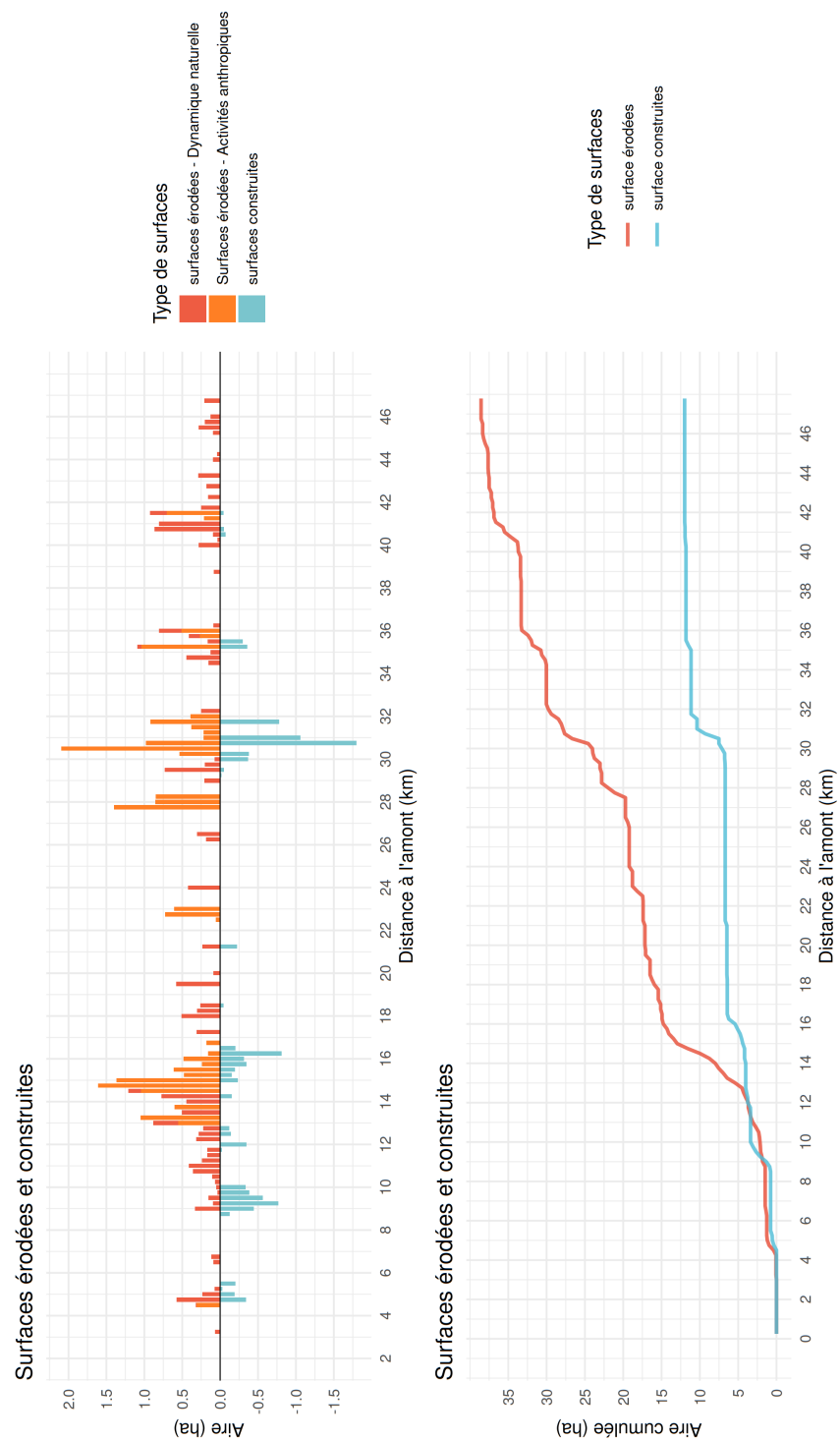


FIGURE 3 – Évolution des surfaces érodées et construites entre 1969 et 1979

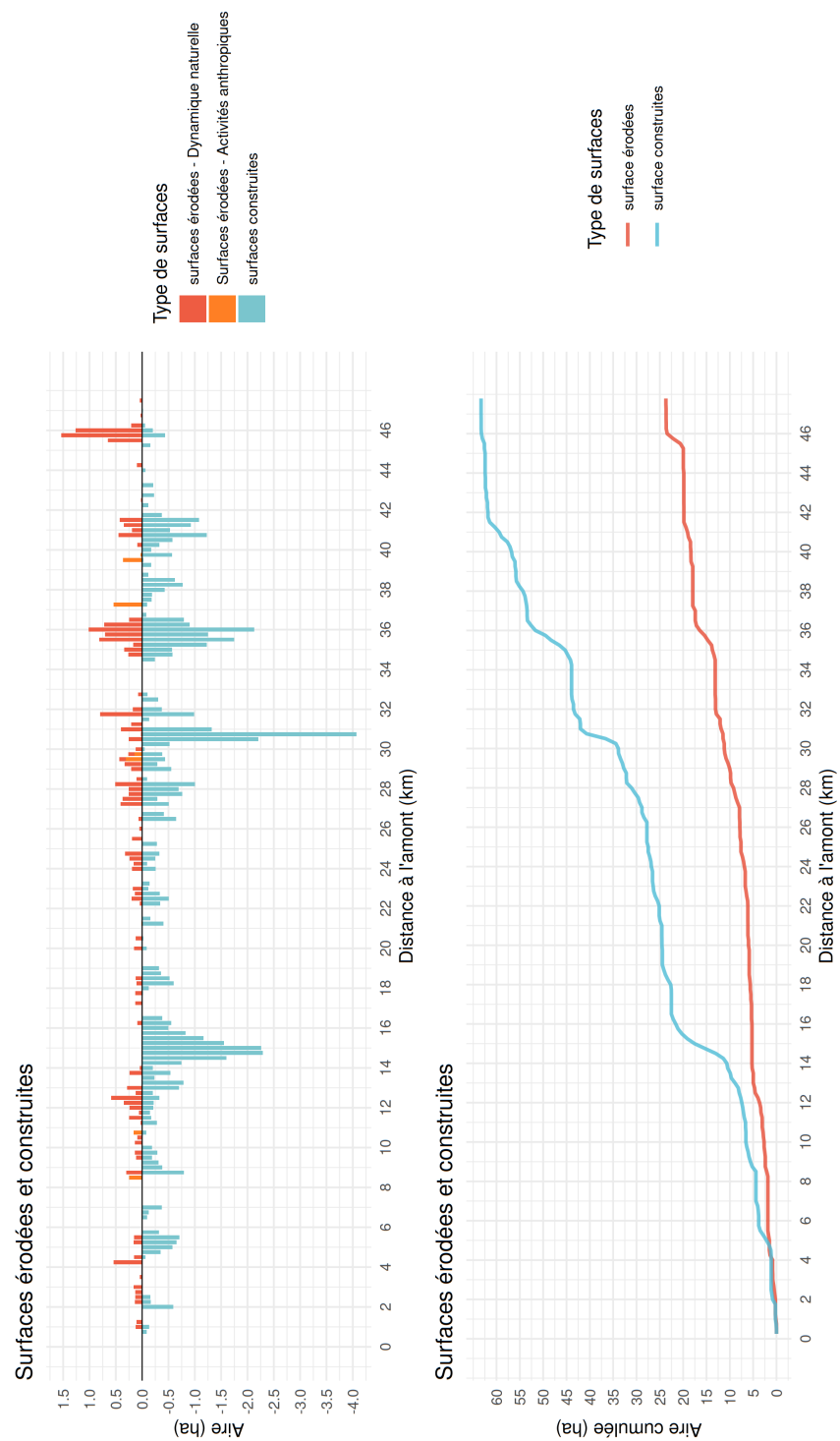


FIGURE 4 – Évolution des surfaces érodées et construites entre 1979 et 2010

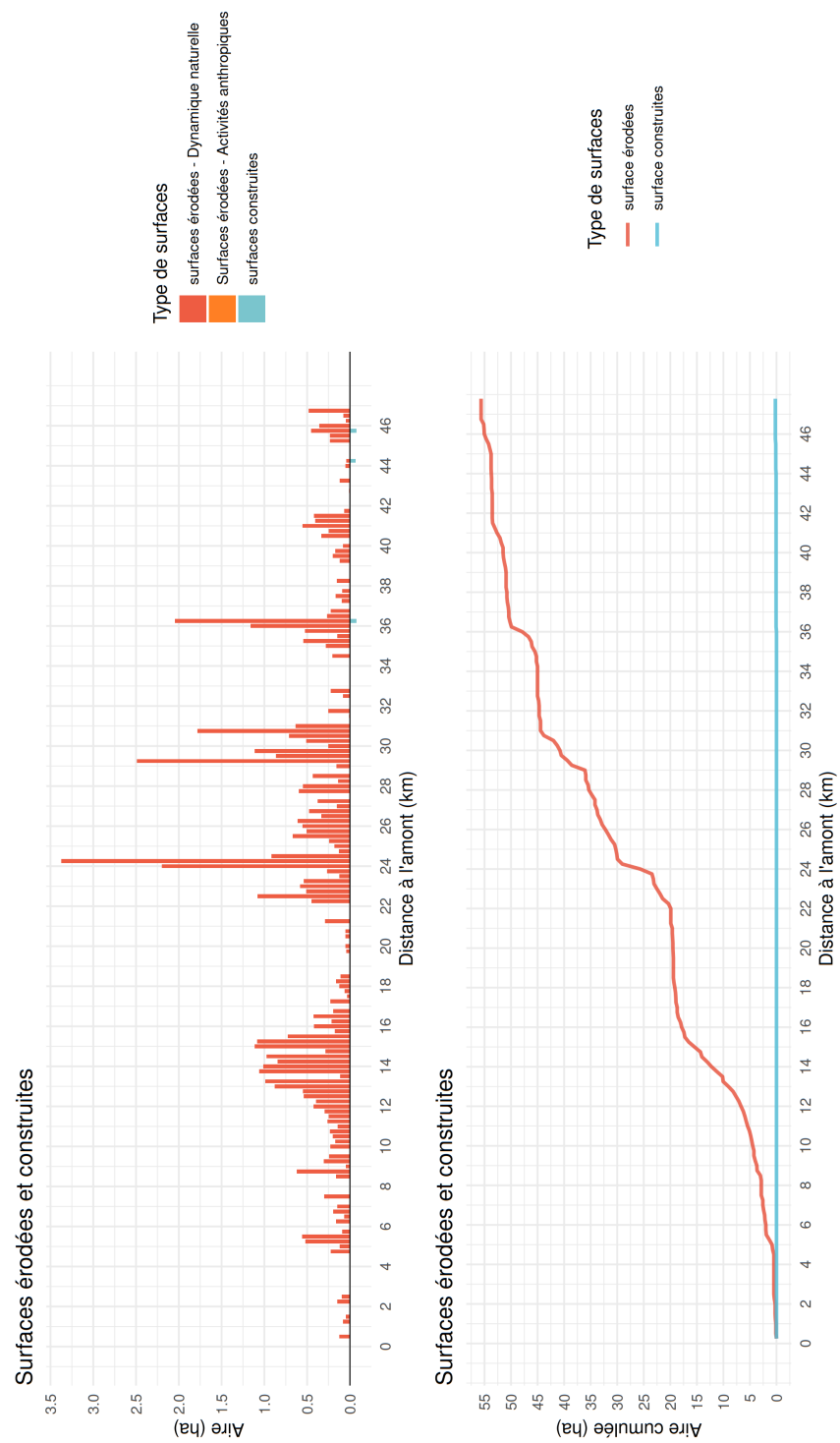


FIGURE 5 – Évolution des surfaces érodées et construites entre 2010 et 2013

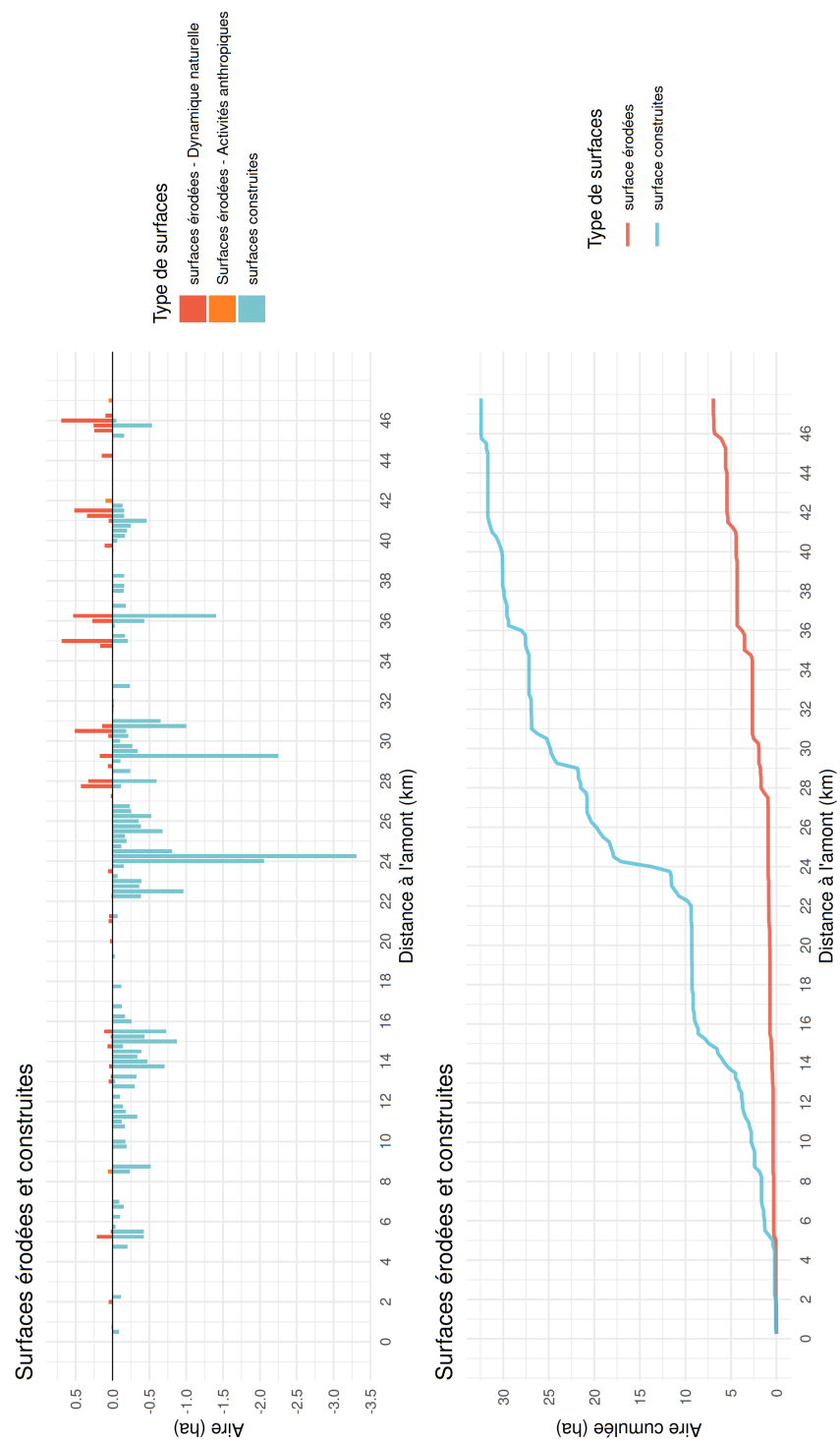


FIGURE 6 – Évolution des surfaces érodées et construites entre 2013 et 2019

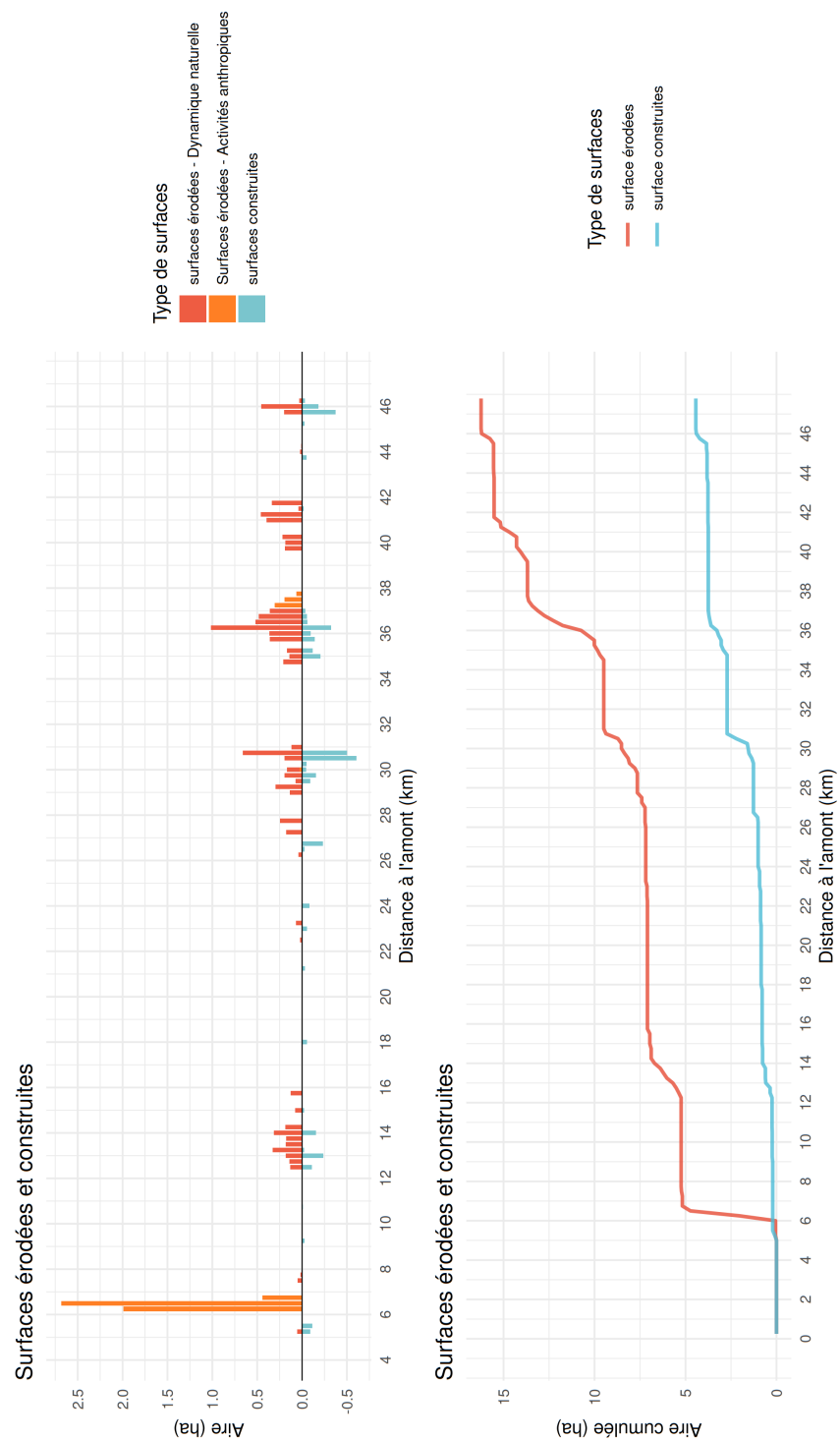


FIGURE 7 – Évolution des surfaces érodées et construites entre 2019 et 2022

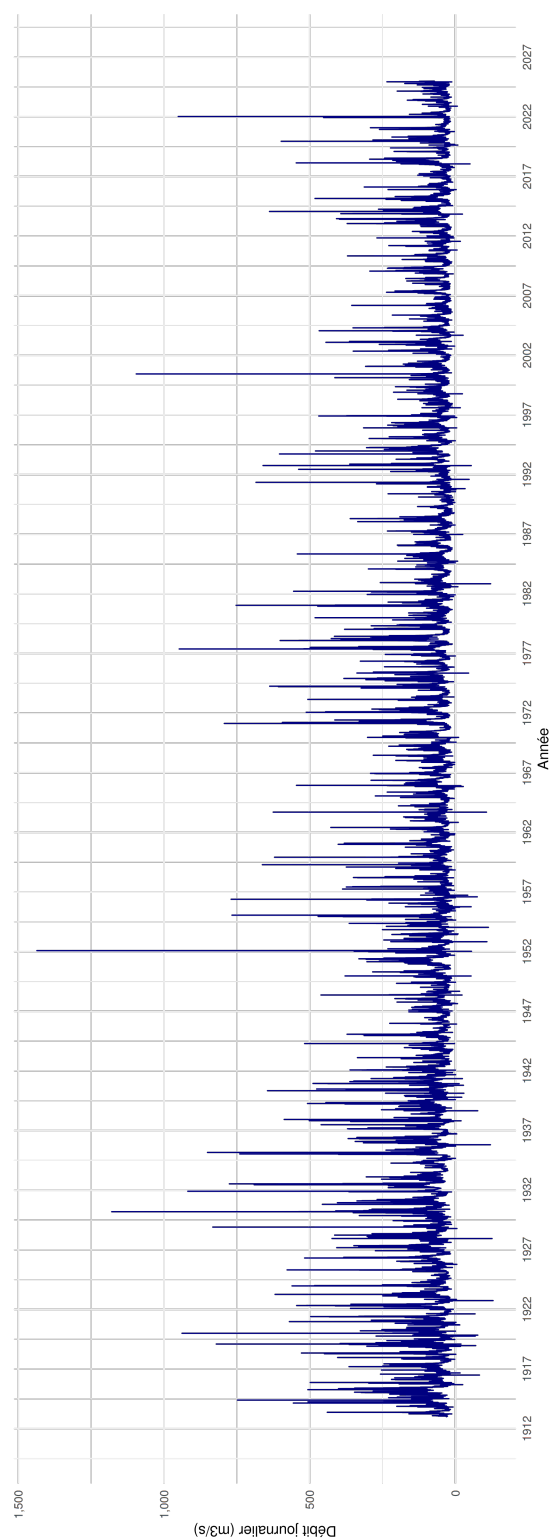


FIGURE 8 – Essai de chronique hydrologique avec débits extrapolés pour la station de Mancieux. Cette analyse n'a pas pu aboutir pour des raisons de mauvaises qualités des données en entrée (incohérences et lacunes)

Diagnostic hydro-sédimentaire de la Garonne hydroélectrique (de la confluence de la Neste à celle du Salat)

Contexte du stage

Les cours d'eau assurent des services écosystémiques essentiels qu'il est nécessaire de préserver. Cette exigence se confronte parfois aux usages humains, ce qui impose d'intégrer ces derniers à la fois comme acteurs et comme enjeux dans la gestion. Dans ce contexte, un diagnostic hydro-sédimentaire s'avère indispensable pour orienter les actions de manière éclairée. Ce travail répond à un besoin de diagnostic hydro-sédimentaire sur le tronçon de la Garonne Moyenne, exprimé par le Syndicat mixte Garonne Amont (SMGA). Cette portion du linéaire a connu une forte anthropisation au cours du XXe siècle, susceptible d'avoir altéré son fonctionnement hydro-sédimentaire par la perturbation des flux liquides (eau) et solides (sédiments). Les principales pressions identifiées concernent les barrages au fil de l'eau et les extractions en lit mineur. Bien que ces dernières aient cessé dans les années 1990, elles constituent un héritage pouvant représenter une perturbation toujours active.

Ainsi, dans ce travail, nous nous sommes interrogés sur la part des impacts des principales pressions anthropiques dans l'évolution du linéaire de la Garonne Moyenne

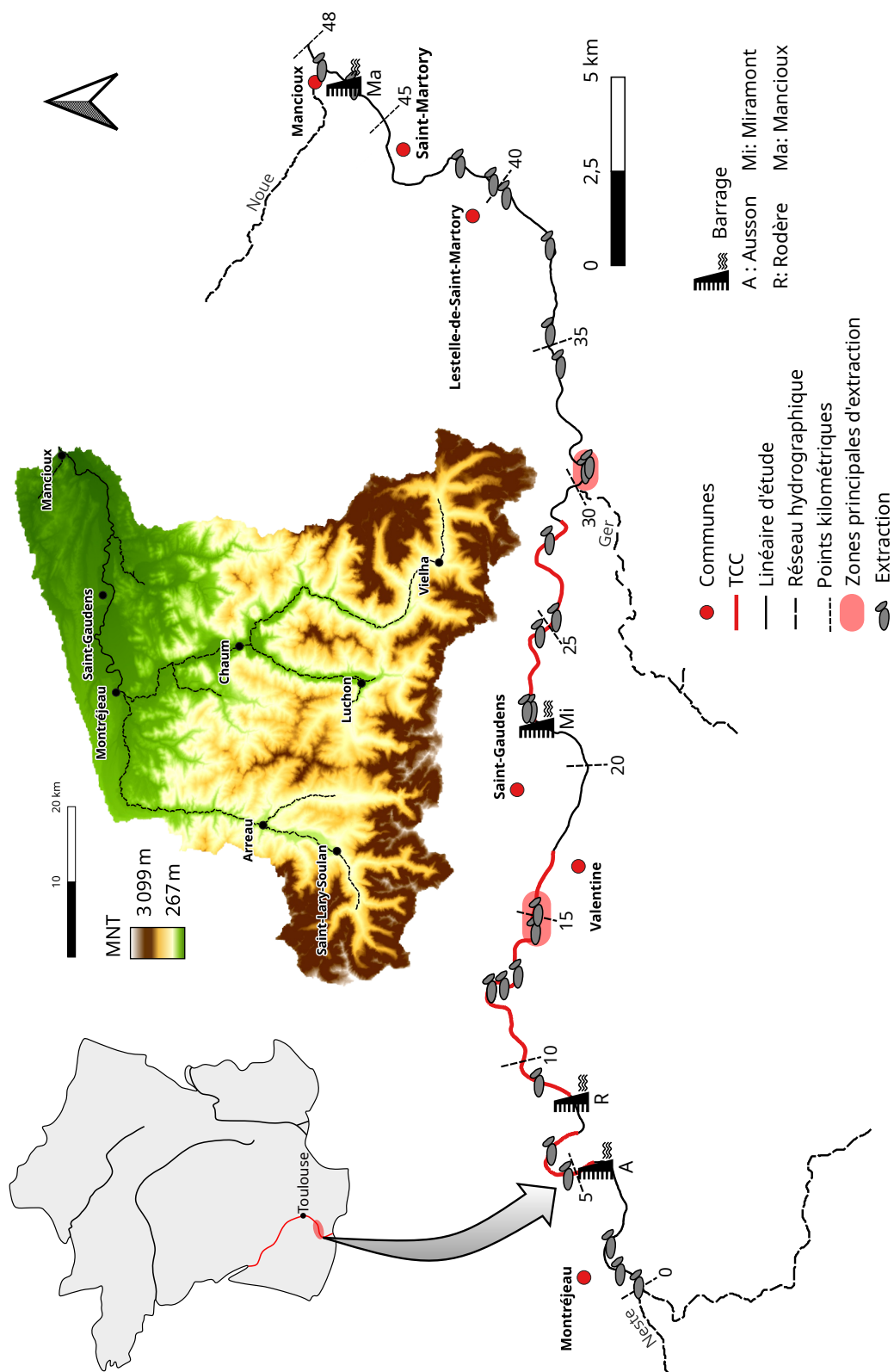


FIGURE 9 – Zone d'étude avec les principales pressions anthropiques

Questions de recherche et approches mobilisées

Plusieurs questions de recherche ont été identifiées :

1. Quelle est l'évolution du cours d'eau depuis le XXe siècle ?
2. Quel est le fonctionnement hydro-sédimentaire actuel, notamment en ce qui concerne le transit sédimentaire ?
3. Comment intégrer la dimension multifactorielle (facteurs naturels et anthropiques) dans le diagnostic, afin de mieux appréhender leur rôle spécifique dans l'évolution et le fonctionnement actuel du cours d'eau ?

Trois approches complémentaires sont mobilisées :

1. Une approche historique, visant à documenter l'évolution de la morphologie du cours d'eau, en lien avec les variations des flux solides et liquides dans le système fluvial. Les deux principales caractéristiques morphologiques observées sont la largeur de la bande active et la hauteur du lit.
2. Une approche expérimentale, permettant de quantifier le transit sédimentaire actuel. Cette approche repose sur l'acquisition de données sur le terrain, notamment avec des analyses granulométriques et un traçage sédimentaire avec puces RFID.
3. Une approche hypothético-déductive, destinée à discriminer le rôle spécifique de chaque facteur anthropique, en s'appuyant notamment sur la comparaison de tronçons impacts et de tronçons contrôles (non-affectés).

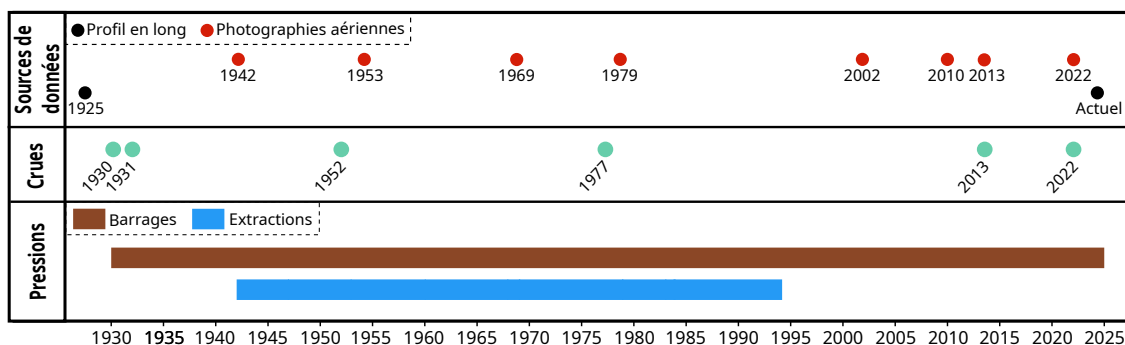


FIGURE 10 – Données utilisées pour l'analyse de l'évolution morphologique et perturbations naturelles (crues) et anthropiques (pressions)

Résultats principaux

L'analyse de l'évolution morphologique a mis en évidence une **incision du lit** et une **rétraction de la bande active**. Ces changements morphologiques sont liés aux pressions anthropiques telles que les extractions et les barrages au fil de l'eau. Depuis la crue morphogène de 2013, la **bande active** s'est rélargie et semble avoir atteint un **nouvel équilibre**. Le **profil en long** est, lui, toujours **en cours d'ajustement**.

L'approche expérimentale a confirmé un **déficit sédimentaire** important, témoin des perturbations du transport solide. Ce déficit se manifeste par un **pavage du lit**, dégradant les fonctions écologiques du cours d'eau. Malgré cela, une certaine mobilité du lit, au moins partielle, subsiste, ainsi qu'une mobilité latérale, indiquant une **dynamique encore partiellement active**.

Enfin, l'approche hypothético-déductive s'est révélée utile pour documenter les relations de causalité entre pressions et certains changements morphologiques tels que la largeur de la bande active et la hauteur du lit. Cependant, aucune attribution n'a pu être établie pour le processus de pavage.

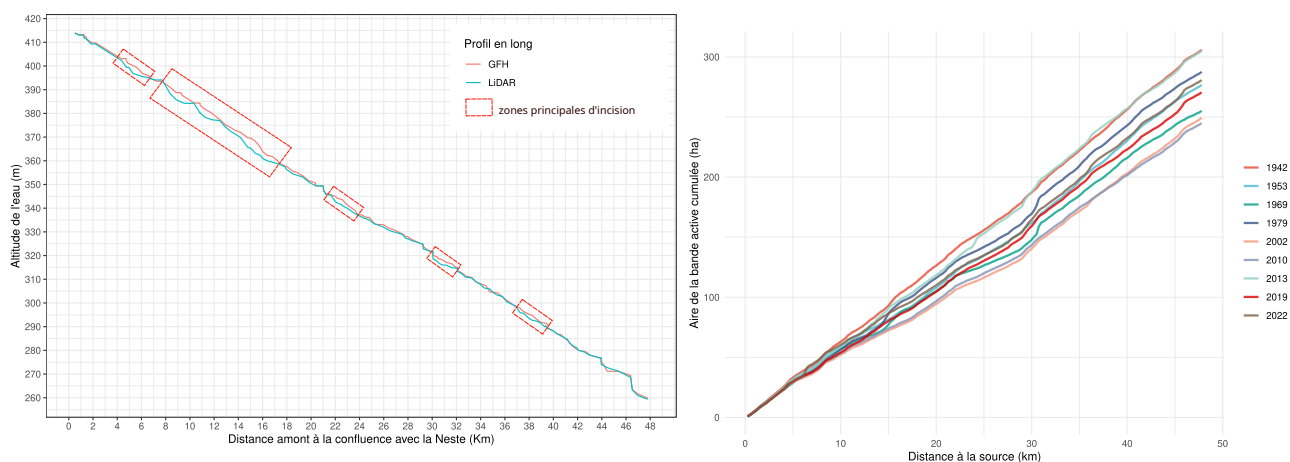


FIGURE 11 – Profil en long en 1925 et aujourd'hui. Cumul de la surface de la bande active en fonction des années

Ce travail souligne l'importance d'intégrer le déficit sédimentaire dans la gestion future des cours d'eau. Bien qu'il ne puisse être totalement comblé, des actions ciblées comme la mise en transparence des barrages, les recharges sédimentaires ponctuelles et la préservation de la connectivité latérale peuvent favoriser un dynamisme hydro-sédimentaire. L'objectif est de garantir la fonctionnalité du cours d'eau, et par extension, le maintien des services écosystémiques.