

Master 2 GAED

Parcours **G**estion et **E**valuation des
environnements **M**ontagnards

Hydrogéomorphologie de l'Ariège à l'aval de Pamiers

*Analyses et perspectives d'un tronçon
en déficit sédimentaire*



Mars 2022



Liste des sigles et acronymes

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AGERIN : Aménagement et Gestion de l'Environnement et des Risques Naturels

ANA-CEN : Association des Naturalistes de l'Ariège-Conservatoire des Espaces Naturels

Aurah-ce : AUdit RAPide de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau

CARHYCE : CARactérisation de l'HYdromorphologie des Cours d'Eau

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

EDF – GDF : Electricité de France – Gaz de France (ENGIE aujourd'hui)

GEMO : Gestion et Evaluation des Environnements MONTagnards

IGN : Institut Géographique National

MIGADO : Migrateurs Garonne Dordogne

OFB : Office Français de la Biodiversité

ONCFS : Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

SIG : Système d'Information Géographique

SIAHBVA : Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique de la Basse Ariège

SYMAR VA : SYndicat Mixte d'Aménagement des Rivières du Val d'Ariège

Syrah-ce : Système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau

TCC : Tronçon court circuité

WPC : Wolman pebble count

Sommaire

Introduction - Hydrogéomorphologie de l'Ariège : Géohistoire, indicateurs de suivi et atlas cartographique	1
---	----------

1ère partie - Géohistoire de l'Ariège à Pamiers et Bonnac du milieu du XIXe siècle à nos jours	4
---	----------

I. Méthodes de travail sur la géohistoire	4
---	---

II. Evolution des pratiques et des usages de l'Ariège	5
---	---

III. Evolution du tronçon court-circuité de Pamiers Bonnac	14
--	----

2ème partie - Evolution de l'espace de mobilité, état des lieux 2012-2022.....	20
---	-----------

I. Méthodologies appliquées à la caractérisation de l'espace de mobilité de l'Ariège	21
--	----

II. Résultat de l'évolution des caractéristiques hydromorphologiques de l'Ariège	27
--	----

III. Interprétation des résultats et discussion	44
---	----

3ème partie - Regard prospectif sur l'Ariège : indicateurs et protocoles de suivi	53
--	-----------

I. Diversité et définition des indicateurs de suivis	53
--	----

II. Indicateurs globaux et d'observation	54
--	----

III. Indicateurs géomorphologiques	70
--	----

Conclusion générale	86
----------------------------------	-----------

- Introduction -

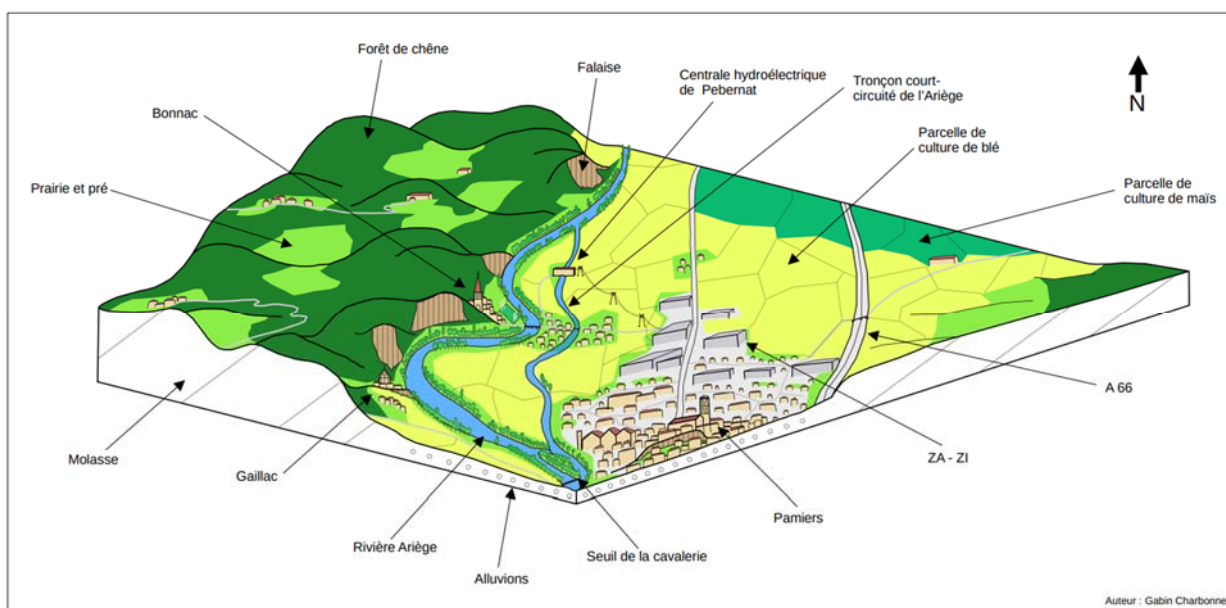
Hydrogéomorphologie de l'Ariège : géohistoire, indicateurs de suivi et atlas cartographique

Dans le cadre de la réflexion du SYMAR Val-d'Ariège et de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) autour du bon état écologique des cours d'eau, la promotion 2021-2022 du Master 2 GEMO s'est vu missionner l'approfondissement des connaissances sur l'évolution et le suivi hydromorphologique du cours d'eau, ainsi que de sa continuité sédimentaire.

Dans un premier temps, un état de l'art présentant les plans de gestion sédimentaire sur des cours d'eau comparables à l'Ariège a été réalisé et livré indépendamment du présent rapport. L'objectif de ce travail bibliographique est de caractériser le transit sédimentaire et les différentes perturbations qui peuvent l'altérer, ainsi que présenter des mesures de restauration qui ont été mises en place en France, sur des cours d'eau ayant les mêmes problématiques que la rivière Ariège. En complément de ce travail bibliographique, a été menée une étude qualifiée de « travaux pratiques », localisée sur le tronçon fluvial allant de la chaussée de la Cavalerie à Pamiers jusqu'à l'aval de la commune de Saverdun en limite du département. Ce secteur de l'Ariège est caractérisé par une problématique de déficit sédimentaire, vraisemblablement causé par la présence de la concession hydroélectrique de Pébernat dont le canal d'amenée court-circuite 7 km de rivière.

Le document qui suit porte sur l'étude pratique réalisée par le Master 2 GEMO. La commande est divisée en trois sous-missions :

- Un travail géo-historique, permettant de mieux comprendre l'évolution du tronçon court-circuité de Pébernat, notamment depuis la création de l'usine en 1947 ;
- Un travail cartographique visant à actualiser l'étude sur l'espace de mobilité du cours d'eau, réalisée par le bureau d'étude AGERIN en 2012 ;
- Une proposition d'indicateurs permettant de suivre l'évolution hydromorphologique de l'Ariège.



**FIGURE 1 - BLOC DIAGRAMME PAYSAGER : LE PAYSAGE STEREOTYPE
AU NIVEAU DU TRONÇON COURT-CIRCUITE DE PEBERNAT**

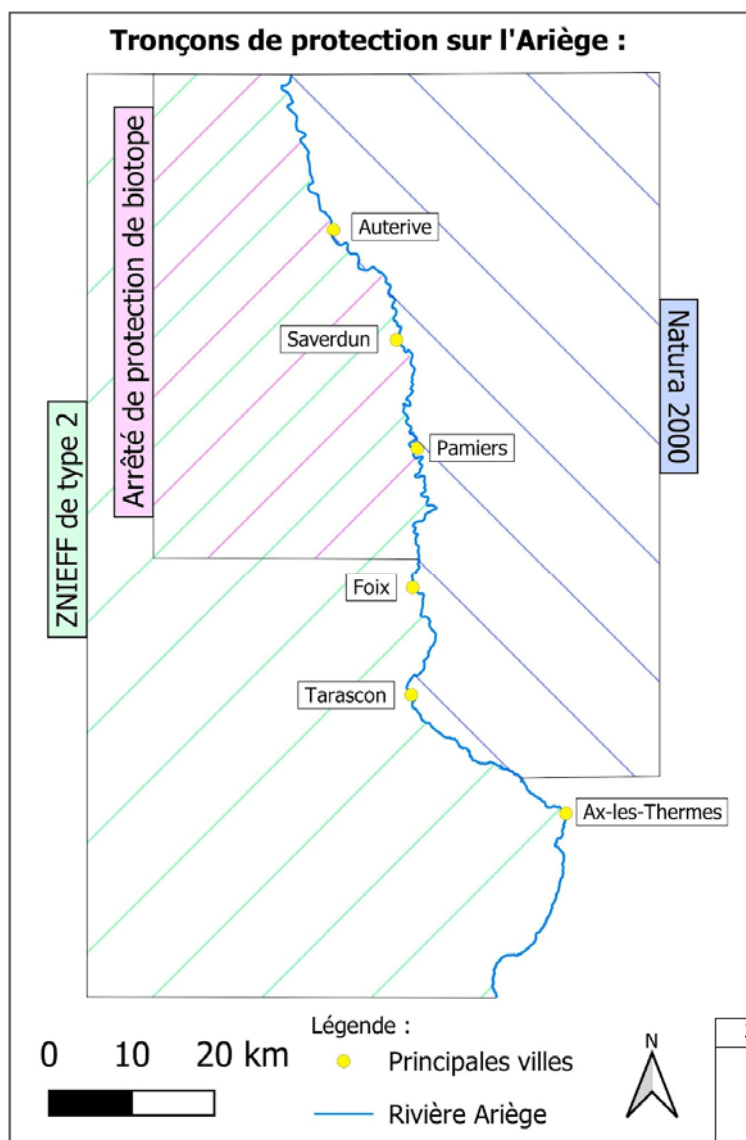
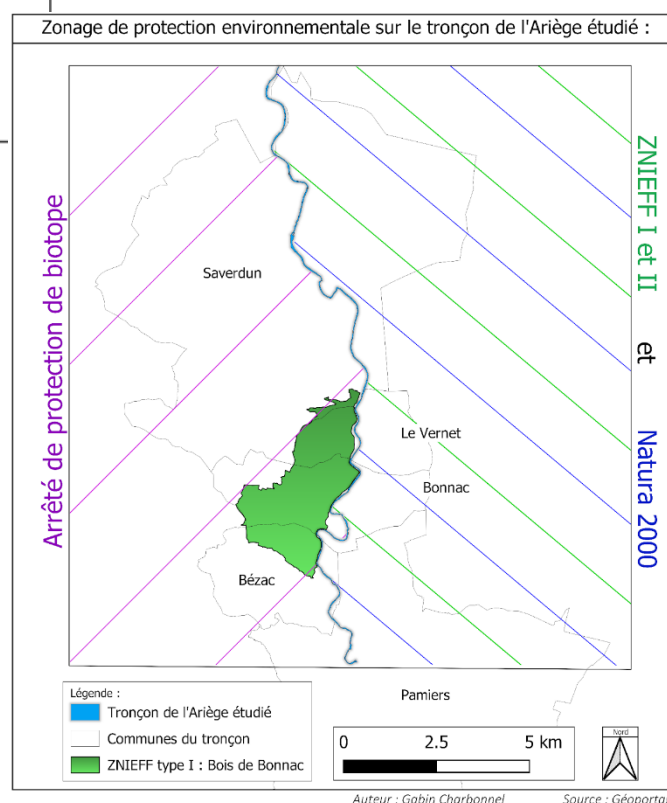


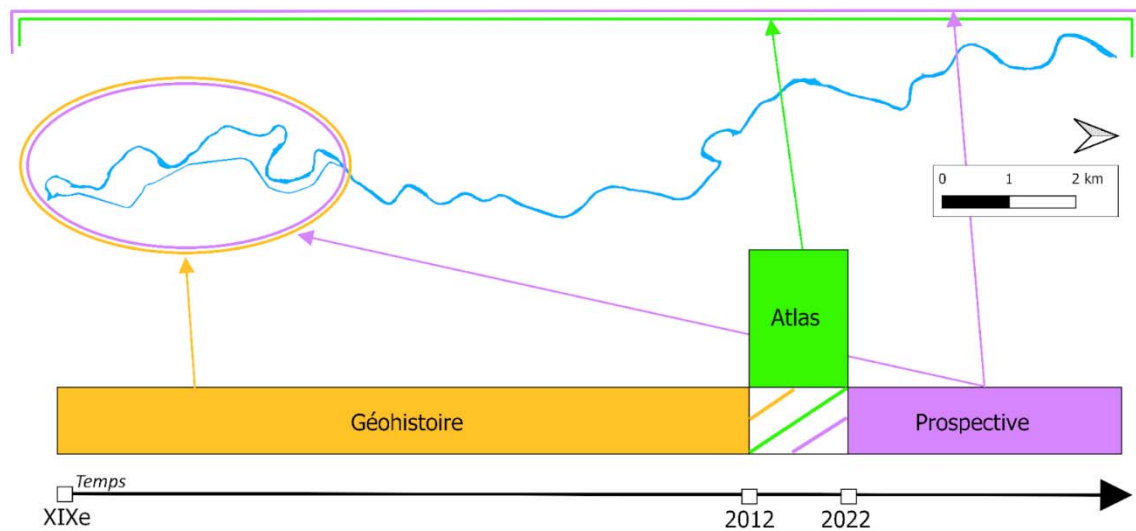
FIGURE 2 - REPRESENTATION DES DIFFERENTS ZONAGES DE PROTECTION LE LONG DE L'ARIEGE, ET SPECIFIQUEMENT SUR NOTRE ZONE D'ETUDE.

Le linéaire de l'Ariège est concerné par des zonages de protection justifiés par de nombreux enjeux environnementaux.

A l'échelle de la zone d'étude, le cours d'eau est concerné par la réglementation Natura 2000 (notice Natura 2000 en cas de réalisation de travaux...) et d'un arrêté de protection de biotope, lui aussi contraignant au niveau administratif. Le tronçon est aussi inclus dans des ZNIEFF de type 1 et 2 (Zone Naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique). Toutefois, les ZNIEFF sont des zonages d'inventaire scientifiques et ne sont pas contraignants au niveau administratif. Leur présence souligne tout de même la présence d'espèces sensibles.



Dans cette étude seront mobilisées différentes échelles spatiales et temporelles. Une première partie portera sur une approche géohistorique autour du cours d'eau de l'Ariège sur le tronçon court-circuité de Pébernat, depuis la mise en place des premiers ouvrages jusqu'à aujourd'hui. Une deuxième partie fera l'objet d'un travail de cartographie sur l'ensemble de la zone d'étude, de la chaussée de la Cavalerie à Pamiers jusqu'à la limite de la commune de Saverdun, et donc du département. Elle a pour objectif d'actualiser des données sur la géométrie du cours d'eau datant d'une étude de 2012. Enfin, une dernière partie détaillera les protocoles de suivi hydrogéomorphologique du cours d'eau, plus précisément appliqués au tronçon court-circuité. Toutefois, ce protocole peut être applicable à l'ensemble du cours d'eau.



**FIGURE 3 - REPRESENTATION DES DIFFERENTS AXES DE TRAVAIL
SELON DIFFERENTES ECHELLES TEMPORELLES ET SPATIALES UTILISEES.**

- 1^{ère} partie -

Géohistoire de l'Ariège à Pamiers et Bonnac du milieu du XIX^{ème} siècle à nos jours

Dans le cadre des réflexions relatives au volet hydromorphologique de l'Ariège et aux actions de recharge sédimentaire sur les secteurs déficitaires, notamment entre la chaussée de la Cavalerie à Pamiers et l'aval de la commune de Saverdun, et en vue de compléter la commande du SYMAR Val d'Ariège, une approche géo-historique a été réalisée.

Majoritairement centrée sur le tronçon court circuité d'une longueur de 7 kilomètres à l'amont de la centrale hydroélectrique de Bonnac, cette approche est déclinée sous plusieurs formes. Dans un premier volet nous avons rassemblé des données recueillies à la fois aux Archives départementales de l'Ariège et aux Archives communales de Pamiers, ainsi que des témoignages de riverains quant à leur perception du cours d'eau et de son évolution. Ce travail d'archives nous a amené à examiner un certain nombre de documents, plans, ou encore images dans une optique de recontextualisation historique et d'aide à la compréhension de l'évolution et du fonctionnement du tronçon.

Nous avons d'autre part mené une campagne de rephotographie afin de démontrer les évolutions morphologiques et plus largement paysagères du cours d'eau et de ses abords. Une démarche d'enquêtes auprès de locaux et des riverains a également été réalisée de manière à venir compléter les données archivistiques et à restituer plus précisément l'historique des pratiques en lien avec le milieu fluvial.

L'objectif de cette approche géohistorique a été de tracer la trajectoire du cours d'eau via la mise en lumière de ses caractéristiques géomorphologiques et de leurs évolutions au fil de la transformation des pratiques et des infrastructures d'une part, et, d'autre part, à travers la perception des riverains et autres usagers sur un milieu qui s'avère finalement être un élément patrimonial remarquable, lui-même garant d'un certain lien social.

I. Méthodes de travail

a) Revue archivistique et bibliographique

Nous avons commencé par nous documenter à la fois dans les différentes Archives publiques (départementales, municipales), et via la bibliographie (essentiellement en ligne).

Aux archives, nous nous sommes essentiellement concentrés sur les séries S et W qui concernent des données relatives aux « Travaux publics » (XIX^e siècle-1940) pour la première et concernant des versements postérieurs à 1940 pour la seconde. Les documents sur la centrale hydroélectrique de Pébernat et le tronçon court-circuité consistent pour la grande majorité en une série de courriers, rapports, devis de prestataires de services, plans, coupes et profils en long de la rivière. Nous avons complété cette revue textuelle et iconographique par la recherche de photos anciennes d'une part (qui ont plus tard servi à la campagne de rephotographie), et par une étude cadastrale d'autre part. Nous avons comparé le cadastre napoléonien avec les plans actuels de Pamiers et Bonnac, afin de voir si la morphologie et l'emplacement de l'Ariège avaient évolué depuis le début du XIX^{ème} siècle.

Pour ce qui est de la partie bibliographique, nous nous sommes concentrés sur la thèse d'Alexis Mercier (1999) sur l'évolution de la morphologie de l'Ariège. Nous avons également consulté quelques ouvrages à la bibliothèque municipale de Pamiers et à la Bibliothèque d'Études et du Patrimoine de Toulouse, mais sans réellement utiliser ces documents (données peu pertinentes ou peu significatives).

b) Travail de terrain : entretiens et visite de la centrale hydroélectrique

En complément du travail archivistique, nous avons mené des entretiens avec les acteurs du territoire afin de connaître la perception des riverains sur l'évolution de l'Ariège. Nous avons donc rencontré des riverains, des élus et d'anciens salariés travaillant sur les aménagements hydroélectriques du secteur. Ce volet de notre travail d'enquête a sans doute été le plus complexe à mettre en place. Il a fallu contacter, parfois à de nombreuses reprises, de nombreux acteurs de terrain. Nombre d'entre eux n'ont pas pu donner suite à notre demande.

A notre grand regret, nous n'avons presque pas eu l'opportunité d'interroger des habitants. La raison est purement logistique : il était compliqué de joindre spécifiquement les riverains de l'Ariège, et de les convaincre de répondre à des inconnus. De plus, la pandémie de Covid-19 ne nous a pas facilité la tâche (difficultés à entrer chez les particuliers).

Enfin, l'entreprise EDF nous a offert l'opportunité de visiter la prise d'eau de la Cavalerie et la centrale hydroélectrique de Pébernat avec un technicien. Cette visite a été très instructive, puisqu'elle nous a permis de confronter les déclarations des habitants avec les réalités du fonctionnement des installations EDF (comme par exemple le fait que peu de crues sont provoquées par des lâchers de barrages, et la population est systématiquement avertie, en vertu de la loi).

c) Campagne de rephotographie

Comme évoqué précédemment, nous avons mené une campagne de rephotographie des paysages de l'Ariège sur le tronçon. Lors de chaque entretien avec les riverains, nous demandions s'ils n'avaient pas des photographies, des cartes postales anciennes ou des plans du tronçon court-circuité par l'usine de Pébernat. Malheureusement nous n'avons aucune donnée localisée sur le tronçon court-circuité. Nous avons cependant recueilli des photographies anciennes principalement sur l'Ariège sur la commune de Saverdun. Nous nous sommes donc basés essentiellement sur ces photographies pour réaliser le travail de rephotographie.

II. Evolution des pratiques et des usages de l'Ariège

a) Les anciens usages et actuels de l'Ariège

Depuis l'apparition de populations, l'organisation des habitants a été réalisée autour des rivières car elles offrent une multitude d'avantages. Depuis la Préhistoire, la pêche est une activité essentielle en bord de cours d'eau. Elle a d'abord été vitale pour nourrir les populations riveraines. Aujourd'hui, c'est une activité de loisirs qui continue d'être exercée par une partie de la population. L'Ariège est un cours d'eau de première catégorie où le principal poisson recherché est la Truite Fario (*Salmo trutta*). Au même titre, la chasse est également exercée depuis des siècles et continue de perdurer sur le territoire de Saverdun, Bonnac et Pamiers.

Le cours d'eau de l'Ariège est aussi utilisé à des fins agricoles, notamment pour l'irrigation des cultures ou pour abreuver les animaux d'élevage de la vallée de l'Ariège. Les principales orientations agricoles du secteur sont les grandes cultures (maïs, tournesol, colza et plantes fourragères) et la polyculture-

élevage ovin et bovin. La majorité des agriculteurs ariégeois irrigants sont adhérents du Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique de la Basse Ariège (SIAHBVA) qui assure 80% de l'irrigation sur les bassins versants de l'Ariège grâce à un système de 10 stations de pompage et de nombreux réseaux d'irrigation connectés à des points de prélèvement (Chambre d'Agriculture de l'Ariège¹).

Au Moyen-Age, l'Ariège était aussi le point de départ de transport de marchandises en direction de Toulouse ou Bordeaux avec notamment la vente du vin issu du vignoble de Pamiers depuis le port Saint-Martin. Au XIXe siècle, des convois de radeaux transportant des grumes descendaient l'Ariège. Ces transports de bois par "flottage du bois" permettaient de transporter et de vendre le bois plus en aval dans les vallées et sur les plaines (source : S. Lecas et L. Claeys, Radio France Bleu Occitanie).

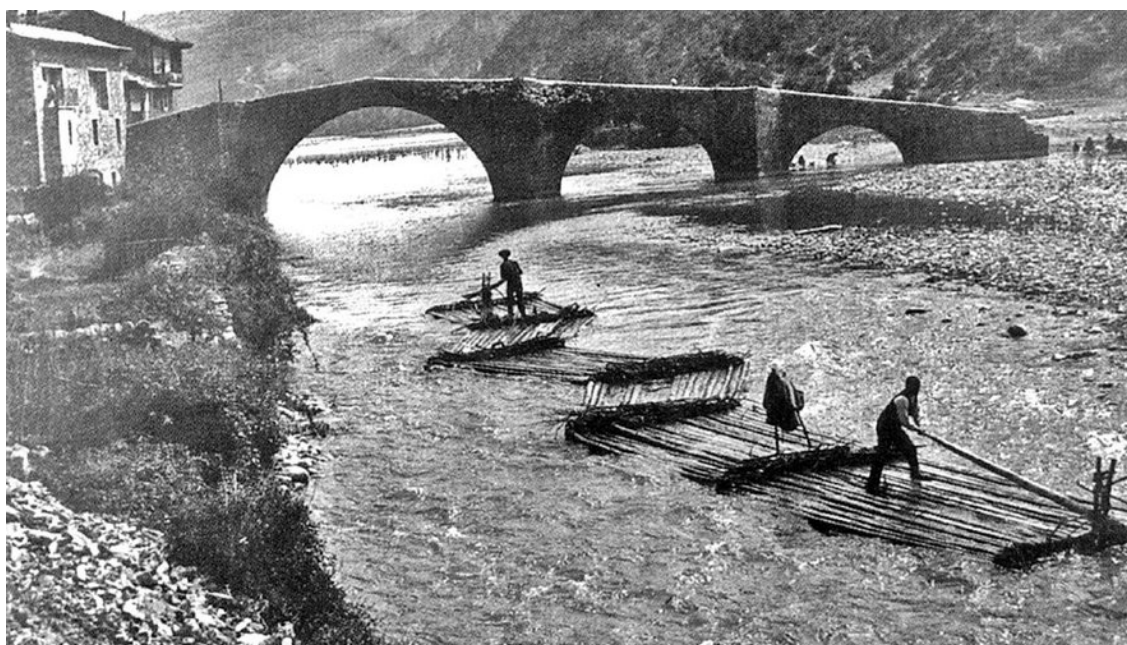


FIGURE 4 - FLOTTAGE DU BOIS DANS L'AUDE AU XIXE SIECLE. SOURCE : LA DEPECHE DU MIDI

Plus récemment, l'Ariège a vu son lit être plus lourdement aménagé, avec notamment l'installation de barrages et d'usines hydroélectriques au XXème siècle. Ces différents aménagements permettent de

réguler les flux d'eau de l'Ariège et ainsi la création d'une énergie électrique.

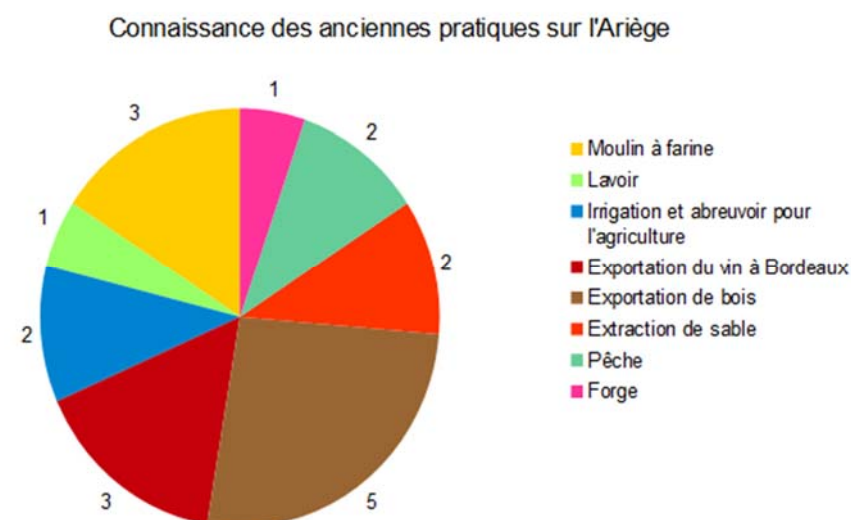


FIGURE 5 - CONNAISSANCE DES ANCIENNES PRATIQUES SUR L'ARIEGE.

¹ <https://ariege.chambre-agriculture.fr/productions-techniques/cultures/gestion-de-leau/lirrigation-en-ariege/>

Grâce aux entretiens menés avec les riverains, nous avons eu connaissance de plusieurs autres anciennes pratiques au bord du cours d'eau (Fig. 5). L'extraction de sable était pratiquée pour les constructions (confirmation par deux riverains). Les moulins à farine étaient aussi beaucoup utilisés en bord d'Ariège (3 personnes nous en ont fait part). Les lavoirs étaient aussi utilisés par les communautés riveraines. Une activité métallurgique (forge) est aussi signalée. D'une manière générale d'ailleurs, l'exploitation de la force hydraulique de l'Ariège est pratiquée depuis l'époque médiévale. Depuis cette époque, l'Homme n'a cessé de développer les infrastructures hydrauliques puis hydroélectriques avec une période fortement marquée à partir du XX^{ème} siècle.

En résumé, la majorité des usages réalisés autour de la rivière répondent à des enjeux économiques avec l'agriculture, la forge, l'élevage, anciennement la vente de bois et de produits locaux et plus récemment avec la fabrication d'électricité. D'autres pratiques répondent à la fois à des enjeux environnementaux et sociaux avec la pratique de la pêche et de la chasse.

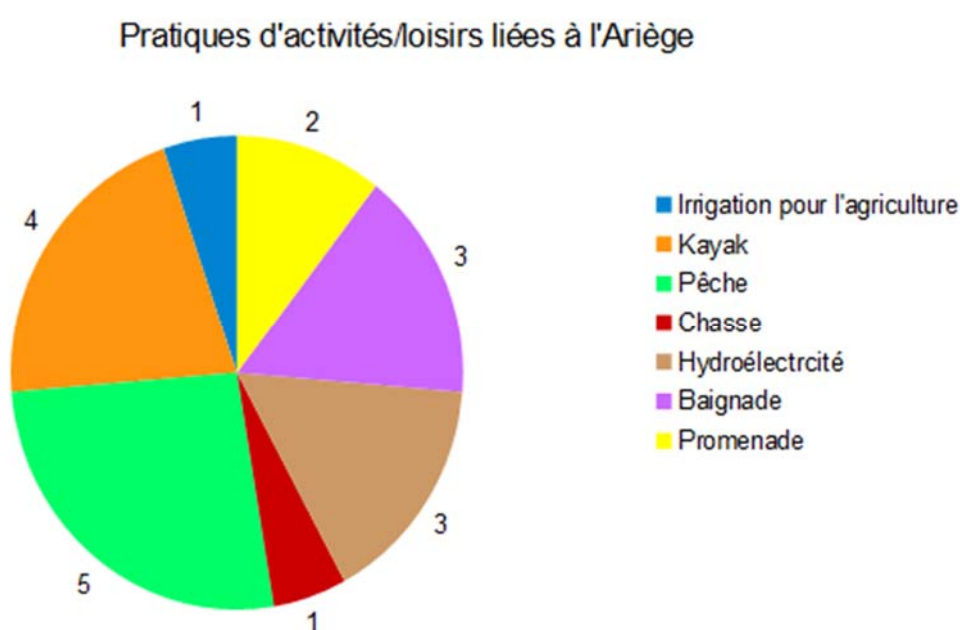


FIGURE 6 - ACTIVITES ET PRATIQUES DE LOISIRS SUR L'ARIEGE.

En plus de la pêche, la chasse, l'irrigation et l'hydroélectricité, de nouvelles pratiques émergent sur le cours d'eau. A Saverdun, un club de canoë kayak s'est installé. Cette activité sportive de loisirs est une grosse attraction autour du cours d'eau. La promenade ainsi que la baignade (essentiellement en période estivale) sont aussi des loisirs largement pratiqués le long de l'Ariège.

Lors de nos entretiens avec les riverains, ceux-ci nous ont fait part de l'importance du cours d'eau dans leur quotidien. L'Ariège et ses berges sont également un lieu de rencontre ou de détente, les riverains vont très régulièrement profiter de celle-ci seul ou avec leur proches pour passer le temps ou pour effectuer des promenades régulières...

b) Les évolutions de l'Ariège observées au fil du temps

L'Ariège a toujours été un élément essentiel du quotidien de ses riverains. Elle est d'une grande importance pour eux. De plus, les riverains ont conjugué différents usages du cours d'eau qui, avec le

temps, ont pu perturber l'équilibre de celui-ci. Différentes problématiques comme l'érosion et l'incision du lit, le déficit sédimentaire affectent fortement le cours d'eau...

L'érosion des berges à Pamiers est un enjeu connu depuis au moins le début du XXème siècle. A Bonnac, la principale problématique sur le cours d'eau semble être la construction de l'usine de Pébernat. Depuis quelques années, les élus locaux s'inquiètent de l'érosion des berges qui, selon eux, pourrait à terme menacer voire détruire certaines habitations. Parmi les alluvions que charrie l'Ariège, le sable semble avoir toujours constitué une partie de la charge solide régulièrement utilisée. On retrouve ainsi des documents datant de la seconde moitié du XIXème siècle accordant des droits de fermage à un paysan sur des sablières exploitées. Toutefois, la dernière crue (10 janvier 2022) a laissé sur les berges des bancs de sable pouvant atteindre deux à trois mètres de haut, constituant de véritables petites îles. Or, un riverain venant de les découvrir a déclaré, stupéfait, que c'était la première fois en 80 ans qu'il assistait à un tel phénomène. S'il s'agit d'un témoignage isolé, ce phénomène, par son caractère spectaculaire, semble témoigner d'une certaine vigueur des événements extrêmes contemporains de l'Ariège.

Durant tout le XXème siècle, le Conseil municipal de Pamiers, souvent sous l'impulsion des riverains de l'Ariège, a cherché à lutter contre les dommages générés par les crues de l'Ariège. Il s'agissait exclusivement de génie civil lourd (des enrochements pour l'essentiel, mais un creusement du lit, finalement abandonné, a été envisagé à la fin du siècle). A Bonnac, les terrains de sport municipaux ont été protégés par des merlons. Aujourd'hui, ces moyens de lutte sont obsolètes car ils ne font finalement qu'aggraver une situation déjà impactée par les modifications du cours de l'Ariège. Or, si de nombreux habitants de la commune de Bonnac sont informés du bien-fondé de la démarche du SYMAR-VA, certains, plus réticents, continuent à militer de façon active ou passive pour le maintien de ces aménagements. Les motivations sont de deux ordres : dans un premier temps, la crainte de voir leurs terrains inondés, voire emportés par les crues de l'Ariège, puis dans un second temps, une réticence à voir changer un paysage que les riverains connaissent depuis toujours et auquel ils sont fortement attachés. En revanche, comme le montrent les résultats des entretiens menés sur le terrain, les habitants des communes voisines ne sont pas informés de cette problématique et ne sont donc pas informés des démarches menées par le SYMAR-VA.

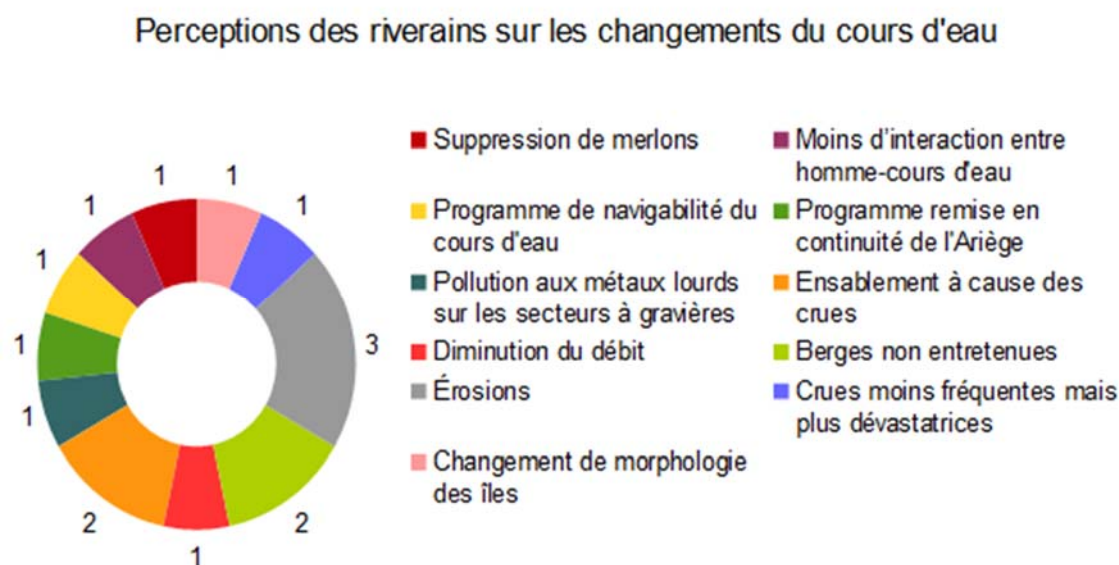


FIGURE 7 - PERCEPTION DES MODIFICATIONS DE L'ARIEGE PAR LES RIVERAINS

Au cours de nos entretiens (Fig. 7), nous nous sommes rendu compte que la grande majorité des changements observés par les riverains étaient l'érosion des berges et des méandres, le non entretien des berges ainsi que l'ensablement lié aux crues. D'autres observations moins fréquentes nous ont été signalées : la suppression de merlons, la pollution aux métaux lourds sur les secteurs de gravières, le changement morphologique des îles, les crues moins fréquentes mais plus dévastatrices, la diminution du débit, la diminution des interactions entre les populations et le cours d'eau, le projet de navigabilité du cours d'eau et le programme de restauration de la continuité écologique du cours d'eau.

Sur les 11 types d'observations notées, au moins 6 concernent la modification morphologique du cours d'eau. Deux observations impliquent les interactions des riverains avec le cours d'eau et le programme de « re-navigabilité » de l'Ariège. Une des observations a un lien direct avec les aménagements hydroélectriques et la diminution du transit sédimentaire dans le cours d'eau, c'est le programme de remise en continuité du cours d'eau de l'Ariège. Ce programme qui s'applique de Foix jusqu'à la confluence Garonne-Ariège est un fort enjeu environnemental.

Lors des entretiens que nous avons menés auprès des riverains de l'Ariège, la majorité des personnes que nous avons rencontrées ont décrit le cours d'eau de l'Ariège comme un milieu naturel. En revanche, quelques habitants ont conscience que le cours d'eau est fortement anthropisé comme nous le montrent les photos ci-après. L'Ariège est depuis des siècles un milieu fortement anthropisé plus ou moins directement, avec des infrastructures quelquefois masquées par certains paramètres naturels.

Cette anthropisation perturbe l'équilibre écologique du cours d'eau. La forte présence des barrages, seuils ou canaux de l'Ariège vient perturber le transit et le transport des matériaux se trouvant dans le lit mineur. Des bancs de sable, des zones d'accumulation de matériaux apparaissent tout au long du cours d'eau. Plusieurs études, telle la thèse d'Alexis Mercier, nous montrent que de nombreuses données sont assez contradictoires. Cette problématique pose la question de l'ampleur de l'anthropisation du cours d'eau dans un bassin versant fortement équipé en aménagements hydroélectriques. Toutes ces infrastructures construites par l'Homme font de l'Ariège un système fluvial complètement déstabilisé par l'omniprésence des interfaces humaines impactant la faune et la flore du cours d'eau.

Aujourd'hui, les infrastructures ont rendu l'alimentation en matériaux pratiquement nulle, malgré une volonté des collectivités de remédier à ce problème. De plus, l'extraction de granulats dans les gravières n'a fait qu'accentuer localement ces carences.

c) Paysages de l'Ariège : importance et évolutions

L'Ariège a subi beaucoup de modifications morphologiques depuis la fin du XIXe siècle. Ces modifications ont entraîné une évolution paysagère marquante. Sur un plan géomorphologique, le bassin versant de l'Ariège dépend des montagnes ariégeoises situées en amont proche et qui donnent à ce cours d'eau ses caractéristiques de système fluvial à haute énergie. L'anthropisation du bassin versant de l'Ariège est très ancienne, les activités agricoles y sont installées depuis plusieurs siècles voire millénaires. Ces grands traits du paysage sont en place depuis l'Antiquité. Grâce au travail de rephotographie, nous avons pu observer les évolutions paysagères de certains secteurs de l'Ariège, notamment sur la commune de Saverdun.

Les deux clichés de la figure 8 ont été pris depuis la rive droite de l'Ariège, au niveau de la chaussée de la régie électrique de Saverdun en face de la cour Gaspard. La photographie de gauche date des années 1900, celle de droite de Février 2022.



FIGURE 8 - POINT DE VUE SUR LA REGIE ELECTRIQUE EN RIVE GAUCHE A SAVERDUN VERS 1900 ET EN 2022

A première vue on remarque que la végétation de la rive droite a poussé, avec de nombreux arbustes et quelques arbres. La chaussée n'a pas évolué mais nous observons l'apparition d'une plage de galets en aval de la chaussée (sur la photo de droite), ce qui illustre une fois de plus la problématique liée à la recharge sédimentaire du cours d'eau, ces zones de stockage de matériaux sont causées par les infrastructures hydroélectriques mises en place. Nous remarquons cependant de nouveaux bâtiments construits à côté de la cour Gaspard.



FIGURE 9 – AUTRE POINT DE VUE DE LA REGIE ELECTRIQUE DE SAVERDUN VERS 1900 ET 2022

Les photos de la figure 9 ont aussi été prises depuis la rive droite, en face de la régie électrique de Saverdun. La photographie de gauche date des années 1900, celle de droite de Février 2022. Nous observons quelques changements, principalement au niveau des façades des bâtiments qui ont été rénovés ou agrandies. Au niveau de la régie, des murets ont été bâtis, ils permettent l'écoulement de l'eau. Une écluse vert foncé a aussi été mise en place sur la photo de droite. Comme nous avons pu le constater précédemment, nous remarquons ici aussi la formation du banc de galets.



FIGURE 10 - REGIE ELECTRIQUE DE SAVERDUN EN RIVE DROITE VERS 1900 ET EN 2022

Le point de vue présent de la figure 10 se situe sur la rive droite de l'Ariège. Nous y observons un des bâtiments de la régie électrique de Saverdun. Nous remarquons une évolution au niveau des équipements hydroélectriques avec l'implantation de murettes en béton pour la création d'une passe à canoë. La chaussée ne semble pas avoir évolué. La ripisylve sur les berges s'est développée. Nous remarquons aussi la présence de nombreux arbres et arbustes. Nous constatons aussi une urbanisation des berges de l'Ariège avec la construction de résidences et de maisons.



FIGURE 11 - PONT DE SAVERDUN DANS LES ANNEES 1990 ET EN 2022

Sur la figure 11, nous observons le pont de Saverdun depuis le quai Roussille. La photo a été prise au début des années 1990. Sur ces clichés, nous ne remarquons pas de grandes évolutions si ce n'est l'entretien des berges. La ripisylve est toujours présente et les bâtiments aussi.



FIGURE 12 - PONT DE SAVERDUN VUE DE LA RIVE GAUCHE VERS 1990 ET EN 2022

Nous retrouvons ici le pont de Saverdun avec un point de vue sur la rive gauche. Le cliché de gauche a été pris dans les années 1900. Quelques changements apparaissent avec la mise en place de barrières de protection sur le pont à la place des murettes en pierre. L'urbanisation a aussi évolué. Certains

bâtiments n'existent plus aujourd'hui et d'autres ont été restaurés voire remplacés par de nouveaux. Au niveau hydraulique, nous n'observons pas de grands changements, le niveau d'eau semble être assez similaire sur les deux photographies. Sur la figure 13, nous remarquons aussi que les murets de pierre ont été remplacés par des barrières de protection sur le pont. Le cliché de gauche date de 1910, celui de droite de février 2022. Nous observons également que la ripisylve s'est beaucoup développée. Dans ce cas, la végétation est essentiellement composée de bambou. Le lit de la rivière, ainsi que le niveau de l'eau ne semblent pas avoir évolué.

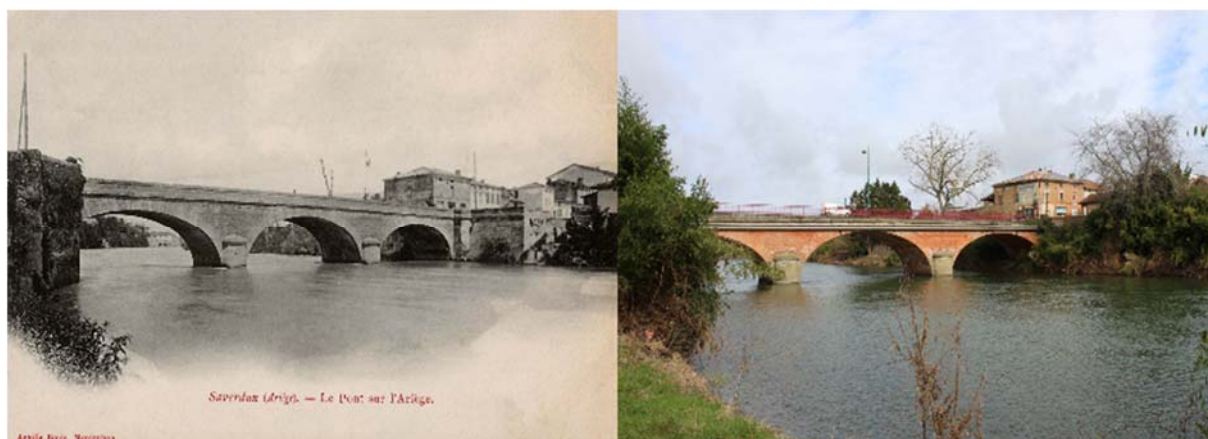


FIGURE 13 - RIVE GAUCHE DU PONT DE SAVERDUN EN 1910 ET 2022

Ces deux nouvelles photographies du pont de Saverdun (Fig. 14) ont été prises en 1978 et en Février 2022 depuis la rive gauche. Nous pouvons remarquer les mêmes évolutions que les clichés précédents avec un fort développement de la ripisylve, sur la photographie de droite, l'augmentation de la végétation est dû à un manque d'entretien de la berge.



FIGURE 14 - PONT DE SAVERDUN EN 1978 ET 2022



FIGURE 15 - QUAI ROUSSILLES A SAVERDUN VERS 1900 ET AUJOURD'HUI

La prise de vue de la figure 15 a été faite depuis le pont de Saverdun. Nous remarquons que la ripisylve a diminué sur la rive gauche. La berge ainsi que les infrastructures autour du quai sont toujours présentes et ont peu évolué.

La figure 16 présente une photo de l'Ariège, juste en aval du pont de la voie ferrée. La photographie de gauche a été prise en 2013, la deuxième en février 2022. Nous ne pouvons pas observer les plages de galets et les affleurements rocheux sur la photo de droite car le niveau de l'eau est élevé mais en saison estivale nous pouvons les observer. La ripisylve se développe sur les deux berges.

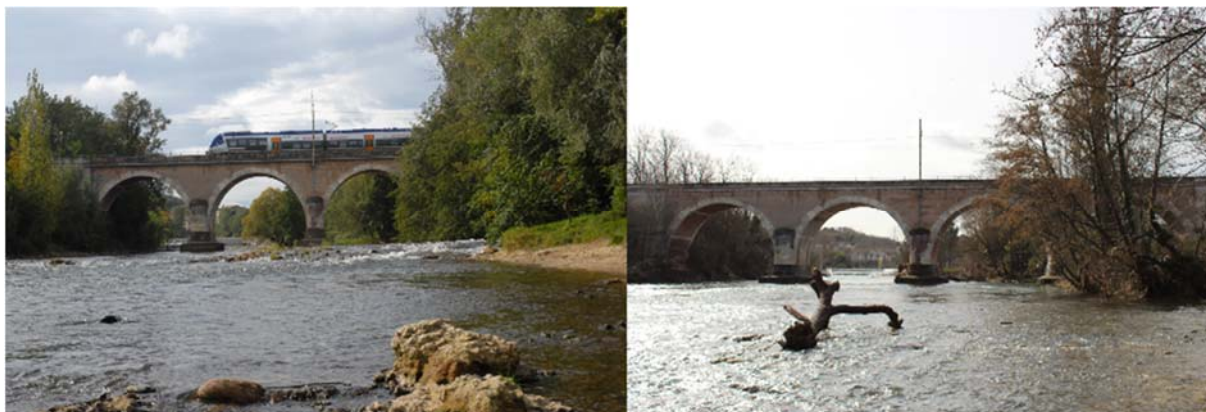


FIGURE 16 - PRISE DE VUE DE L'ARIEGE DERRIERE LE PONT DE LA VOIE FERREE EN 2012 ET 2022

En comparaison sur la figure 17, sur le point de vue situé sur la rive gauche en aval du pont de la voie ferrée, nous observons nettement une forte évolution de la ripisylve. De nombreux arbres ont poussé sur la berge. Le point de vue mettant le pont en valeur s'est refermé au fil des années. Ceci nous montre que les berges sont actuellement moins entretenues et sûrement moins utilisées qu'en 1940.



FIGURE 17 - L'ARIEGE VUE DU PONT DE LA VOIE FERREE DEPUIS LA RIVE GAUCHE EN 1940 ET EN 2022

La figure 18 ci-après illustre bien la vision de certains riverains, qui perçoivent le cours d'eau de l'Ariège comme un milieu très perturbé par les différentes infrastructures mises en place (présence de prise d'eau pour la turbine de la centrale au premier plan, puis présence d'un seuil au second plan). Comme nous avons pu le remarquer sur cette campagne de rephotographie, on peut remarquer que l'Ariège est un cours d'eau où l'anthropisation est omniprésente. Ses paysages fluviaux sont en intégralité façonnés par l'Homme qui a su modeler le territoire à sa guise. Ces photographies illustrent d'une très bonne manière ce qu'est un système fluvial anthropisé. La forte anthropisation de l'Ariège montre une baisse de la sinuosité depuis le début des années 1920. C'est une caractéristique propre aux rivières qui évoluent vers un lit rectiligne. Cette dynamique s'installe progressivement par une diminution de l'amplitude et de la longueur d'onde des méandres à l'occasion des fortes crues.



FIGURE 18 - CENTRALE HYDROELECTRIQUE DE SAVERDUN, PRISE DEPUIS LE PARKING DE LA CAVALERIE

III. Evolution du tronçon court-circuité de Pamiers-Bonnac

a) Evolution morphologique de l'Ariège

L'histoire de l'aménagement des cours d'eau ariégeois suit celle des autres cours d'eau français. La canalisation, le « corsetage » de l'Ariège date, dans la plupart des grandes villes d'Ariège, du Moyen-Age. Or, note Alexis Mercier dans sa thèse, Pamiers fait figure d'exception en ce qu'elle a canalisé plus tardivement l'Ariège (Mercier, 1999). Aujourd'hui cependant, la dynamique urbaine de Pamiers est diamétralement opposée à celle du XIXème siècle : la périurbanisation y connaît une telle expansion qu'elle empiète maintenant sur la bande de divagation de l'Ariège. La conséquence de cela est la menace, par l'érosion latérale, de certaines infrastructures.

Pour ce qui est de l'évolution baissière du transport sédimentaire, plusieurs causes sont possibles. La première est celle de la diminution des débits morphogènes. La question des débits morphogènes est complexe, car le changement climatique, couplé aux profondes modifications de la morphologie et du fonctionnement hydrologique des cours d'eau, ont des conséquences à double tranchant : d'une part, les débits morphogènes deviennent moins fréquents, mais d'autre part, ils deviennent plus violents. La deuxième est plus connue, il s'agit des barrages, qui peuvent piéger les sédiments. Enfin, même si elle n'existe plus (ou ne devrait plus exister) aujourd'hui, l'exploitation des granulats dans le lit mineur a longtemps été une source de déséquilibre dans la continuité sédimentaire des cours d'eau.

A propos du changement climatique évoqué plus haut, la thèse d'Alexis Mercier l'évoque indirectement lorsqu'elle expose le basculement vers une méditerranéisation du climat ariégeois. Les conséquences sont un déplacement de la saison des crues du printemps vers l'automne sans

conséquences pour les saisons hydrologiques d'été et d'hiver. De la même manière, les épisodes extrêmes s'accroissent encore davantage, sans pour autant que les débits moyens s'en ressentent (ce qui est logique, puisque les étiages comme les crues deviennent plus prononcés). Toutefois, depuis les années 1970, la progression d'une végétation plus cohérente sur les bords de l'Ariège diminue l'efficacité des crues morphogènes.

Concernant la nappe phréatique de la falaise de Bonnac, s'il n'est pas exact de dire qu'EDF est responsable de sa vidange, il semblerait qu'une modification de son fonctionnement affecte profondément l'équilibre hydrologique de la plaine de Pamiers.

b) Evolution des aménagements à Pébernat

Les premiers aménagements à Pébernat (moulins, usines hydroélectriques)

Depuis l'époque médiévale, aux alentours des XII^{ème}-XIII^{ème} siècles, un moulin farinier est attesté sur la commune de Bonnac. Ce moulin (et tous les moulins de la région) appartenant aux seigneurs locaux, ont été la pierre angulaire de l'économie rurale en France et en Europe jusqu'au début du XIX^{ème} siècle, grâce à la fabrication du pain, base de l'alimentation. Le moulin de Bonnac est racheté par un particulier dans le dernier quart du XIX^{ème} siècle, et son canal d'amenée servira pour la scierie Dielh mais aussi pour l'irrigation des champs.

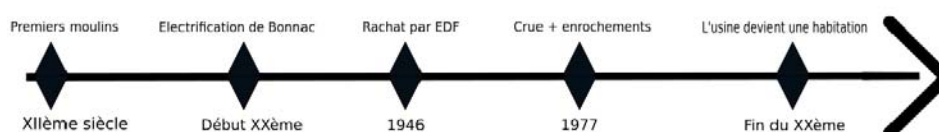
Au début du XX^{ème} siècle, avec l'essor de la production électrique, la Banque Clarac (déjà propriétaire d'une centrale hydro-électrique au Mas d'Azil) rachète le moulin ainsi que le canal d'amenée et les droits d'eau pour le transformer en centrale hydro-électrique. Grâce aux travaux d'agrandissement réalisés juste avant la Première Guerre mondiale, notamment sur le canal d'amenée, la capacité en d'alimentation en eau de Pebernat augmente et une électrification de Bonnac est possible.

Après sa vente en 1937 à la « Compagnie de distribution électrique du Midi », l'usine de Pebernat est nationalisée juste après la Seconde Guerre mondiale en passant aux mains d'EDF-GDF. En effet, dans le cadre du redressement économique de la France et de l'adoption du Plan Marshall, des besoins en énergie importants se sont fait ressentir.

Toutefois, en 1969, l'usine et son canal d'amenée ne sont plus assez rentables et sont vendus à un particulier. Dans le dernier quart du XX^{ème} siècle, l'usine perd petit à petit sa fonction première au profit d'une transformation progressive en habitation.

Aujourd'hui, quasiment aucun témoignage de l'ancienne activité électrique n'est décelable : le canal de fuite est complètement bouché et sert de jardin à un particulier, l'ancienne scierie a été reconvertie en habitation et seul le canal d'amenée a été en partie conservé.

FIGURE 19 - TRAJECTOIRE DES AMENAGEMENTS DE PEBERNAT



Comparatif cadastre napoléonien / Géoportail

Lors de nos recherches aux Archives de Foix et de Pamiers, nous avons eu accès au cadastre napoléonien, réalisé au cours du XIX^{ème} siècle. L'utilisation de ce cadastre est intéressante car elle permet d'avoir une vision précise du territoire il y a 150 ans. De plus, aujourd'hui il est facile via le Géoportail de l'IGN de comparer l'évolution et les changements d'un cours d'eau en comparant ces archives à une carte actuelle (IGN...) ou à des données issues de l'imagerie satellitale.



FIGURE 20 - CARTE IGN TOPO ET CADASTRE NAPOLEONNIEN DU TRONÇON A MEANDRE DE BONNAC. SOURCE : GEOPORTAIL

Plusieurs changements concernant le méandre de l'Ariège au niveau de Bonnac sont observables sur la figure 20. En premier lieu, au sud de la carte IGN, nous pouvons observer l'apparition d'un méandre, mais aussi au nord de la carte, avec dans les deux cas l'apparition d'îlots séparant ainsi le cours d'eau en plusieurs bras. Nous pouvons remarquer qu'un îlot est apparu en dessous de l'ancien barrage. Nous pouvons supposer que cet îlot s'est formé à la suite de la construction du barrage, qui a entraîné une réduction du débit et donc la formation de zones de dépôts. De plus, une des transformations majeures sur ce tronçon se situe sur la zone de l'actuel stade. En effet, à cet endroit, le cours d'eau s'est considérablement rétréci et la zone a été exondée. Nous pouvons voir que le canal de Pebernat change radicalement la physionomie du paysage.

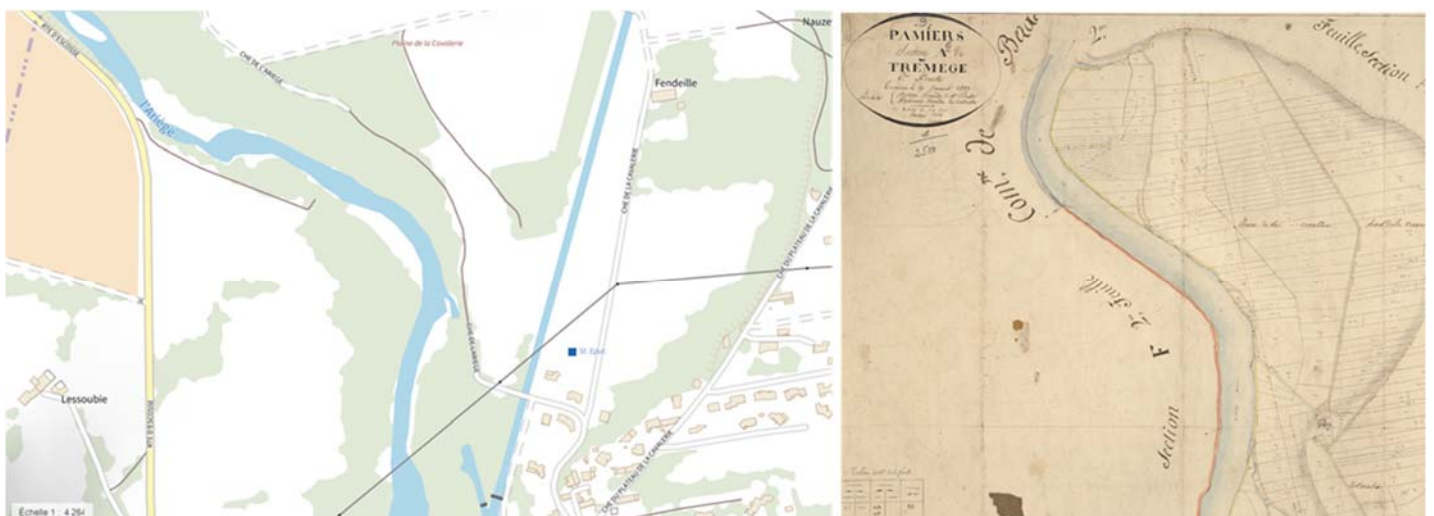


FIGURE 21 - CARTOGRAPHIES IGN TOPO ET CADASTRE NAPOLEONNIEN DU TRONÇON COURT-CIRCUITE DE LA CAVALERIE A PAMIERS. SOURCE : GEOPORTAIL

Sur le plan cadastral de Pamiers visible sur la figure 21, situé sur la plaine de la Cavalerie, là où débute le tronçon court-circuité, nous pouvons voir plusieurs changements. Tout d'abord, on peut voir que le canal de Pébernat modifie sensiblement la morphologie de cette plaine de la Cavalerie. De plus, le cours de l'Ariège a beaucoup évolué et sa largeur semble avoir diminué. Ici aussi, plusieurs zones de dépôts se sont créées, formant des îlots qui, pour certains, se sont végétalisés au fil du temps.

Avec ces deux comparaisons (ainsi que d'autres réalisées hors-tronçon court-circuité), nous pouvons penser que tous les ouvrages, qu'ils soient récents ou plus anciens, plus ou moins gros, en amont ou en aval, peuvent avoir un impact sur les cours d'eau. En effet, ces ouvrages vont « artificialiser » les cours d'eau ainsi que leur morphologie, notamment en réduisant le débit dans le lit mineur - l'Ariège en est un bon exemple -, comme cela est visible avec l'apparition des îlots. De plus, ces ouvrages constituent également des obstacles pour le transit des sédiments mais sont aussi un frein pour la biodiversité.

Protection des populations face aux risques de crues

On retrouve dans les Archives communales de Pamiers les premières pétitions de riverains demandant à ce que des mesures de protection contre les assauts de l'Ariège soient mises en œuvre, et ce dès 1904. On construit alors des épis dirigés vers l'amont afin de créer des atterrissements sur la berge menacée et de repousser le courant vers la berge opposée. Ces épis sont protégés par des enrochements, et en partie constitués de galets directement extraits du lit de l'Ariège.

Dans les années 1950, une subvention du ministère de l'agriculture est allouée à la ville de Pamiers (660 000 francs) pour remettre en état les digues endommagées lors des crues de février 1952. Le budget total de ces réparations est estimé à 1 100 000 francs, et la ville de Pamiers doit s'engager pour assurer la conservation et le bon état des ouvrages gérés. Ces aménagements sont censés être réalisés en période de basses eaux, notamment au lieu-dit « Bourges », au sud de la Cavalerie. La réalisation de cet ouvrage est nécessaire car sur une longueur de 200 m, une partie du chemin vicinal n°9 a été fortement endommagé et une très grande partie de la maçonnerie a été emportée, créant ainsi une grande brèche dans la digue déjà en place et dans le chemin.

En 1965, des habitants des quartiers de Bourges et de la Gloriette saisissent le Conseil municipal de Pamiers, lui demandant d'entreprendre des travaux de protection de ces quartiers contre les crues de l'Ariège. Il semblerait que cette demande ait fait suite à la crue du 13 septembre 1963, particulièrement importante, qui aurait emporté des terrains et ouvert une brèche au niveau du chemin de Bourges, en plus de mettre en péril la station d'épuration et l'usine de traitement des ordures ménagères.

L'année suivante, en 1966, il est acté que des enrochements seront aménagés à cet effet le long de l'Ariège au chemin de Bourges. Par la suite, en 1968, le Conseil municipal de Pamiers a fait savoir qu'il lui paraissait indispensable de faire prolonger les enrochements afin de protéger également les berges du canal du Barriol. En 1972, une nouvelle note du Conseil Municipal déclare que les enrochements sont les seuls moyens envisageables de protection des terrains riverains contre les crues de l'Ariège. En effet, si le mouvement de son lit venait à changer, de nombreux terrains agricoles seraient endommagés.

En novembre 1977, après une nouvelle crue spectaculaire au mois de mai, une ultime campagne d'enrochements du secteur de Bourges est proposée par les Ponts et Chaussées de l'Ariège. En 1978, suite à une demande de la mairie de Pamiers, une visite est effectuée par la Direction de l'Équipement et du Logement afin de renforcer les berges le long de l'Usine métallurgique. Les conclusions sont que aucun ouvrage ne serait vraiment efficace pour contrer cette érosion, qui entraîne une descente du

talus, et ainsi retarder les glissements de terrains vers le fleuve. Toutefois, il est abordé la possibilité de renforcer les berges avec des scories de houilles provenant de l'usine voisine, afin notamment d'éviter le transport de gros matériaux par des gros camions sur un chemin déjà endommagé et sensible.

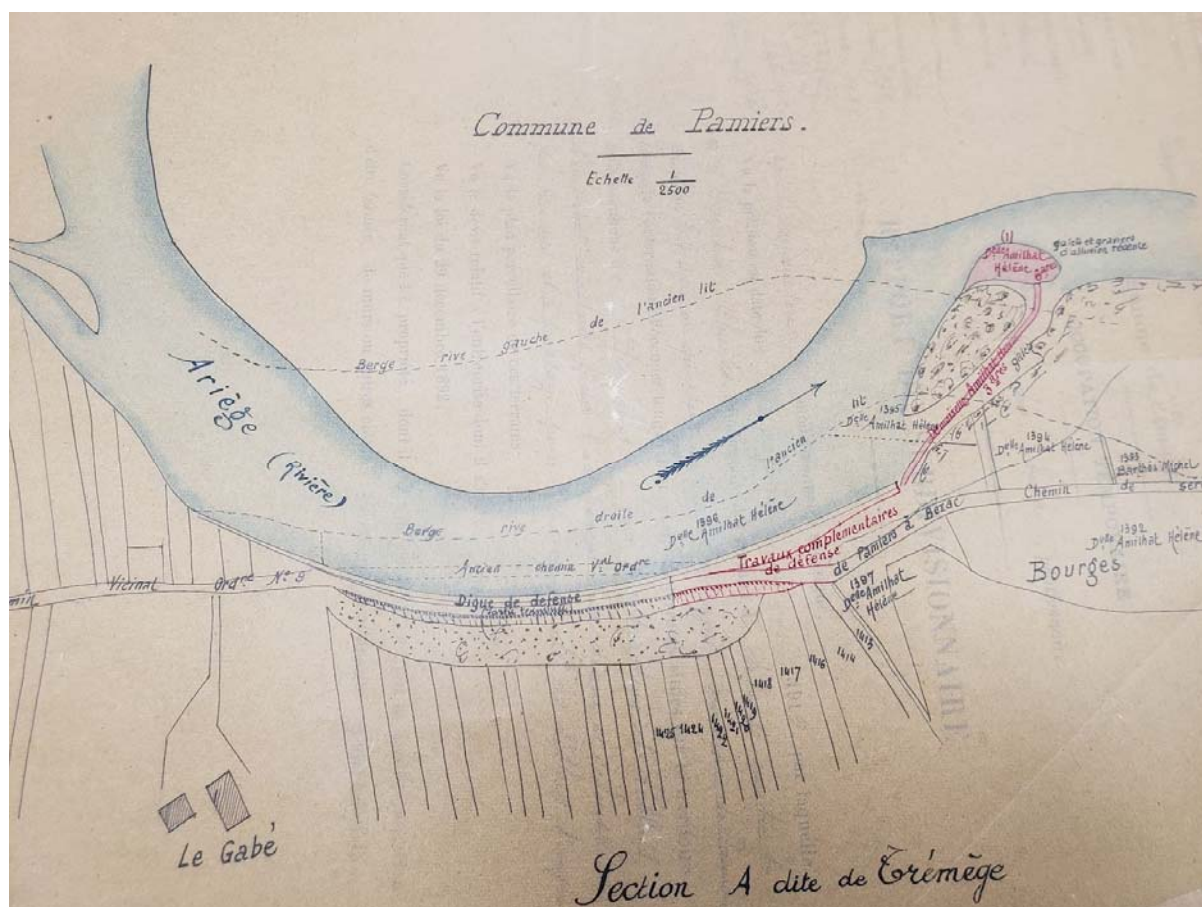


FIGURE 22 - PLAN D'AMENAGEMENT DU COURS D'EAU A BOURGES (VERS LA CAVALERIE) VERS 1950

c) Critique du travail de géohistoire

L'analyse géohistorique d'un espace, d'un paysage, vise autant à déterminer ses transformations dans le temps que les dynamiques, les trajectoires, à l'œuvre derrière ces transformations. Aujourd'hui encore, l'analyse géohistorique est à la recherche de modèles (Hugerot, 2021), en particulier l'analyse des trajectoires.

Divers outils sont pertinents pour réaliser une analyse géohistorique d'un territoire. L'intérêt réside dans le fait de les croiser afin de ne passer à côté d'aucun détail. Pour ne citer que quelques-uns de ces outils, ou méthodes, l'occupation du sol (via les SIG), l'analyse photographique et la rephotographie, ou l'analyse de données statistiques peuvent être croisées pour obtenir un résultat synthétisant tous les aspects du territoire.

Dans le cadre de l'analyse des trajectoires de l'Ariège à Pamiers et Bonnac, nous n'avons utilisé que certains de ces outils. Il s'agissait de choix dictés par la contrainte temporelle ou matérielle, mais aussi parfois parce que nous n'avons tout simplement pas eu l'idée de croiser certains types de données. Par exemple, nous n'avons cartographié que la situation actuelle de l'Ariège, à la lumière de l'étude

Agerin de 2012, mais nous n'avons pas eu l'idée (ni le temps) de réaliser une version SIG des cadastres napoléoniens. Nous aurions pu, grâce à la puissance de calcul de QGIS, mettre en évidence des changements d'occupation du sol.

Les choix opérés pour l'analyse géohistorique du tronçon court-circuité ont reposé sur une stratégie comparative et de complémentarité : il s'agissait d'une part de confronter les documents historiques, les visuels anciens et actuels et les discours des acteurs du territoire afin de mettre en évidence des points communs et des divergences, ceci surtout afin d'éviter d'utiliser sans en faire la critique des opinions unilatérales. Et la complémentarité parce que les données indisponibles dans un document pouvaient nous être fournies par un autre.

Si le SYMAR VA souhaitait compléter la présente analyse, il serait alors peut-être pertinent d'utiliser les outils de modélisation en réemployant les données fournies dans le présent dossier, mais aussi, de mener une campagne d'entretiens d'acteurs du terrain autour de la thématique paysagère. En effet, il est apparu durant cette enquête que l'un des principaux points de friction entre acteurs au sujet de la restauration de l'Ariège était celui de la transformation des paysages quotidiens, connus et vécus, qui occupent dans l'imaginaire et l'émotion des habitants, une place privilégiée.

- 2^{ème} partie -

Evolution de l'espace de mobilité - Etat des lieux 2012-2022

Les cours d'eau sont des objets géographiques mobiles, de par les processus physiques qui régissent leur fonctionnement, en plus d'être eux-mêmes fonction d'érosion des milieux et de transport de flux aux origines diverses et variées. Comme présenté en 1^{ère} partie, les relations entre les Hommes et les cours d'eau n'ont eu de cesse d'évoluer, mais pas toujours de manière favorable au maintien de leur qualité – aujourd'hui mesurée sur les plans physique, chimique et écologique. De multiples aménagements en leur bords et en leur sein se sont traduits avec le temps en une restriction croissante de leur espace de mobilité, dont la définition contemporaine n'a émergé qu'avec l'intérêt récent pour la qualité des cours d'eau. D'après l'arrêté du 24 janvier 2001, « *L'espace de mobilité du cours d'eau est défini comme l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer* ».

La rivière Ariège n'a pas échappé à ces aménagements, qui provoquent aujourd'hui des dysfonctionnements multiples, notamment sur le plan morphologique, et impactant notamment les processus de production et de transport sédimentaires garantissant le bon état du cours d'eau. Les successions de barrages, seuils, tronçons court-circuités, ont été autant d'opérations intervenant sur la modification des débits de l'Ariège, et qui se répercutent sur la capacité d'évolution du cours d'eau, sur la relation entre son débit et le charriage du matériel sédimentaire grossier présent dans son lit mineur. D'autres aménagements de moindre envergure, tels que la construction de merlons, de digues ponctuelles ou de renforcement des berges témoignent de l'activité passée de la rivière et de son potentiel à déborder dans la zone inondable. Ces aménagements limitent aussi la capacité de la rivière à éroder ses berges pour produire le matériel sédimentaire nécessaire et donc l'occupation naturelle de son espace de mobilité. Enfin, l'exploitation d'alluvions dans le lit mineur de l'Ariège a eu des conséquences non négligeables sur la disponibilité du matériel sédimentaire garantissant initialement la stabilité du lit mineur et le transit de la matière grossière vers l'aval. Ces exploitations étaient éparpillées tout au long du cours d'eau (de Savignac-les-Ormeaux à Bezac), et le volume des matériaux extraits se chiffrait alors en millions de tonnes (Mercier, 1999). L'altération déjà importante des flux de matières solides au sein des cours d'eau a ainsi été aggravée par ce phénomène d'exploitation industrielle de granulats, qui a en outre favorisé l'incision du lit mineur, et donc les phénomènes d'érosion progressive et régressive. Cette pratique a néanmoins cessé avec la publication de l'arrêté du 24 janvier 2001 stipulant que « Les extractions de matériaux dans le lit mineur des cours d'eau et dans les plans d'eau traversés par des cours d'eau sont interdites » pour toutes les conséquences sur la morpho-dynamique fluviale que cette activité pouvait provoquer.

Le SYMAR Val d'Ariège a donc missionné le bureau d'étude AGERIN en 2012 pour mener une étude dans le bassin versant de l'Ariège dans l'objectif de proposer des mesures de gestion durables afin de restaurer les fonctionnalités de son hydro-écosystème. Cette étude s'inscrit également dans la compréhension de la rivière dans son ensemble d'une part, et plus précisément pour chacun des fonctionnements écologiques, hydrologiques et géomorphologiques, et ce en intégrant la notion de cyclicité des phénomènes et processus à l'œuvre. Une partie dédiée à l'espace de mobilité et au style fluvial du cours d'eau consistait également à analyser l'évolution de 1953 à 2012 d'après les photographies aériennes disponibles. Dans l'optique de mettre à jour le suivi des opérations menées et de les associer à l'évolution récente du cours d'eau, le SYMAR a besoin d'une actualisation des données concernant l'espace de mobilité de l'Ariège, à partir d'éléments d'analyse nouveaux. Cette nouvelle étude tiendra compte notamment de l'évolution de l'espace de mobilité, de 2012 à 2022, afin

de comparer les résultats obtenus par l'étude AGERIN avec ces nouveaux résultats, mais également entre les méthodes utilisées. Cette étude portera sur un tronçon d'une vingtaine de kilomètres, particulièrement anthropisé, dont les dysfonctionnements s'observent aujourd'hui concernant la capacité du cours d'eau à charrier le matériel sédimentaire, créant ainsi de manière disproportionnée des zones de dépôts potentiellement excédentaires, et des zones en déficit. Il sera nécessaire de tenir compte des événements hydrologiques survenus à partir de 2012 afin d'évaluer l'évolution :

- de la largeur du lit mineur
- de la surface occupée par la bande active du cours d'eau
- de la sinuosité

Globalement, les méthodes d'analyses ont été reprises d'après celles qui sont utilisées dans l'étude de AGERIN (évolution de la sinuosité et de la largeur du lit mineur). Seule l'analyse de l'évolution de la bande active sera concernée par la proposition d'un protocole de cartographie affiné et différent de la méthode utilisée initialement par AGERIN, l'objectif étant de représenter la géométrie du cours d'eau de manière plus précise. Cet état des lieux nouveau permettra par la suite de proposer des indicateurs de suivi des processus hydromorphologiques de l'Ariège, notamment sur la partie court-circuitée de la Cavalerie à Bonnac.

I. Méthodologies appliquées à la caractérisation de l'espace de mobilité de l'Ariège

a) Collecte de données terrain : optimisation et validation d'observations cartographiques

Dans la continuité de l'étude effectuée par le bureau d'étude AGERIN, la cartographie du cours d'eau a été effectuée à partir d'orthophotographies de l'Ariège datant de 2019. Néanmoins, un travail de terrain a été mené en aval afin d'allonger le pas de temps de l'étude à 2022, dans l'objectif de pouvoir représenter l'effet des événements hydrologiques morphogènes récents. Ces orthophotographies sont disponibles gratuitement sur le géo-service de l'IGN, et avec une résolution suffisamment élevée pour mener un travail assez précis. Or, deux événements hydrologiques morphogènes sont survenus en décembre 2019 et début janvier 2022. Le travail de terrain aura permis de rendre compte de leur impact sur la morphologie du cours d'eau et des changements survenus depuis 2019. Enfin, et afin de compléter le travail de cartographie, des mesures ont été prises directement sur les berges. Chacun des éléments nécessaires au calcul de la géométrie du cours d'eau ont ainsi été relevés par des coordonnées GPS, et par le biais d'observations paysagères en comparaison avec la géométrie de 2019, tracées à main nu sur des ortho-photos, à savoir :

- La délimitation des bords de berges actuels, et la bande active ;
- Le recensement des zones d'érosion et de dépôts particuliers, afin de pouvoir représenter et discuter la mobilité de certains bancs d'alluvions plus ou moins grossiers ;
- Le recensement de détails ponctuels mais intéressants à prendre en compte pour mettre en contexte et discuter les résultats obtenus, tels que certains bancs de dépôts de fines, des zones d'érosion, la présence de gros embâcles, l'apparition ou la disparition de bande active ou de molasse ;

Préparation et coordination

Puisque les observations réalisées in situ ont été faites à partir des ortho-photos disponibles de 2019, une analyse des changements potentiels a été menée en amont par une rétro-observation de la rivière de l'Ariège entre 2011 et 2019. Les sites présentant des changements entre les deux dates ont été identifiés sur l'ortho-photo de 2019 comme étant une zone de changement potentiel après les événements hydrologiques morphogènes de 2019 et 2022 qui auraient pu amplifier ces changements. Il s'agira des zones nécessitant une attention particulière lors des observations sur le terrain. Les zones

de flou ont également été identifiées. Il s'agit des parties du segment difficilement exploitables à partir de l'ortho-photo, en raison d'une canopée de la ripisylve trop dense, ou d'un bras mort dont les limites sont peu perceptibles par exemple (Fig. 23).

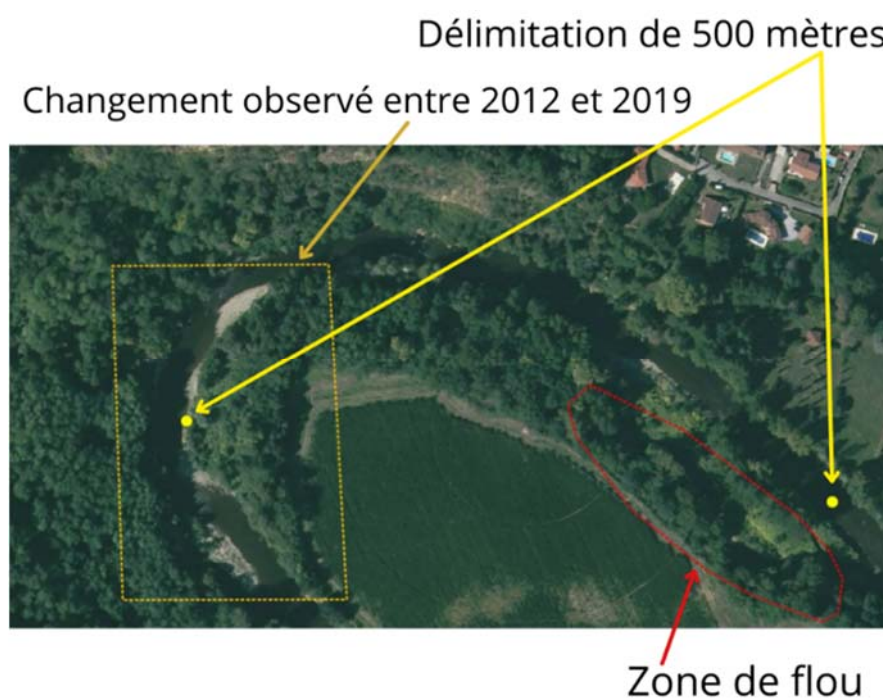


FIGURE 23 - PRESENTATION DE LA PREPARATION DES ORTHO-PHOTOS DE 2019 POUR LES RELEVÉS DE TERRAIN.

Enfin, des points ont été portés sur les images afin de délimiter le tronçon à l'étude par des tranches de 500 mètres, pour une meilleure visibilité et précision du travail cartographique, la zone d'étude étant beaucoup plus restreinte que celle dont le bureau d'étude AGERIN avait en charge. Chaque tronçon a été numéroté de 1 à 44 en débutant de l'amont (la Cavalerie) vers l'aval (limite nord de la commune de Saverdun).

En sus des observations paysagères, des points GPS ont été pris grâce à un appareil d'enregistrement de *Waypoints Garmin GPSMap 64*. Des fiches de relevés de points GPS ont aussi été imprimées pour référencer chacun d'eux en fonction de l'observation réalisée (largeur du lit ou de la bande active, zone d'érosion ou de dépôt, etc...) et pouvoir alimenter notre base de données cartographique par la suite.

Relevés des géométries de l'Ariège

D'après l'étude AGERIN, la bande active « est assimilable au chenal plein-bord ». Nous précisons qu'elle est composée du chenal d'écoulement principal, ou le lit mineur, ainsi que des bancs de matériel sédimentaire se situant dans le chenal plein bord pouvant être mobilisés lorsque le débit instantané permet leur mise en mouvement. Tous les points GPS ont été relevés en bord de berge, sauf de rares fois où la topographie permettait une observation en bord du chenal d'écoulement principal, afin de mesurer l'évolution de la bande active. Le débit du cours d'eau semblait plus élevé que la moyenne des débits rencontrés à cette période (il n'était tout du moins pas à plein bord), et ce en raison de la

crue survenue 10 jours auparavant. Des points GPS ont également été enregistrés sur les bancs d'alluvions associés à la bande active, lorsqu'ils étaient accessibles, afin de pouvoir redessiner leurs contours sous SIG et par la suite analyser leur mobilité par d'éventuels changements. Tous les bancs de dépôts n'étaient pas accessibles, et la mesure du chenal plein bord n'a pas toujours été évidente à identifier à cause des dépôts de fines importants pouvant recouvrir une partie de la bande active, rendant parfois floue sa limite avec le début du lit majeur. Une analyse du paysage a permis en supplément de reporter sur les cartes les changements observés pour être en mesure de le matérialiser sous SIG. Les zones d'érosion ainsi que les bancs de dépôts ont aussi été relevés par des points GPS. On distingue 2 types de dépôt et d'érosion :

- Les érosions et dépôts ponctuels ou visiblement peu ou pas modifiés ;
- Les érosions et dépôts importants, dont on a relevé la longueur, et quand cela était possible, la surface

En supplément, des photographies ont été prises pour chacune des zones d'érosion et de dépôts ou de bancs mobilisés pour appuyer ces observations et préciser le travail de cartographie.

b) Traitement des données terrain

Dans un premier temps, tous les points GPS des appareils Garmin ont été extraits. Les fichiers GPX ont ainsi pu être intégrés en tant que couche SIG sous QGIS. Les coordonnées GPS ainsi que les références de chacune d'elles ont également été exportées sous forme de fichier Excel grâce à un outil de conversion de données Garmin (DNR Garmin), et ce afin de constituer une base de données de toutes nos observations, et de relier chaque point GPS avec le type d'observation réalisée (zone de dépôt, bord de chenal, etc). De manière globale, le calcul des coefficients et les mesures ont été basés sur les méthodes utilisées dans l'étude AGERIN, et des tronçons de 1 km ont été déterminés de la même manière.

Evolution de la largeur du lit mineur

Le lit mineur a été calculé d'après un polygone créé sous SIG à partir de l'ortho-photo de 2019 et en s'appuyant aussi sur les photographies aériennes de 2022 (Google Maps – satellite) pour prendre en compte les événements hydrologiques récents ayant eu un impact sur la morphologie de l'Ariège. Les conditions sur le terrain n'avaient pas permis de relever avec des points GPS la largeur du lit mineur le débit et le niveau des eaux étant trop élevés. La délimitation du polygone a donc été effectuée, en soustrayant de cette géométrie les bras morts, les bancs nus et les îlots végétalisés. De plus, l'ortho-photo de 2019 a été prise au début du mois de septembre, ce qui correspond à la période où les débits sont à l'étiage. Le chenal d'écoulement visible est donc conforme à la définition du lit mineur.

A partir de ce polygone, la médiane du lit mineur et la surface ont été calculées pour chaque tronçon de 500 mètres. La largeur du lit mineur a été déterminée d'après le rapport de la médiane sur la surface de chaque tronçon de 500m, d'après la méthode utilisée par le bureau d'étude AGERIN. Ces valeurs ont ensuite été ajustées sur des tronçons de 1 km de long pour que les résultats soient comparables avec ceux de l'étude précédente, et afin également de caractériser l'évolution de la largeur du lit mineur entre 2012 et 2022.

Evolution de la surface des bandes actives

Deux méthodes ont été appliquées à l'évolution de la surface de la bande active. La première a consisté à suivre la méthode utilisée dans l'étude AGERIN, d'après sa définition de la bande active, à savoir « *la bande active est assimilable au chenal plein bord* ». Pour cela, un polygone de la bande active a été

cartographié à partir de l'ortho-photo de 2019. Le milieu de la canopée de la ripisylve a été utilisé comme repère principal pour délimiter la bande active lorsque le chenal plein bord n'était pas visible. Les îlots végétalisés ont été dessinés puis soustraits du polygone de la bande active. La surface a ensuite été calculée pour chaque tronçon de 1 km.

La seconde méthode (GEMO) a permis d'effectuer un travail d'analyse de la bande active d'après une définition plus précise de celle-ci, à savoir les bancs de sédiments mobilisables – dits actifs – i.e. « *caractérisés par une activité morphogénique soutenue, du fait de remaniements sédimentaires très importants* » (Brousse et al., 2011). D'après cette définition, la bande active ne correspond pas toujours uniquement au chenal de pleins bords. La bande active a ainsi été polygonisée grâce aux points GPS pris sur les berges de l'Ariège, en complément des notes et des photographies prises. Les bancs d'alluvions présents ont également été pris en compte – lorsque la prise de points était disponible – améliorant ainsi la précision du travail, et limitant les sur- ou sous-estimations dues à la densité de la canopée de la ripisylve. Un polygone a été créé sous QGIS à partir des points GPS. La précision des points GPS a été corrigée d'après l'ortho-photo de 2019 : les points aberrants ont ainsi été supprimés. Les surfaces ont été calculées sur les polygones découpés en tronçons de 500m pour maintenir une précision suffisante, puis additionnés par la suite afin d'être comparables, tout au moins avec les résultats de la méthode AGERIN et des résultats de l'étude préliminaire.

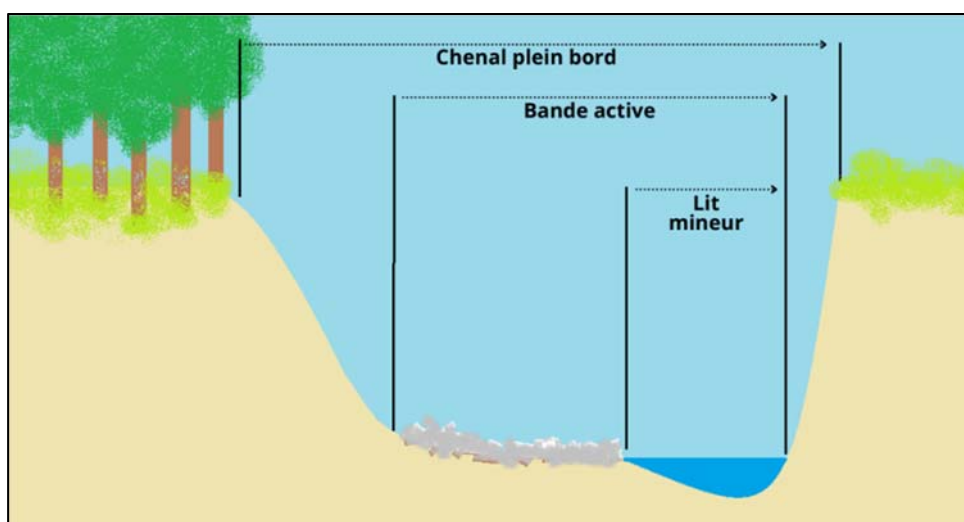


FIGURE 24 - REPRESENTATION DES DIFFERENTES PARTIES DU LIT MINEUR DE L'ARIEGE SUR LA ZONE D'ETUDE

Evolution de la sinuosité

Le calcul de la sinuosité a été réalisé d'après la méthode utilisée dans l'étude AGERIN. Cette méthode consiste à diviser la longueur de la médiane du lit mineur par la longueur d'une courbe qui relie les points d'inflexion du cours d'eau entre eux, afin de fournir un indice de sinuosité qui sera comparé entre les deux études. Les points d'inflexion de chaque courbe du tronçon ont été relevés à la main, à partir du polygone du lit mineur créé en amont, afin qu'un linéaire puisse relier tous ces points entre eux. La longueur de ce tracé a par la suite été rapportée à la longueur de la médiane du même polygone du lit mineur sur deux découpages différents :

- Un premier découpage des tronçons, conforme au découpage fait par l'étude AGERIN, l'échelle étant plus grande. Cela correspond à 3 grands tronçons homogènes de notre zone d'étude (A13, A14 et A15) ;
- Un second découpage effectué sur des tronçons de 1 km.

Le calcul de la sinuosité a également été effectué sur l'ortho-photo de 2012 afin que les résultats du second découpage puissent être comparés avec des résultats de 2012 sur des tronçons de 1 km.

c) Présentation de l'atlas cartographique

Le Glossaire français de cartographie (1990) donne la définition suivante pour le mot atlas : « *Recueil de cartes, conçu pour représenter un espace donné et exposer un ou plusieurs thèmes* ». L'atlas est par définition un inventaire géographique intelligent, un outil indispensable pour représenter des lieux, qui permet à la géographie d'abandonner ses aspects d'inventaire (Brunet et al., 1995).

L'objectif de cet atlas est de proposer une lecture de l'évolution de l'espace de mobilité de l'Ariège entre 2012 et 2022, depuis le seuil de la Cavalerie à Pamiers jusqu'à la limite communale Nord de Saverdun. Il se compose d'une représentation graphique de divers éléments de géographie de l'Ariège, à savoir :

- l'évolution de la largeur du lit mineur
- l'évolution de la sinuosité
- l'évolution de la surface de la bande active
- les zones d'érosions liées à la crue de janvier 2022

Cet Atlas cartographique est composé de 39 cartes réalisées grâce à l'outil cartographique QGIS 3.16.16 'Hannover' et l'outil graphique Inkscape.

d) Définition des événements hydrologiques

Nature des données : origine, type de donnée, présentation de la station

L'analyse des événements hydrologiques permet de mettre en relation la dynamique fluviale de l'Ariège, et donc les processus d'érosion et de dépôts passés, avec les résultats obtenus par l'analyse cartographique de l'évolution de la largeur, de la sinuosité et de la surface des bandes actives. La comparaison des fréquences, sévérité et durée des événements de crues et d'étiages entre deux périodes, définies de 1980 à 2011 et de 2012 à nos jours, permettra de rendre compte des spécificités hydrologiques de l'Ariège pouvant expliquer, en partie, l'état morphologique actuel du cours d'eau. Les données relatives aux débits collectés aux stations de mesures hydrologiques ont été récupérées sur le portail de la « Banque hydro » (hydro.eaufrance.fr). Deux types de données ont été utilisées pour cette étude :

- les débits moyens journaliers et maxima instantanés journaliers, disponibles sur la station de Saverdun (référence O137 2510). Cette station se situe au centre de Saverdun et concerne la région hydrographique de l'Ariège entre la confluence du Crieu et de la Galagne. Les débits moyens journaliers nous permettent de regarder les fréquences de crues importantes, des crues quinquennales aux crues cinquantennales. Sur cette station, les données ne sont disponibles qu'à partir de 1982.
- Les minima et maxima mensuels et interannuels ont été collectés à la station de Foix (référence O125 2510), les données de la station de Saverdun étant incomplètes.

De manière générale, les données brutes n'ont pas été utilisées mais seules les données validées et pré-validées afin de garantir une exactitude élevée des valeurs travaillées par la suite (suppression des valeurs aberrantes, etc).

Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1980	4.2	28.2	28.2	32	43.5	38.9	20.7	10.2	9.48	9.64	14.8	18.6
1981	25.7	32.7	37.2	63.8	62.7	44.4	33	18.2	16.8	16.2	17.2	21.6
1982	33.1	27.8	44.8	47.4	37.1	33.1	12.2	12.7	12.7	11.5	27.1	33.1
1983	20.4	25.3	33.8	33.8	33.8	27.7	10.9	10.4	9.61	9.81	11.9	14.6
1984	19.3	28.3	18.8	34.9	34	46.1	12	10.8	12	17.3	17.3	15.9
1985	24.4	27.8	24.4	54.9	55.9	39.1	13.2	10.9	9.25	13.2	11.8	12.3
1986	18.6	25	30	30.7	30.7	18.2	10	6.63	7.01	9.63	12.7	15.4
1987	23.1	28.7	41.7	47.7	45.1	40.9	30.9	12.4	8.92	14	9.22	16.3
1988	9.37	10.4	17.6	22.3	10.1	11.8	9.03	8.69	9.72	9.72	10.1	10.4
1989	10.4	10.1	10.4	10.1	9.72	10.1	9.37	9.03	9.03	9.72	9.72	9.72
1990	10.8	10.1	9.72	8.69	11.1	7.66	7.32	7.32	7.66	8.01	11.8	14
1991	13.3	11.1	19.8	19.1	50.6	7.56	8.28	7.32	7.08	7.56	10.9	10.3
1992	10.6	8.76	11.2	16.7	10.6	10.3	9.32	7.32	7.56	12.2	20.5	15
1993	11.2	10.6	7.32	11.2	15.8	9.96	7.56	7.08	7.56	9.96	8.04	10.6
1994	23.7	8.04	20.5	19.4	63.6	21.1	8.76	8.04	7.32	8.04	9.96	8.3
1995	14	12.2	11.5	17	29.8	17.4	6.88	8.98	6.88	8.98	7.11	9.28
1996	10.9	15.2	17.9	19.8	12.8	17	10.4	9.2	10.4	11.1	8.9	35.2
1997	35.2	25.2	8.22	13.6	9.53	8.74	8.48	7.96	7.7	7.96	11	8.22
1998	9.27	9.53	10.1	14.1	9.82	11	8.22	8.22	8.22	14.9	14.5	19.3
1999	15.8	19.8	8.74	15.4	25.2	9.26	8.56	8.34	8.56	8.56	9.26	16.5
2000	10	13.7	17.9	9.77	22.1	13.6	12.6	10.9	11.3	11.6	10.9	12.6
2001	13.6	22.1	23.3	44.6	16.9	8.71	8.98	9.24	8.98	8.98	9.51	8.98
2002	9.27	12	16.9	16.9	28.6	12.3	9.8	11.3	13.2	9.4	14.7	16.5
2003	17.7	18.1	37.1	13.5	27.3	8.95	9.45	8.92	11	9.29	11.2	13.8
2004	14.9	9.56	19.4	30.3	47.8	23.6	8.63	9.61	5.62	6	9.59	12.1
2005	15	14.6	16.8	40.4	56.6	13.5	10.3	10.5	9.59	8.39	10.6	7.53
2006	11.9	13.8	13.9	22.6	10.8	6.56	7.35	7.49	5.03	6.68	7.02	6.96
2007	6.99	7.05	12.3	32.1	40.7	10.2	7.02	7.2	7.64	4.85	6.73	5.94
2008	9.57	12.9	6.19	20.8	29.5	12.3	12.3	8.33	7.49	7.93	8.22	9.81
2009	10.3	17.9	24.6	26.6	75	11.9	10.8	9.42	7.17	7.11	7.96	15.4
2010	17.2	12.5	13.1	23.3	43.4	14.5	10.5	8.86	5.25	4.37	5.05	8.63
2011	8.55	9.26	6.99	26.4	15.4	3.34	12.2	4.52	4.74	6.29	8.33	6.82
2012	5.63	4.42	9.65	18	16.2	16.9	9.69	8.71	4.24	7.17	7.31	5.29
2013	12.3	31	30.2	57.5	57.9	63.7	11.4	7.38	8.98	6.36	6.85	25.8
2014	9.14	8.18	8.29	67.3	39.2	12.1	23.4	12.5	5.03	4.24	3.43	12.3
2015	2.15	4.5	22.3	30.4	33.8	24.8	13.7	5.33	3.87	7.14	6.7	7.78
2016	18	13.1	6.65	18	15.5	6.51	11	9.57	11.2	9.18	9.1	6.06
2017	13	14.7	18.1	5.35	29.2	8.86	5.44	9.61	9.3	8.47	11	14.4
2018	22.3	31.1	15	36.4	49.6	28.6	13.8	12.7	7.64	11.3	3.45	10.8
2019	9.69	22.2	17.8	14.1	14.5	10.9	13.6	10.5	8.36	7.71	6.65	15.6
2020	17.1											16
2021	20											16
2022	25.9											-

FIGURE 25 - DEBITS MOYENS MENSUELS DE L'ARIEGE A SAVERDUN DE 1980 A 2021.

SOURCE DES DONNEES : WWW.HYDRO.EAUFRANCE.FR

Comparaison des événements (crues importantes et étiages) entre 2012-2022 et 1980-2011

La fréquence des crues morphogènes a été observée grâce aux minimas et maximas moyens mensuels et interannuels disponibles sur la banque hydro, sur la station de Foix. Le tableau de données généré a été scindé en 2 d'après les périodes citées afin de faire un comparatif des valeurs moyennes mensuelles (pour toutes les années) et annuelles (pour chacun des mois). Enfin, les années des maximas mensuels les plus élevés et minimas mensuels les plus bas ont été relevées d'après les valeurs seuils de 250 m3/s (pour les maximas) et 6m3/s (minimas).

Événements hydrologiques importants – Intensité, durée et fréquence des crues morphogènes

La banque hydro fournit des données calculées sur les seuils de crues (les hautes eaux) et leur fréquence – dont les processus d'érosion, de charriage et de transport sont tributaires, tout comme sur les débits d'étiages (les basses eaux) – dont les processus de dépôts sont tributaires. Ainsi, les crues morphogènes à partir des données de débits moyens journaliers ont été déterminées à partir de la crue biennale dont le débit moyen journalier s'élève à 221 m³/s (IC +/- 166-286), portée à 250 m³/s pour le maximum instantané.

Les années concernées par des maxima instantanés supérieurs ou égaux à 250 m³/s ont été relevées à partir de la matrice des maxima instantanés présentée précédemment. Les événements de crue ont donc été filtrés à partir des données de maxima instantanés journaliers de la station de Saverdun où chaque événement de crue a pu être analysé dans la durée et sa sévérité. A partir du débit maximum instantané le plus haut de l'événement, tous les débits, enregistrés les jours avant et après cette valeur, ont été relevés lorsque le débit maximum instantané restait supérieur à 150 m³/s. Chacune des crues peuvent ainsi être décrites dans leur ensemble (intensité, fréquence, compétence de charriage et impact sur la morphologie du cours d'eau), comparées aux autres crues d'importance similaire, et restituées dans le temps.

Durée des périodes d'étiages critiques

Les étiages sévères ont été relevés à partir des débits maximums enregistrés à partir de la station de Saverdun, les années où ce débit maximum instantané journalier n'excède pas 20m³/s pendant deux jours consécutifs. L'intégralité des jours pour lesquels le débit n'excédait pas 20m³/s et la valeur du débit associée ont été analysées afin de caractériser les tendances et évolutions relatives à la durée et à la sévérité des étiages. Le débit maximum instantané a été privilégié au débit minimum pour deux raisons : le débit maximum déjà très bas nous permet de pointer la compétence très réduite du cours d'eau, alors que les débits minimums instantanés peuvent être accompagnés de moments plus ou moins courts dans la journée où le débit augmente soudainement suffisamment pour mobiliser du matériau sédimentaire plus ou moins grossier.

II. Résultat de l'évolution des caractéristiques hydromorphologiques de l'Ariège

a) Analyse des événements hydrologiques

Résultats généraux entre 1980 et 2022

Les données des stations de mesure de Foix et de Saverdun disponibles sur la Banque Hydro relatent plusieurs événements de crues « historiques » et ont référencé les valeurs fortes de pics de débit instantané pendant une crue. On retrouve sur la station de Foix en janvier 2004 un événement dont la hauteur d'eau a atteint 2,37 mètres (pour un indice de gravité à 23), un autre en mai 1977 avec une hauteur de la lame d'eau qui s'élevait à 3,1 mètres (pour un indice de gravité à 48). La station de Saverdun a, quant à elle, enregistré des informations tout à fait différentes : à l'exception de la crue de 2004, deux autres événements ont aussi été enregistrés. En décembre 1996, la hauteur d'eau avait atteint 3,16 mètres, et 2,76 mètres en novembre 1982. Les indices de gravité n'ont pas été saisis, mais en comparaison avec ceux de la station de Foix, tous deux se situent entre 50 et 30.

NB. Un indice de gravité, dit du seuil hydrométrique, est une échelle de 1 à 100 qui permet de déterminer si un débit donné lors d'une crue est peu, moyennement ou très élevé pour un seuil relatif à une crue (hydro.eaufrance.fr).

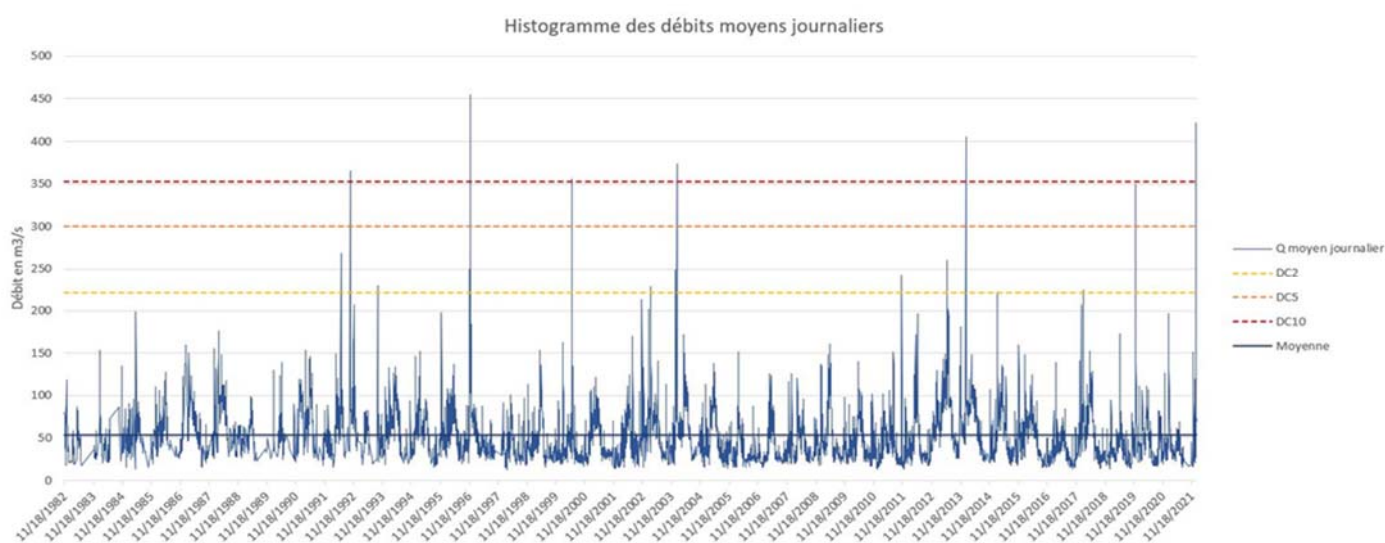


FIGURE 26 - HISTOGRAMME DES DEBITS MOYENS JOURNALIERS DE 1982 A 2021.

SOURCE DES DONNEES : WWW.HYDRO.EAUFRANCE.FR

D'après la Banque Hydro, les débits seuils de crue biennale, quinquennales et décennales s'élèvent respectivement à 221 m³/s (IC +/- 166-286), 300 m³/s (IC +/- 217-415) et 351 m³/s (IC +/- 246-513) comme le montre la figure 26. Il est admis dans cette étude que les crues morphogènes commencent généralement aux débits seuils relatifs aux crues biennales, mais les processus de transport, de charriage et d'érosion peuvent être amorcés et entretenus dans une moindre mesure à des débits seuils moins élevés situés entre 150 et 180 m³/s (Mercier, 1999). Les débits seuils des crues vicennales et cinquantennales, s'élèveraient au-delà de 400 et 600 m³/s.

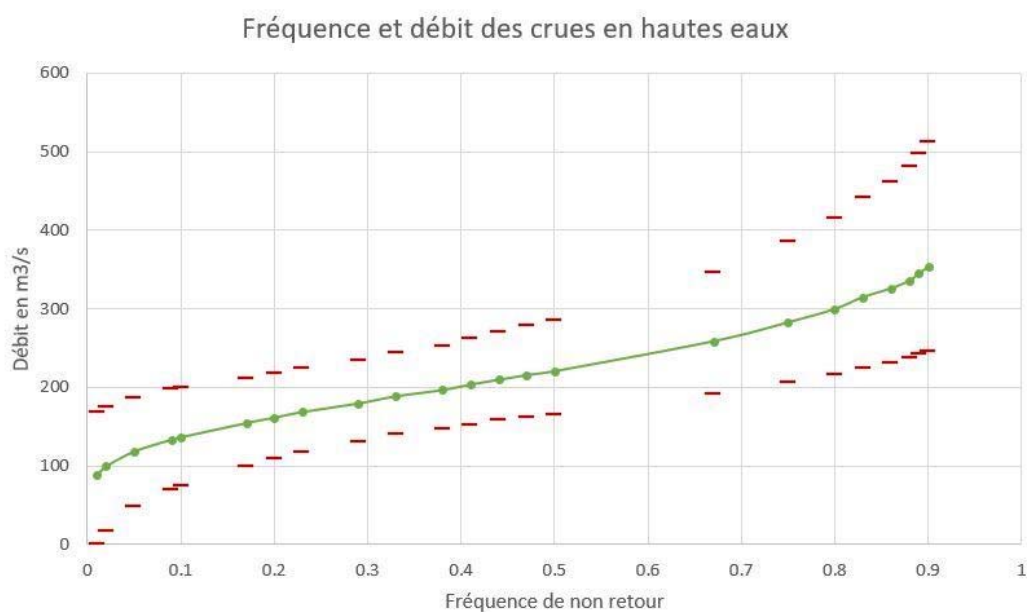


FIGURE 27 - PRESENTATION DES RELATIONS ENTRE LES DEBITS ET LEUR FREQUENCE DE NON-RETOUR DANS LE TEMPS (EN VERT) ET DE LEUR INDICE DE CONFIANCE HAUT ET BAS (EN ROUGE). SOURCE DES DONNEES : HYDRO.EAUFRANCE.FR

On remarque d'après la figure 26 que le seuil des crues décennales est dépassé 5 fois en 40 ans (1992, 1996, 2004, 2013 et 2022). On retrouve ainsi les dates présentées sur la Banque Hydro pour les événements historiques de 1993 et 2004 dont les débits moyens journaliers s'élevaient à 450 m³/s et 370 m³/s. Les crues cinquantennales sont beaucoup moins représentées que les précédentes, ou que les crues biennales puisque nous en retrouvons seulement 2, en 1999 et 2019 avec des débits qui avoisinent les 350 m³/s. Enfin, les crues biennales, plus courantes, présentent une variabilité très prononcée dans le temps. Cependant, de manière générale, on note une variabilité interannuelle importante et pas spécifiquement de tendance particulière.

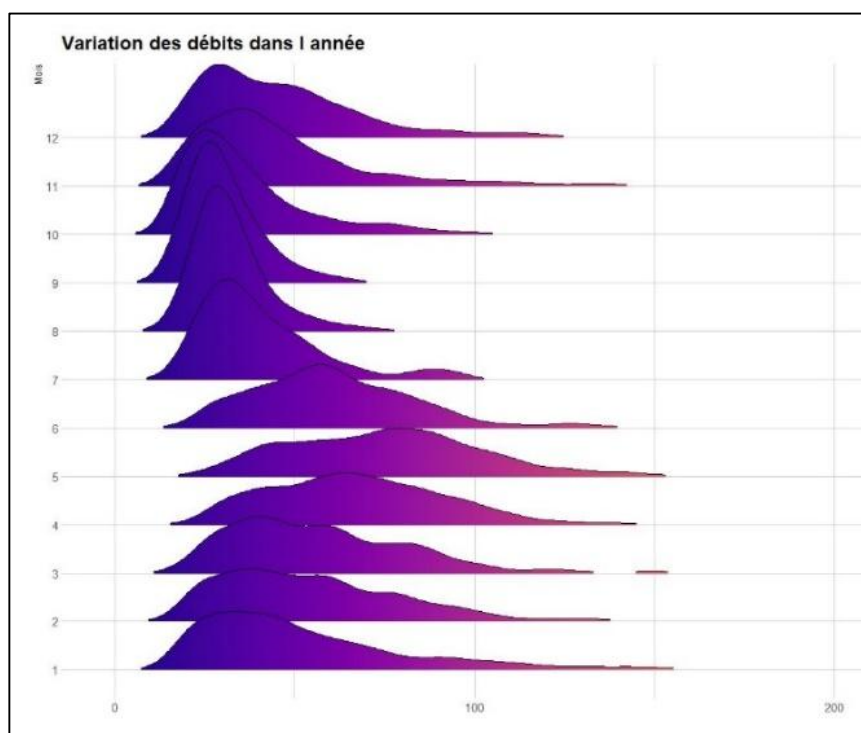


FIGURE 28 -DIAGRAMME DE DENSITES DES DEBITS ENREGISTRES ENTRE 1982 ET 2022, REPARTIS SUR CHACUN DES MOIS DE L'ANNEE. SOURCE DES DONNEES : WWW.HYDRO.EAUFRANCE.FR

Entre 1982 et 2022, la moyenne des débits journaliers moyens s'élève à 56 m³/s. On remarque sur la figure 28 que la majorité des débits journaliers moyens rencontrés se situe entre 25 et 100 m³/s. On dénote cependant une répartition des valeurs de débit inférieures à 50 m³/s concentrée pendant la période estivale de juillet à septembre, c'est la période d'étiage. Les valeurs ne dépassent que rarement 50 m³/s journaliers moyens à ce moment-là. Cette concentration commence à s'atténuer dès le mois d'octobre. De l'automne jusqu'à la fin du printemps les débits moyens journaliers inférieurs à 100 m³/s sont plus équitablement répartis que pendant la saison estivale. Les mois d'avril et de mai semblent présenter un régime fluvial plus dynamique avec une concentration des débits plus élevés, de 50 à 120 m³/s : il s'agit du début du printemps qui marque une période à la pluviométrie plus élevée et au début de la fusion nivale en montagne. De manière générale, les débits journaliers moyens supérieurs à 150 m³/s sont très peu représentés parmi les données et n'apparaissent que ponctuellement sur le graphique. De manière générale, la figure 28 montre bien l'influence de la pluviométrie et du climat sur la production et la répartition saisonnière des débits, et donc la dynamique hydrologique de l'Ariège. Les variations mensuelles étant aussi fortement marquées entre les mois détenant les densités des plus hautes eaux (avril-mai) et ceux qui détiennent les plus basses (août-septembre) (Mercier, 1999).

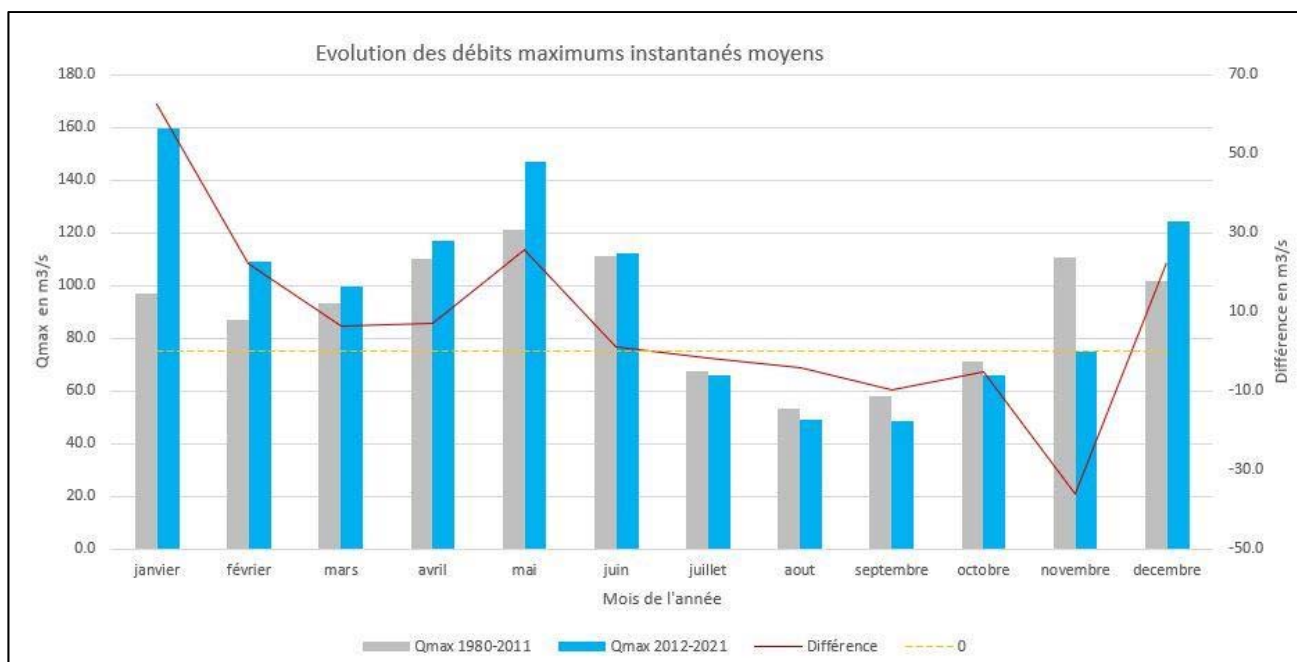


FIGURE 29 - : EVOLUTION DES DEBITS MAXIMUMS INSTANTANES MENSUELS MOYENS ENTRE 1980-2011 ET 2012-2022.
SOURCE DES DONNEES : HYDRO.EAUFRANCE.FR

La moyenne des débits maximums instantanés mensuels et annuels, est calculée pour chaque mois entre deux périodes (Fig. 29) : 1980-2011, qui correspond en partie aux objets analysés dans l'étude AGERIN, et 2012-2022 qui correspond au pas de temps sur lequel se base la présente étude. Trois constats ressortent de ces résultats : premièrement le bilan global montre que les débits maximums instantanés ont augmenté entre les deux périodes. Deuxièmement, pendant la période d'été, la dynamique du cours d'eau accuse jusqu'à 10 m³/s en moins, sur une période où les débits sont déjà très faibles. En effet, le débit maximum instantané sur le mois d'août, par exemple, ne dépasse pas les 60 m³/s, alors que les maxima ne représentent que la valeur la plus élevée mesurée par la station parmi les débits enregistrés chaque jour, le débit moyen journalier serait donc très probablement beaucoup plus bas.

Pendant la période automnale aussi, une diminution nette est également observée les mois d'octobre et de novembre (- 35 m³/s pour le mois de novembre). Autrement dit, les débits présentent une nette augmentation pendant les périodes hivernale et printanière : une augmentation des débits cumulés de plus de 60 m³/s, pour une moyenne de 7,6 m³/s, est observée sur le mois de janvier, près de 30 m³/s le mois de mai, et de plus de 20 m³/s pendant le mois de décembre.

Comparaison de la fréquence et la sévérité de débits des grandes crues entre P1 et P2

Les événements hydrologiques ont été recensés à la station de Foix entre 1982 et 2022 d'après les valeurs des maxima instantanés mensuels moyens supérieurs ou égaux à 250 m³/s, une moyenne qui pourrait faire état d'événements qui incluraient au minimum les crues biennales. Les années et les mois concernés ont fait l'objet d'une analyse des potentiels événements de crue, et ce à partir des valeurs de débits maxima instantanés disponibles sur la station de Saverdun. Au total, 17 événements ont été relevés (Fig. 30) :

- 8 événements dont les débits maxima enregistrés sont inférieurs à 300 m³/s, soit l'équivalent des crues biennales ;
- 3 événements dont les débits maxima enregistrés se situaient entre 300 m³/s et 349 m³/s, soit l'équivalent des crues quinquennales ;

- 3 événements dont les débits maxima enregistrés se situaient entre 350 m³/s et 449 m³/s, soit l'équivalent des crues décennales ;
- 3 événements dont les débits maxima enregistrés se situaient au-delà de 450 m³/s, soit l'équivalent des crues vicennales et au-delà.

Crue à croissance lente

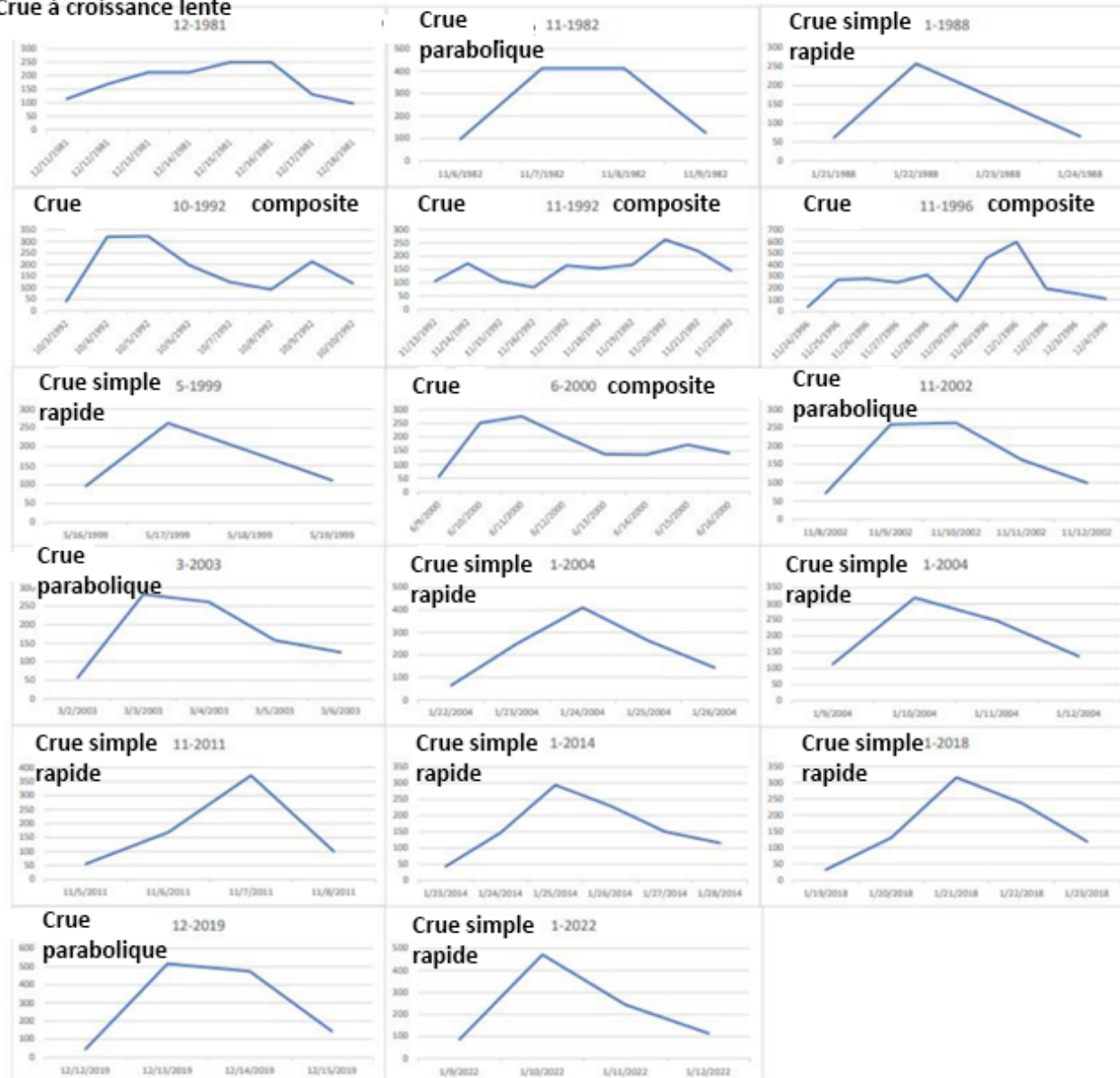


FIGURE 30 - PRESENTATION DES FACIES (DUREE ET INTENSITE DES DEBITS – Q_{MAX}) DE CRUES IMPORTANTES ENTRE 1982 ET 2022

La durée moyenne des crues dont le débit conduit diminuer la turbulence de l'écoulement et les processus de transport et d'érosion de la matière sédimentaire grossière (établi ici à 150 m³/s), est de 6 jours, avec une variation qui va de 11 jours pour la plus longue (1996) à 4 jours (7 événements concernés). On peut distinguer :

- Les crues simples avec une montée de crue rapide et une seule intumescence concernent la majeure partie des événements qui s'avèrent être par ailleurs relativement courts. La structure

de la crue est rapide et intense : elle se caractérise principalement par une montée de crue rapide, un pic important sur une journée, suivie d'une courbe de décrue très rapide à J+1 ou J+2. Ce type de crues concerne 8 des 17 événements présentés sur la figure 31. Ce type de crue est caractéristique des crues brutales mais brèves (la durée de l'événement n'excède que très rarement les 5 jours) ;

- Les crues présentant un faciès parabolique concernent 4 événements parmi les 17. Ils sont caractérisés par une augmentation et une diminution plus ou moins rapides des débits, mais un maintien des débits maximums pendant au moins 2 jours ;
- Les crues composites avec plusieurs intumescences de crues concernent généralement les événements dont la durée est plus élevée que la moyenne. Moins homogènes que les événements précédents, on distingue néanmoins un modèle renouvelé avec un pic de débit maximum en début ou fin d'événement, précédé ou suivi d'une variation importante des débits. 4 événements de ce type ont été relevés, et ont des durées variant de 8 à 11 jours.
- Un événement seulement est caractérisé par une progression très lente de la crue tant dans la montée de crue que lors de la décrue.

Entre 1980-2011 (période 1) et 2012-2022 (période 2), la fréquence des événements hydrologiques n'a pas significativement évolué (Fig. 31) : sur la période 1, en 30 ans, c'est un total de 13 crues qui ont été recensées pour une fréquence totale de 0.43 événement hydrologique important par an. Sur la période 2, en 10 ans, c'est un total de 4 crues qui ont été relevées pour une fréquence de 0.4 événement hydrologique important par an. Ce sont finalement sur les débits moyens, les structures, les durées et les types de crue que les deux périodes vont voir les caractéristiques de crues se différencier.

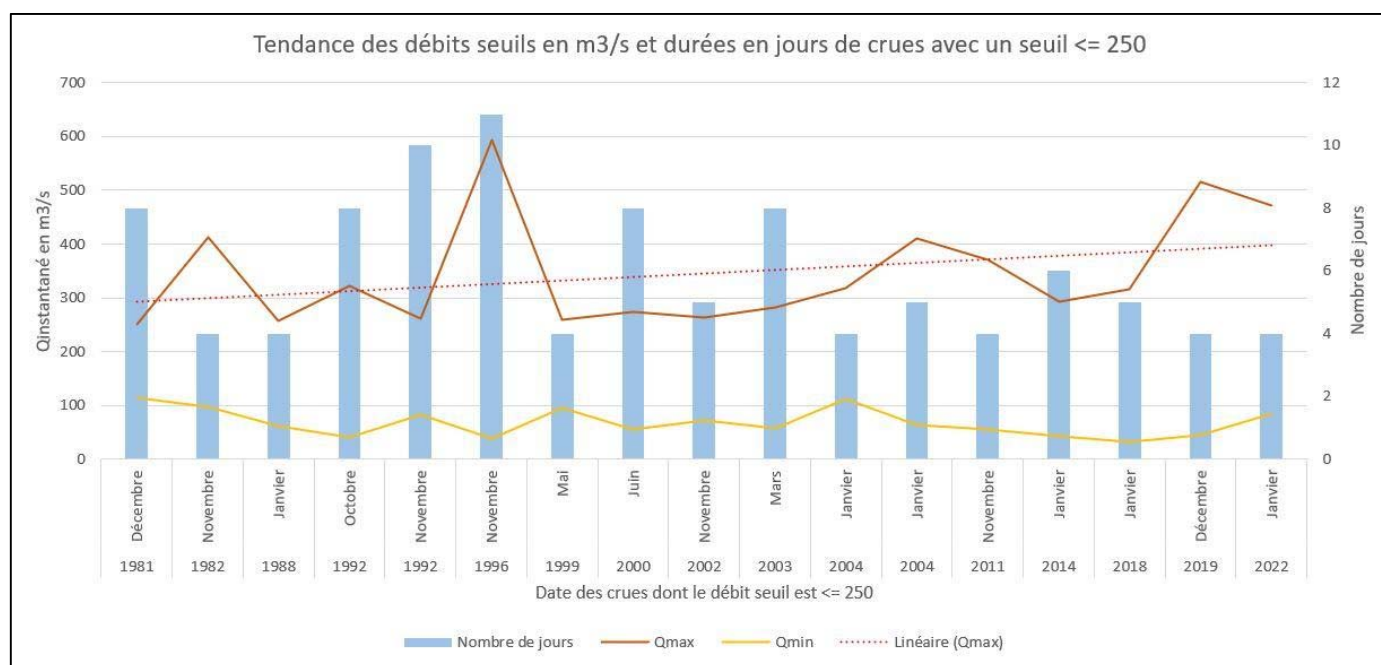


FIGURE 31 - REPRESENTATION DES EVENEMENTS DE CRUE IMPORTANTS ENREGISTRES A LA STATION DE SAVERDUN A PARTIR DES DEBITS MAXIMUMS INSTANTANES. SOURCE DES DONNEES : HYDRO.EAUFRANCE.FR

Durant la période 1, la moyenne de débit maximum enregistré s'élève à 329 m³/s, pour une durée de crue de 6.4 jours. La structure présente une diversité des faciès élevée, avec notamment l'intégralité des faciès de type « crue simple rapide » (1992 deux fois, 1996 et 2000). C'est durant ces 30 années que seront concentrées les crues biennales presque conformément à leur « définition » - c.a.d qui a une probabilité de 20% de se produire dans une année. Les crues décennales ont toutes eu lieu durant cette période – en 1982, en 2004 et en 2011. Finalement, l'événement le plus important, probablement une crue cinquantennale, a eu lieu durant cette période également, avec un débit maximum enregistré de près de 600 m³/s et une durée de 11 jours au total, pendant lesquels les débits ont oscillé autour de 250 m³/s sur la totalité de l'événement (Fig. 30). Le modèle de ce faciès « crue simple rapide » se caractérise lors de la crue de 1996 par une augmentation progressive des débits pendant 5 jours jusqu'à atteindre un débit maximum instantané de 313 m³/s, suivi d'une rupture nette avant de ré-augmenter de manière fulgurante, passant ainsi de 85 à presque 600 m³/s en deux jours.

Durant la période 2, la moyenne du débit a nettement augmenté puisqu'il s'élève à 399 m³/s (presque plus de 70 m³/s d'écart avec la période précédente). La durée des événements diminue légèrement avec une durée maximum de 6 jours et une durée moyenne de 4.8 jours. On observe cependant des crues beaucoup plus importantes : en attestent leur structure générale en forme de pic « simple », qui permet de déterminer un événement court mais intense, et les débits maximums enregistrés. En effet, sur 4 événements, les deux plus récents (2019 et 2022) concernent des crues supérieures aux crues décennales, probablement vicennales, et une crue présente un débit maximal instantané pouvant être attribué à une crue quinquennale.

Comparaison des durées et sévérité des débits d'étiage entre P1 et P2

Les périodes d'étiage prennent majoritairement place durant la saison estivale, généralement de juillet à septembre. Mais d'année en année, la longueur et la sévérité des épisodes semblent s'étendre jusqu'au mois d'octobre. Globalement, l'analyse des débits à l'étiage pendant les périodes 1 et 2, permet de se rendre compte tout d'abord de la tendance à la diminution des débits comme en atteste la figure 32.

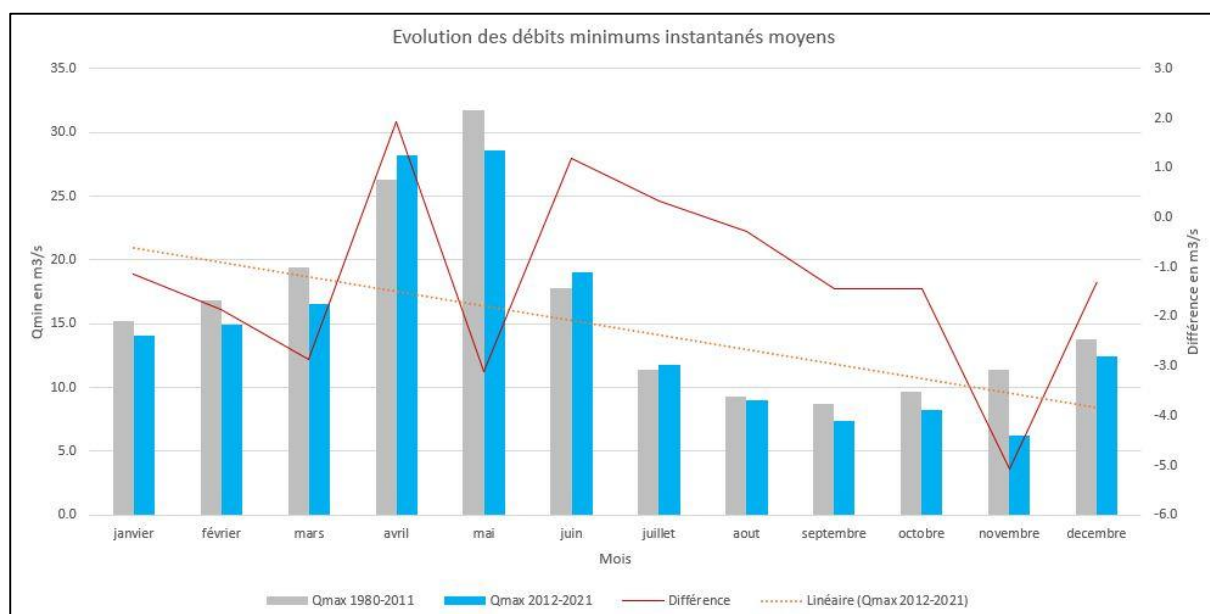


FIGURE 32 - EVOLUTION DES DEBITS MINIMUMS INSTANTANES MENSUELS MOYENS ENTRE 1980-2011 ET 2012-2022.

SOURCE DES DONNEES : HYDRO.EAUFRANCE.FR

En effet, basée sur les moyennes mensuelles des minima de toutes les années pour chacune des deux périodes, l'évolution des débits d'étiage accuse déjà globalement à l'année une diminution cumulée importante de 15 m³/s, pour une moyenne de -1.6 m³/s. Les mois d'août et de septembre marquent les deux mois de l'année pendant lesquels les débits les plus faibles sont enregistrés, bien que le mois de novembre fasse l'objet d'une baisse drastique de ses minima avec près de 5 m³/s en moins entre les périodes 1 et 2. Plus généralement, pendant l'été, les mois de juillet, août et septembre, ne présentent pas d'évolution significative de leurs débits minima.

Les débits maxima instantanés ont été analysés pour caractériser les tendances des périodes d'étiage. L'objet n'étant pas de se focaliser sur les minima moyens annuels, mais plutôt de présenter un état des lieux des événements hydrologiques intervenus sur un pas de temps moyen, et visant à relativiser les résultats permettant d'analyser l'espace de mobilité du tronçon de l'Ariège. Ainsi, la figure 33 présente une synthèse des événements hydrologiques relatifs aux étiages sévères, après avoir filtré tous les débits maximums instantanés inférieurs à 20 m³/s pendant au moins deux jours consécutifs.

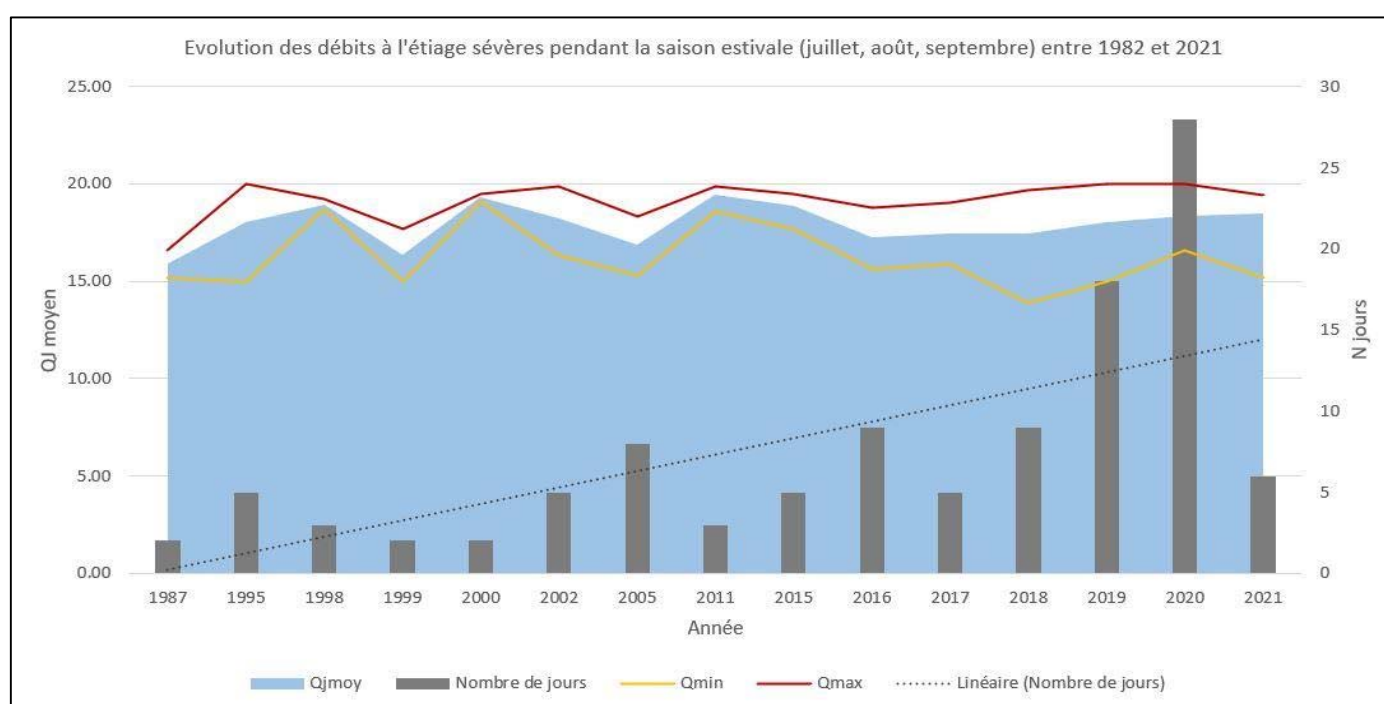


FIGURE 33 - REPRESENTATION DES EVENEMENTS D'ETIAGES SEVERES ENREGISTRES SUR LA STATION DE SAVERDUN A PARTIR DES DEBITS MAXIMA INSTANTANES. SOURCE DES DONNEES : HYDRO.EAUFRANCE.FR

Au total, ce sont 15 événements différents qui ont été recensés et analysés, présentant un débit moyen le plus faible de 16,2 m³/s (1987), et des durées très variables : entre 2 et 28 jours (pour une moyenne établie à 7,3 jours de période d'étiage sévère). Quatre autres constats peuvent être établis à la lecture de cette figure :

- Le plus important est la fréquence croissante des événements « critiques » de très faibles débits maximums enregistrés. Pendant la période 1, cette fréquence s'élève à 0,3 événements par an (8 événements sur 30 ans seulement). Pendant la période 2, on enregistre 7 événements de ce type mais sur un pas de temps beaucoup plus court : 10 ans. Ainsi, la fréquence de ces périodes d'étiages particulièrement sévères s'élève à 0,8 événement par an, soit presque chaque année.

- Le nombre de jours des étiages augmente considérablement entre les deux périodes. Durant la première, la durée moyenne des événements est de 3,8 jours, contre 11,4 pendant la période 2. On observe notamment deux pics importants en 2019 et 2020 qui détiennent le record de la plus longue durée avec respectivement 18 et 28 jours consécutifs avec des débits maxima qui n'excèdent pas 20 m³/s.
- On observe également une variabilité importante du débit moyen, malgré une apparente stabilisation récente sur la seconde période, qui tend vers une augmentation progressive mais timide des débits maximums instantanés moyens de chaque période.
- Les écarts entre la valeur la plus haute et la valeur la plus basse du débit maximum instantané enregistrés pendant l'événement semblent se creuser avec le temps et présenter une variabilité moins prononcée que ce qui est observé pendant la période 1.

b) Evolution de la largeur du lit mineur depuis 1953

La zone d'étude s'étend du seuil de la Cavalerie sur la commune de Pamiers à la limite communale de Saverdun, soit du tronçon A1301 au tronçon A1506 si on se réfère à la nomenclature adoptée par AGERIN en 2015. Pour des raisons de compréhension, nous avons ici repris la même dénomination pour notre étude d'analyse de l'évolution de la largeur du lit mineur de l'Ariège.

Depuis 1953, la largeur du lit mineur a fortement évolué au sein de notre zone d'étude. En effet, cette partie du cours d'eau a dans un premier temps connu une forte diminution progressive de la largeur de son lit. On note une diminution moyenne du lit d'environ 7 m sur la totalité du tronçon entre 1953 et 1971, suivi par une diminution encore plus importante entre 1971 et 1998, de l'ordre de 11 m en moyenne (AGERIN, 2015). Cependant, à partir de 1998, on assiste à une inversion de cette tendance. En effet, entre 1998 et 2012, le lit mineur s'élargit de presque 2,7 mètres sur l'ensemble du tronçon. Malgré une inversion de la tendance en cours depuis 1953, l'élargissement du lit mineur sur cette période reste très faible en comparaison avec la rétraction qu'il a connu entre 1953 et 1998.

A noter qu'on constate de fortes disparités d'évolution sur la zone d'étude au cours de l'ensemble de ces périodes. La première partie du tronçon correspondant au tronçon court-circuité de l'usine de Pébernat est en effet particulièrement sensible à ces variations (-10m entre 1953 et 1971, -17m entre 1971 et 1998 et +6 m entre 1998 et 2012). Tandis que la partie aval de la zone d'étude, s'étendant du tronçon A1401 au tronçon A1506, correspondant à une partie du cours d'eau relativement plus linéaire que la précédente est, elle, beaucoup moins sensible à ces variations (-6m entre 1953 et 1971, -8m entre 1971 et 1998 et +1m entre 1998 et 2012). Ces données correspondent à une variation de la sinuosité beaucoup plus faible sur cette partie du cours d'eau par rapport au tronçon court-circuité de l'usine de Pébernat d'après les résultats présentés dans l'étude AGERIN (0,002 entre 1953 et 1971, contre 0,030 pour le tronçon court-circuité ; 0,016 entre 1998 et 1971 contre -0,035 et -0,001 entre 1998 et 2012 contre -0,038). Cette différence de variation en termes de sinuosité et de la largeur du lit mineur s'explique principalement par la forte diminution du débit due à la prise d'eau pour le canal de l'usine de Pébernat, qui entraîne une diminution du transit sédimentaire du cours d'eau sur ce tronçon. Cette diminution induit une capacité de mobilisation des matériaux insuffisante, ce qui génère des zones de dépôt importantes, et par conséquent une diminution de la largeur du lit mineur. L'élargissement relativement important qu'a connu cette partie du tronçon durant la période 1998-2012 est majoritairement dû à des actions de restauration mises en place par les syndicats de rivière.

Concernant désormais la période 2012-2022, on note à nouveau une inversion de la tendance, avec un retour à la diminution de la largeur du lit mineur sur la totalité de la zone d'étude. En effet, sur cette

période le lit mineur de l'Ariège a été réduit d'environ 5,5 m en moyenne sur l'ensemble du tronçon avec là encore des disparités mais qui ne correspondent pas à celles observées sur la période 1953-2012. Sur la période 2012-2022, le secteur ayant subi la plus forte rétraction s'étend du tronçon A1405 au tronçon A1501 avec une diminution de 8,75 m en moyenne, tandis que le secteur du tronçon court-circuité a lui, connu une diminution de sa largeur d'environ 4 m, ce qui est équivalent à la rétraction du reste du tronçon. On note donc que le lit mineur de notre zone d'étude a un bilan négatif sur la période 1998-2022, avec un élargissement d'environ 2,7 m entre 1998 et 2012 suivis par une réduction du lit d'environ 5,5 m entre 2012 et 2022. Ce qui donne une diminution de la largeur du lit de près de 3 m sur la période 1998-2022. En conclusion, la surface gagnée par le lit mineur entre 1998 et 2012 a donc été rapidement perdue ensuite.

Plus précisément, on observe localement des zones de grande variation au sein de notre zone d'étude en opposition avec des zones de faibles modifications. Les tronçons ayant subi les plus importants bouleversements sont présentés ci-dessous (Fig. 34).

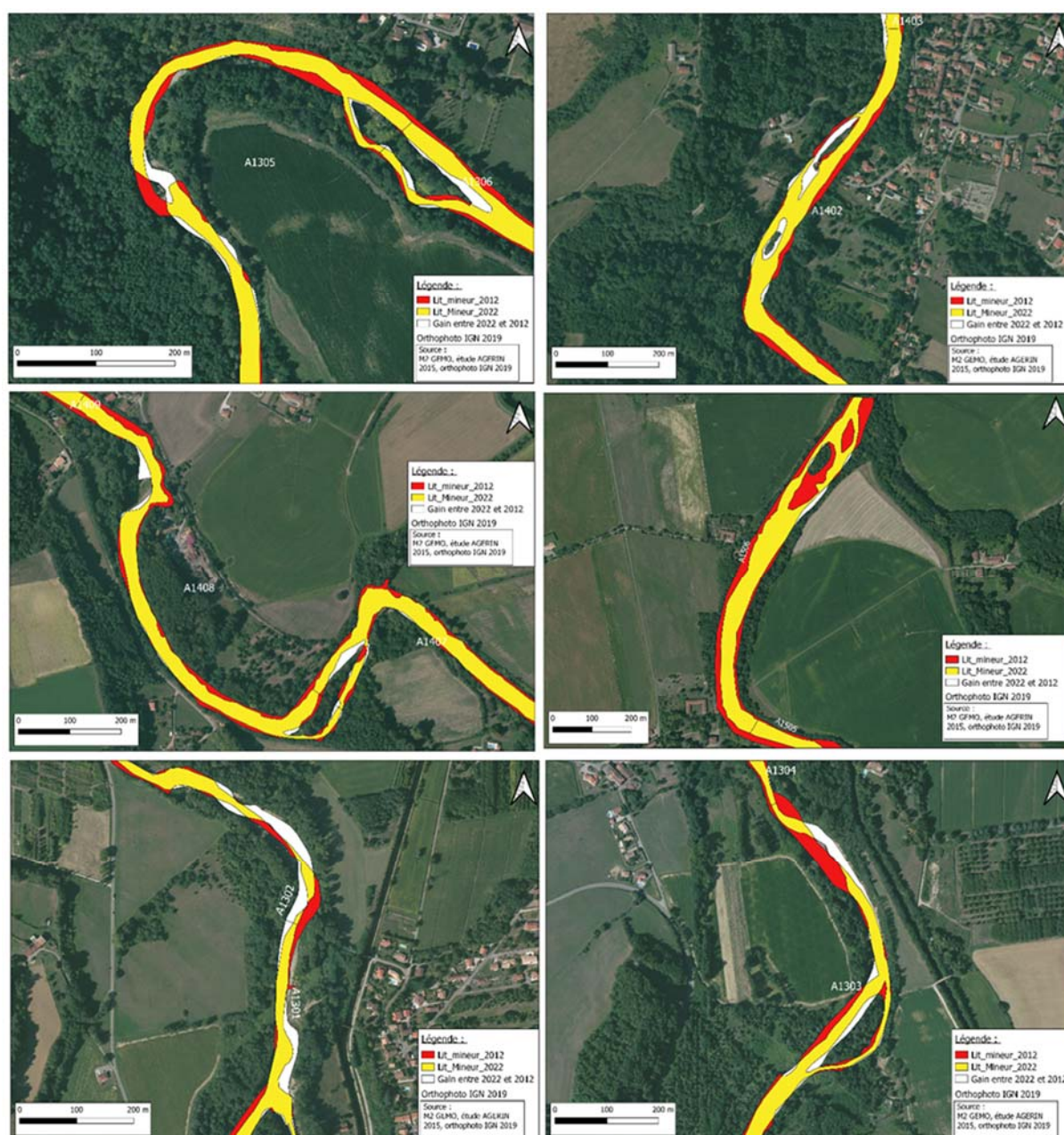


FIGURE 34 - CARTE DES TRONÇONS AYANT SUBI LES MODIFICATIONS LES PLUS IMPORTANTS ENTRE 2012 ET 2022

On observe que globalement ces tronçons présentent des îlots végétalisés dans le lit mineurs. Ce sont en effet des milieux qui sont particulièrement sensibles aux crues et à l'activité hydrogéomorphologique du cours d'eau, ce qui explique ces fortes modifications entre 2012 et 2022 étant donné que l'Ariège a subi deux crues importantes durant cette période, en 2019 et début 2022. On observe que sur ces tronçons les zones de gain de surface sont presque aussi nombreuses que les zones de perte. C'est la preuve d'une mobilité importante du cours d'eau, et ce qui explique pourquoi ces tronçons ne sont pas ceux où l'on observe forcément les plus grandes diminutions de largeur du lit en valeurs brutes. A noter qu'une grande partie du secteur court-circuité est concerné par ce cas de figure.

Les tronçons qui, au contraire, n'ont subi que peu de modification durant cette période sont majoritairement des secteurs rectilignes comme on peut le voir sur les cartes ci-dessous (Fig. 35). On observe que ces tronçons ont globalement subi une rétraction comme l'ensemble de notre zone d'étude mais l'évolution entre 2012-2022 reste peu marquée. On n'observe que très peu de gain entre ces deux dates, ce qui s'explique principalement par la faible mobilité du cours d'eau sur ces portions.

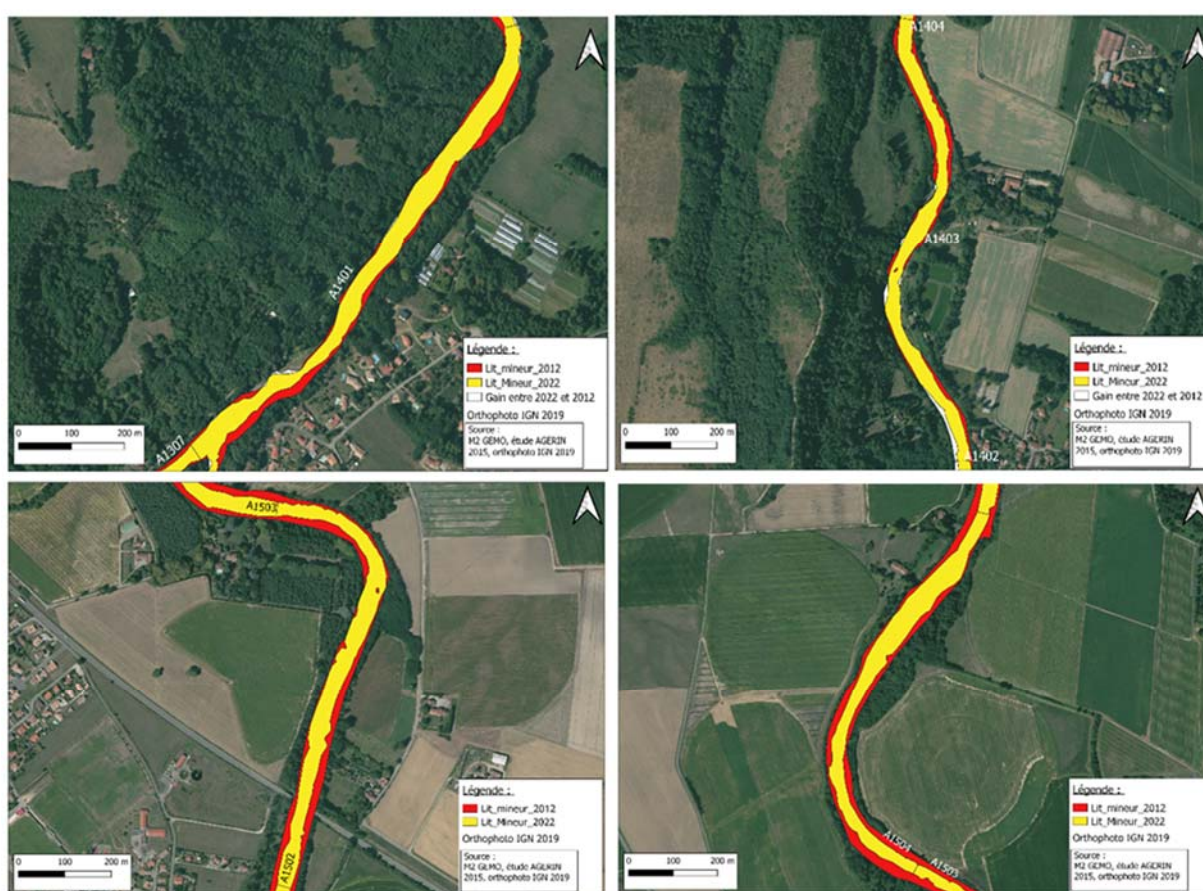


FIGURE 35 - CARTE DES TRONÇONS AYANT SUBI DE FAIBLES MODIFICATIONS ENTRE 2012 ET 2022

Paradoxalement à ce qu'on vient de dire le tronçon ayant connu la rétraction la plus importante (avec -12,4 m) est le tronçon A1405 qui correspond plutôt à une partie rectiligne du tracé en comparaison du reste du tronçon (Fig. 36). Ceci peut être expliqué par le fait que, contrairement aux zones de méandrage marqué composées d'îlots végétalisés, sur cette partie les gains de surface entre 2012 et 2022 sont très faibles, voire inexistantes. La seule variation observable sur ce tronçon durant cette période correspond à une perte de surface occupée par le lit mineur de part et d'autre. C'est pourquoi les pertes de largeur sont plus importantes ici que sur les secteurs de méandres, alors qu'en réalité la mobilité y est beaucoup moins forte.

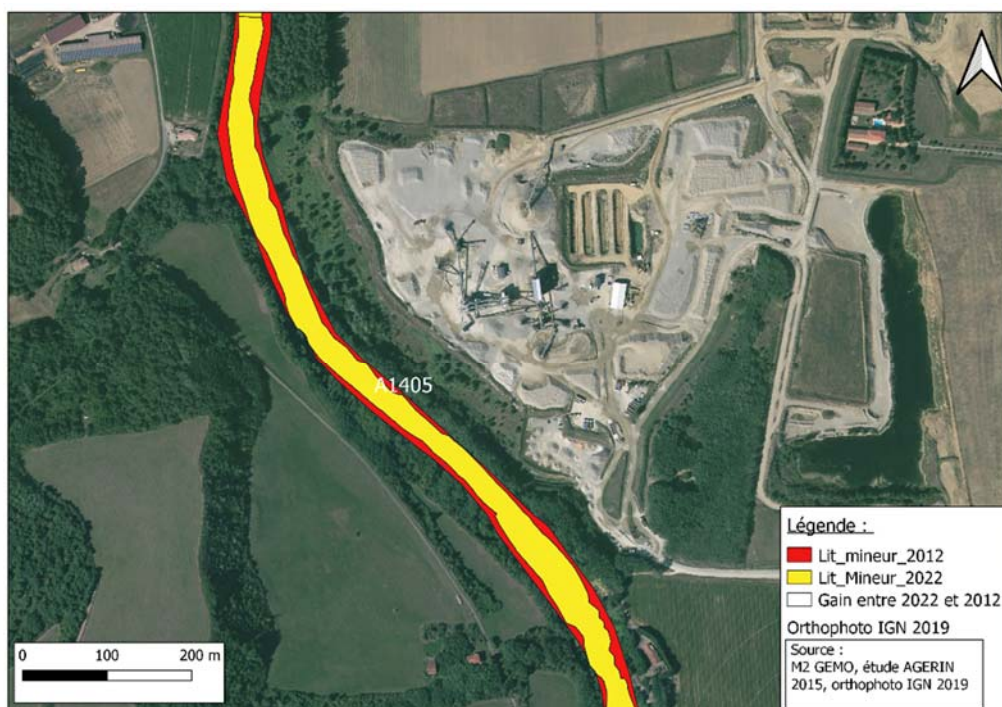


FIGURE 36 - CARTE DES MODIFICATIONS AU SEIN DU TRONÇON A1405 ENTRE 2012 ET 2022

c) Variation de la surface de la bande active, comparaison de méthodes bivariées

La méthode AGERIN

Selon la méthode AGERIN, sur laquelle les mesures ont été réalisées à partir de l'ortho photo de 2019, on observe sur l'évolution de la surface de la bande active une tendance à l'augmentation sur la majorité des tronçons, à l'exception des tronçons A1301 et A1506, où l'on observe une légère diminution (Fig. 37).

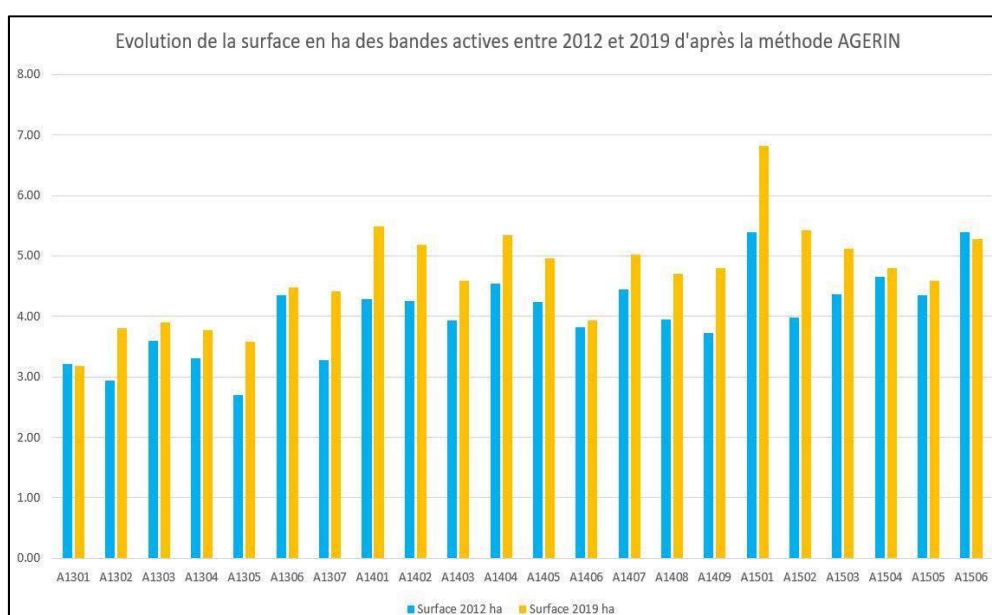


FIGURE 37 - EVOLUTION DE LA SURFACE DE LA BANDE ACTIVE POUR CHAQUE TRONÇON EN 2012 (EN BLEU) ET EN 2019 (EN ORANGE) D'APRES LA METHODE UTILISEE DANS L'ETUDE AGERIN

La surface de la bande active évolue de manière très hétérogène sur les tronçons étudiés de Pamiers à Bonnac, où les mesures oscillent entre 15 et 20% d'un segment à l'autre. Le tronçon A1301 situé au niveau du seuil de la Cavalerie fait l'objet d'une augmentation de la surface de la bande active de 0.92% (293m²), contre +30% (8794m²) sur le tronçon suivant (A1302). Cette variation de la bande active localisée sur le tronçon court-circuité est déjà présente en 2012, nous avons donc une continuité temporelle de l'inconstance de la bande active sur cette zone aménagée. Nous avons ensuite une stabilisation de l'augmentation de la bande active du tronçon A1402 à A1405.

Au travers du de la figure 37, on constate un tronçon A1406 avec un très faible gain, 2,85%. Puis 5km en aval, le gain le plus important se situe sur le tronçon A1502 avec une augmentation de 36,47%. Sur cette période de 7 ans, la rivière Ariège a donc déposé de nombreux sédiments sur la commune de Saverdun.

Dans la partie « *Évolution Bande Active AGERIN* » de l'Atlas cartographique, on constate que les gains les plus importants sont sur les deux secteurs où la morphologie du lit de l'Ariège est rectiligne. Le secteur A1401 avec un gain de 34,91 % (+ 11424,8 m²) et le secteur A1502 avec un gain 36,47% (+ 14495,4 m²). Sur le secteur à l'aval de Bonnac, au lieu-dit de la Bouchède, l'érosion de la falaise en amont peut entraîner un fort dépôt de sédiments et alimenter la bande active avec une sinuosité faible. Dans le secteur de Saverdun, la forte concentration en sédiments mobilisables est la conséquence de l'aménagement du seuil au centre-bourg de la commune.

La méthode GEMO

L'évolution de la surface de la bande active d'après la méthode GEMO (données de l'ortho photo de 2019 complétées avec des relevés GPS de terrain) sur les 22 tronçons est plutôt hétérogène. On constate sur la figure 38 que la moitié des tronçons ont vu leur surface diminuer et inversement pour l'autre moitié. Trois tronçons (A1302, A1305 et A1409) sortent du lot avec des gains supérieurs à 13%. Nous constatons que les tendances à la hausse sont les plus représentées sur les tronçons de la partie court-circuitée (de A1301 à A1401).

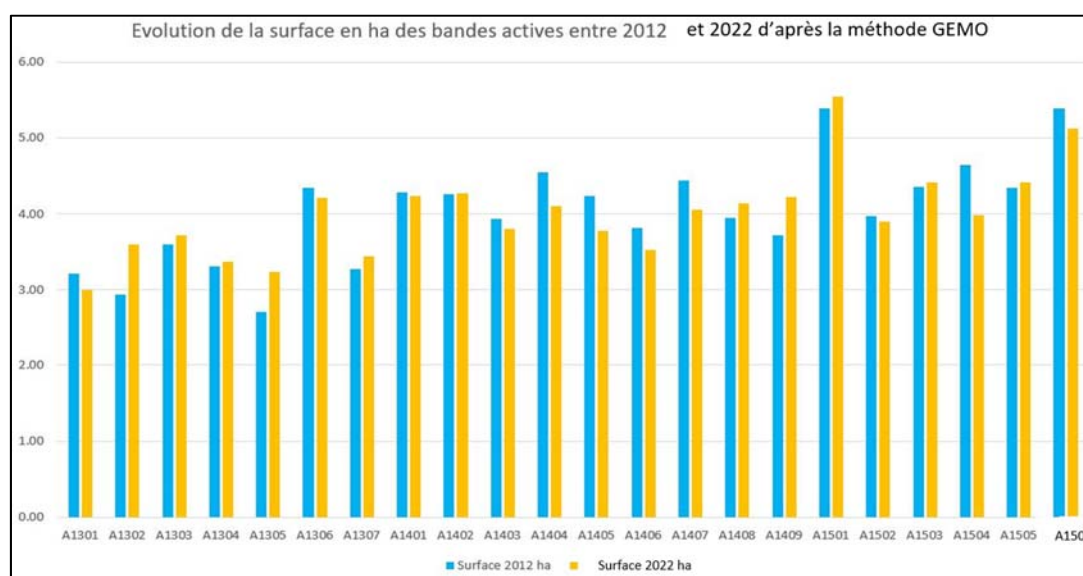


FIGURE 38 - EVOLUTION DE LA SURFACE DE LA BANDE ACTIVE POUR CHAQUE TRONÇON EN 2012 (EN BLEU) ET EN 2019 (EN ORANGE) D'APRES LA METHODE CREEE PAR LE MASTER 2 GEMO

D'autre part, les tendances à la baisse sont marquées sur la partie aval du tronçon court-circuité notamment entre les tronçons A1403 et A1407 avec une baisse moyenne de 8% sur 5 km. Toutefois, les tronçons A1408, A1409 et A1501 présentent un gain notable au niveau de Saverdun (+7,1% en 3 km). De plus, nous pouvons aussi constater des zones plutôt stables comme celle comprise entre les tronçons A1306 et A1403 avec une évolution moyenne de -2% sur 5 km.

Comparaison des deux méthodes

Lorsque l'on confronte les résultats des deux méthodes, on se rend compte des fortes disparités. En effet, sur les tronçons A1306, A1502, A1406 et A1409 nous avons des différences d'évolutions remarquables. Ces différences sont très visibles sur le résultat des surfaces de la bande active. Néanmoins, la figure 39 montre que les valeurs suivent toutefois une tendance globalement similaire entre les deux méthodes.

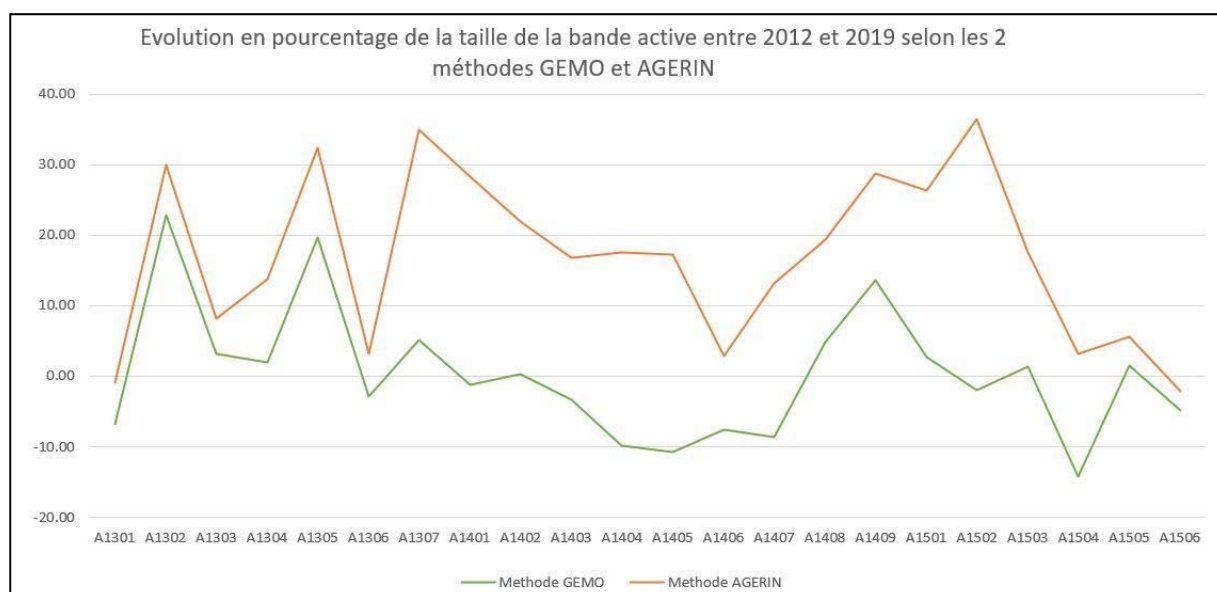


FIGURE 39 - RESULTATS DE L'EVOLUTION EN % DE LA SURFACE DE LA BANDE ACTIVE ENTRE 2012 ET 2022 SELON LES DEUX METHODES APPLIQUEES

On remarque que le tronçon A1502 fait cependant exception : alors que d'après la méthode AGERIN, la surface de la bande active est en hausse nette par rapport à celle du tronçon précédent, elle diminue drastiquement avec la méthode GEMO.

Malgré la similitude de la tendance, nous avons une forte différence sur la surface de la bande active d'un même tronçon. Il est probable que les résultats des surfaces des deux méthodes puissent être sur et sous-évalués. C'est pour ces raisons que les résultats des deux méthodes appliquées ont été, pour chacun des tronçons, ramenés à la moyenne afin de limiter les effets de leur sur- et sous-estimations.

Moyenne des deux méthodes				
NUMERO TRONCON	Surface de la Bande Active en 2012 (en m2)	Surface de la Bande Active moyenne en 2019/2022 (en m2)	Différence moyenne de surface de la bande active entre 2012 et 2019/2022 (en m2)	Evolution de surface de la bande active entre 2012 et 2019 (%)
A1301	32124,2	30887,2	-1237	-3,86
A1302	29318,1	37066,8	7748,7	26,45
A1303	36009,9	38065,05	2055,15	5,685
A1304	33116,8	35704,65	2587,85	7,795
A1305	27018,6	34054,25	7035,65	26,05
A1306	43419,4	43452,8	33,4	0,1
A1307	32724,8	39277	6552,2	20,005
A1401	42830,2	48629,4	5799,2	13,55
A1402	42556,4	47278,4	4722	11,105
A1403	39324,8	41963,55	2638,75	6,715
A1404	45459,5	47212,25	1752,75	3,85
A1405	42304,3	43685,8	1381,5	3,26
A1406	38162,7	37270,7	-892	-2,325
A1407	44437,7	45434,75	997,05	2,225
A1408	39438	44228,05	4790,05	12,155
A1409	37190,8	45068,15	7877,35	21,2
A1501	53932,7	61798,5	7865,8	14,59
A1502	39747,7	46591,4	6843,7	17,235
A1503	43579,2	47688,65	4109,45	9,425
A1504	46489,5	43898,45	-2591,05	-5,595
A1505	43467,8	44997,95	1530,15	3,52
A1506	53850	52000,85	-1849,15	-3,44

TABEAU 1 - SYNTHÈSE DES DIFFÉRENCES RELEVÉES ENTRE LES DEUX MÉTHODES UTILISÉES POUR ANALYSER L'ÉVOLUTION DE LA SURFACE DE LA BANDE ACTIVE

Méthode AGERIN				
NUMERO TRONCON	Surface de la Bande Active en 2012 (en m2)	Surface de la Bande Active en 2019 (en m2)	Différence de surface de la bande active entre 2012 et 2019 (en m2)	Evolution de surface de la bande active entre 2012 et 2019 (%)
A1301	32124,2	31827,9	-296,3	-0,92
A1302	29318,1	38112,6	8794,5	30,00
A1303	36009,9	38953,3	2943,4	8,17
A1304	33116,8	37649,4	4532,6	13,69
A1305	27018,6	35772	8753,4	32,40
A1306	43419,4	44764,6	1345,2	3,10
A1307	32724,8	44149,6	11424,8	34,91
A1401	42830,2	54951,1	12120,9	28,30
A1402	42556,4	51880,1	9323,7	21,91
A1403	39324,8	45944	6619,2	16,83
A1404	45459,5	53414,8	7955,3	17,50
A1405	42304,3	49590,6	7286,3	17,22
A1406	38162,7	39250,2	1087,5	2,85
A1407	44437,7	50281,90	5844,2	13,15
A1408	39438	47092,4	7654,4	19,41
A1409	37190,8	47902,1	10711,3	28,80
A1501	53932,7	68161,5	14228,8	26,38
A1502	39747,7	54243,1	14495,4	36,47
A1503	43579,2	51228,9	7649,7	17,55
A1504	46489,5	47935,7	1446,2	3,11
A1505	43467,8	45874	2406,2	5,54
A1506	53850	52728	-1122	-2,08

TABEAU 2 - ÉVOLUTION DE LA SURFACE DE LA BANDE ACTIVE ENTRE 2012 ET 2019 D'APRÈS LA MÉTHODE AGERIN

NUMERO TRONCON	Méthode GEMO			
	Surface de la Bande Active en 2012 (en m2)	Surface de la Bande Active en 2019 (en m2)	Différence de surface de la bande active entre 2012 et 2022 (en m2)	Evolution de la surface de la Bande active entre 2012 et 2022 (en %)
A1301	32124,2	29946,5	-2177,7	-6,8
A1302	29318,1	36021	6702,9	22,9
A1303	36009,9	37176,8	1166,9	3,2
A1304	33116,8	33759,9	643,1	1,9
A1305	27018,6	32336,5	5317,9	19,7
A1306	43419,4	42141	-1278,4	-2,9
A1307	32724,8	34404,4	1679,6	5,1
A1401	42830,2	42307,7	-522,5	-1,2
A1402	42556,4	42676,7	120,3	0,3
A1403	39324,8	37983,1	-1341,7	-3,4
A1404	45459,5	41009,7	-4449,8	-9,8
A1405	42304,3	37781	-4523,3	-10,7
A1406	38162,7	35291,2	-2871,5	-7,5
A1407	44437,7	40587,6	-3850,1	-8,7
A1408	39438	41363,7	1925,7	4,9
A1409	37190,8	42234,2	5043,4	13,6
A1501	53932,7	55435,5	1502,8	2,8
A1502	39747,7	38939,7	-808	-2,0
A1503	43579,2	44148,4	569,2	1,3
A1504	46489,5	39861,2	-6628,3	-14,3
A1505	43467,8	44121,9	654,1	1,5
A1506	53850	51273,7	-2576,3	-4,8

TABEAU 3 - EVOLUTION DE LA SURFACE DE LA BANDE ACTIVE ENTRE 2012 ET 2022 D'APRES LA METHODE GEMO

d) Évolution de la sinuosité

Les résultats de l'étude AGERIN sur la sinuosité du tronçon en 2012 sont représentés par trois tronçons : A13, A14 et A15. Ces derniers ne sont pas représentatifs de la variation de la sinuosité à l'échelle locale, si l'on compare les résultats de l'étude AGERIN à ceux qui ont été produits sur des tronçons de 1km. Cela ne nous empêche cependant pas d'approcher la dynamique fluviale entre ces deux agglomérations.

En effet, nous avons comparé les résultats de la sinuosité de 2012 à celle de 2019 pour ces trois tronçons (voir Atlas cartographique « Evolution de la sinuosité ») et globalement nous avons remarqué une stabilisation de la morphologie du cours d'eau et une relative diminution de la sinuosité sur le tronçon A14 (-0,24). Cette moyenne cache beaucoup de disparités, notamment par endroits où, à cause des événements hydrologiques (crue, érosion, dépôt de matériaux etc.), le tracé du cours a été modifié. D'autres se sont par contre stabilisés grâce à des aménagements anthropiques. C'est ce qui nous a poussé à cartographier la sinuosité à une échelle beaucoup plus fine, tous les 1 km, pour approcher au plus près les changements. Après avoir réalisé les calculs de l'indice de sinuosité (SI), les résultats représentés sur la carte p. 32 de l'Atlas cartographique, section « Evolution de la sinuosité » peuvent être classés en 4 groupes :

- Si l'indice de sinuosité SI est inférieur ou égal à 1,1 le cours d'eau adopte un style fluvial quasiment rectiligne ; ainsi entre Le Vernet et Saverdun
- Si l'indice de sinuosité SI est compris entre 1,1 et 1,3 le cours d'eau a un style sinueux
- Si l'indice de sinuosité SI est compris entre 1,3 et 1,5 le cours d'eau est très sinueux
- Si l'indice de sinuosité SI est supérieur à 1,5 le cours d'eau est méandrique, comme on peut le constater par exemple à Bonnac.

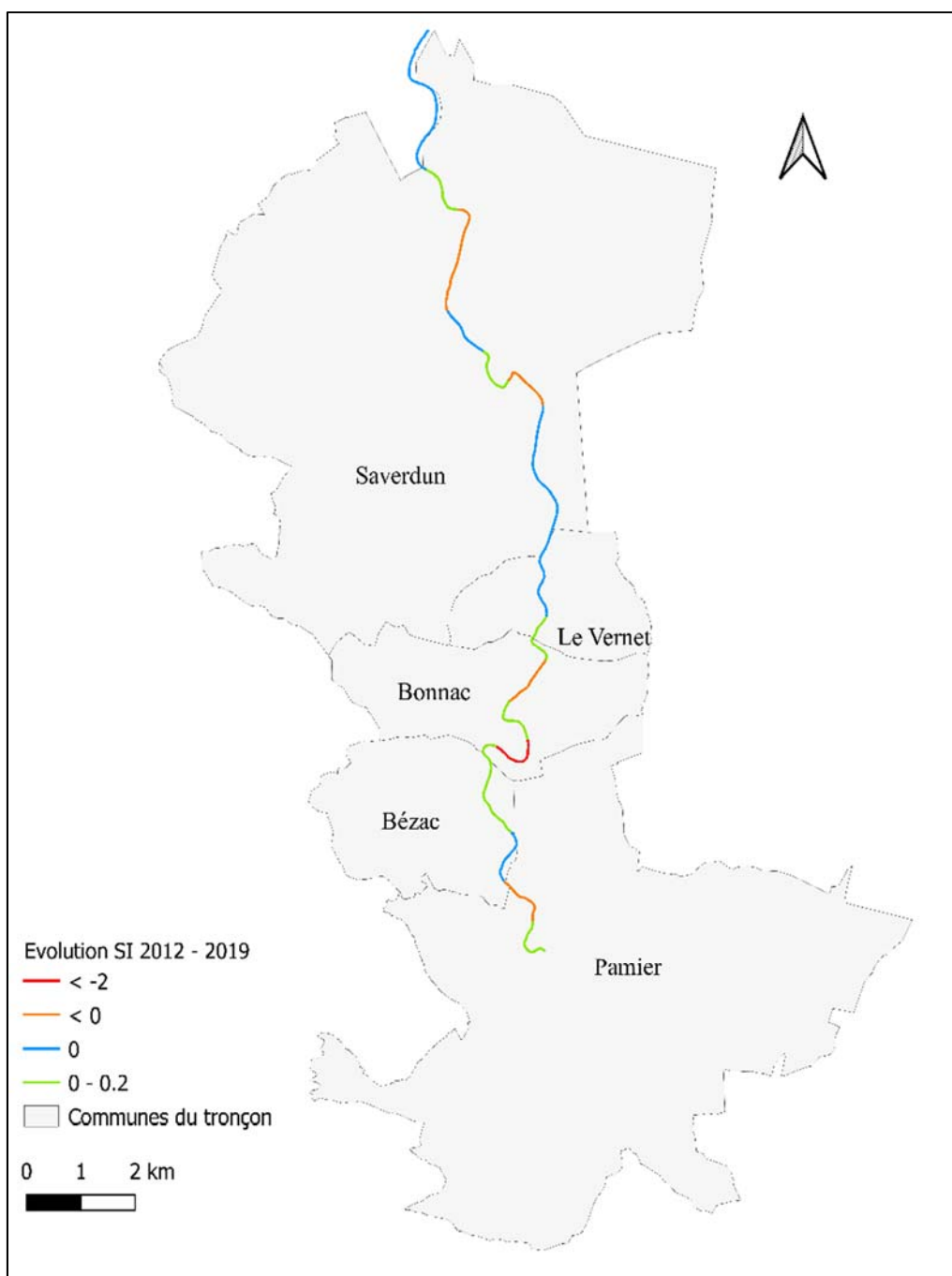


FIGURE 40 - ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DE LA SINUOSITÉ ENTRE LES PÉRIODES 2012 ET 2019 SUR DES TRONÇONS DE 1KM

Comme nous pouvons le voir sur la figure 40, l'évolution de la sinuosité entre 2012 et 2019 est beaucoup plus complexe que ce que nous pouvons l'imaginer à travers la comparaison avec les données d'AGERIN. En effet, sur les tronçons d'un kilomètre, on remarque des changements importants de la mobilité du cours d'eau, avec des segments qui sont passés d'un style rectiligne à un style sinueux, comme au nord de Bézac et en amont du méandre de Bonnac. Ce dernier a subi une baisse assez significative de sa sinuosité qui passe de 5,7 à 3,5. C'est la zone la plus sensible du tronçon. L'évolution de la sinuosité est plus ou moins stable à l'échelle du tronçon Pamiers-Savardun avec une évolution comprise entre -0,1 et 0,2, à l'exception du méandre de Bonnac, le seul véritable méandre de ce tronçon si on se base sur les valeurs de la sinuosité. Cette stabilité peut s'expliquer par un

intervalle de temps trop court pour une analyse diachronique, mais aussi par le développement des systèmes de protection, présents notamment dans les zones urbanisées. Cela n'empêche cependant pas toujours le cours d'eau de bouger comme nous pouvons le constater à Bonnac.

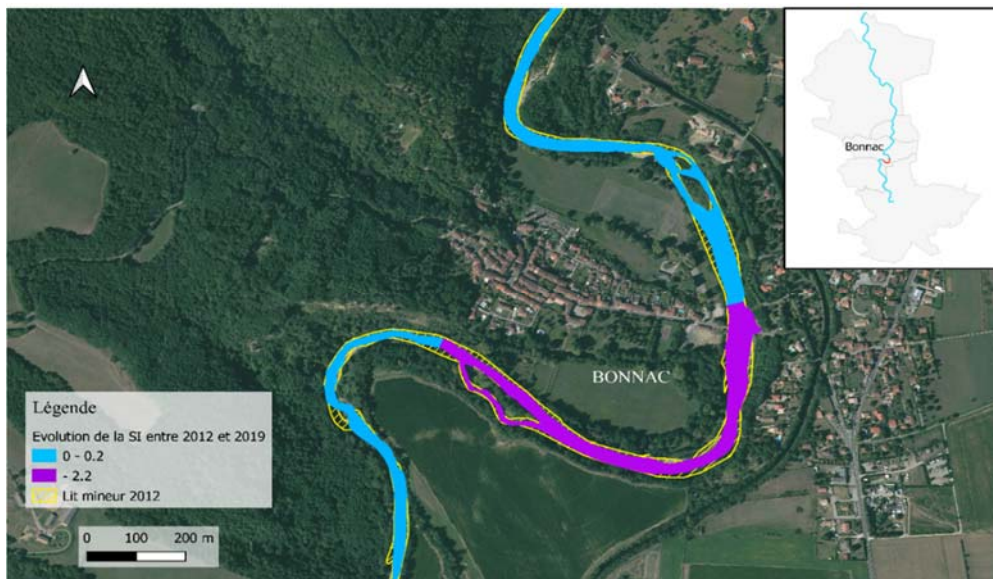


FIGURE 41 - CARTOGRAPHIE DE LA SINUOSITE DE LA SECTION DE BONNAC, EVOLUTION DE SI LA PLUS SIGNIFICATIVE ENTRE 2012 ET 2019

Au niveau de Bonnac la morphologie du cours d'eau peut avoir été impactée par les actions anthropiques (protection, pont, chenal, habitats etc.) visant notamment à limiter sa mobilité sur ce secteur. Le rétrécissement de la largeur du lit entre 2012 et 2019 est à mettre en parallèle avec la diminution de la sinuosité à Bonnac. L'évolution de la sinuosité est estimée à -38.6% en 10 ans.



FIGURE 42 - CARTOGRAPHIE DE LA SINUOSITE DE LA SECTION DE SAVERDUN, STABILISATION DE SI ENTRE 2012 ET 2019

Du Vernet à Saverdun le tracé du cours d'eau est globalement rectiligne avec par endroits de petites formes curvilignes. Cette morphologie n'a globalement pas changé entre 2012 et 2019. Au niveau de la commune de Saverdun, l'Ariège est maîtrisée et l'évolution de la sinuosité varie entre -0.1 et 0.1 au niveau de l'agglomération, en amont et en aval.

III. Interprétation des résultats et discussion

a) Des réponses complexes à l'origine d'une rétraction du lit mineur du cours d'eau

Une évolution de la largeur du lit mineur endiguée par l'aménagement du cours d'eau

Selon l'étude d'AGERIN, l'élargissement du lit mineur entre 1998 et 2012 est dû aux actions des syndicats de rivière présents sur le secteur (SYRPPA et SMAHVAV). Le cours d'eau a connu durant cette période une évolution très significative par endroits (jusqu'à +48,2% d'élargissement au niveau de la commune de Bonnac). En parallèle, plusieurs événements de crue ont également été relevés dans l'analyse des événements hydrologiques, 7 au total entre 1998 et 2012. Les années 2000 et 2004 présentent les crues au potentiel morphogène le plus élevé de cette période, avec des débits moyens journaliers élevés (jusqu'à 356 et 375 m³/s d'après les relevés de la station de Saverdun. Ces événements ont pu ainsi intervenir sur les chantiers de restauration visant à rétablir le transit sédimentaire.

En revanche, sur la période 2012-2022, le cours d'eau s'est à nouveau rétracté sur la totalité de notre zone d'étude, et de manière significative sur certains secteurs comme on vient de le voir, avec des évolutions allant jusqu'à -29,5%. On peut donc déduire de ces observations que les actions qui avaient été entreprises par les syndicats de rivière durant la période 1998-2012, n'ont pas été poursuivies par la suite et/ou que leurs effets se sont dissipés au cours du temps. C'est en effet l'un des principaux inconvénients des opérations de recharge sédimentaire artificielle sur un cours d'eau, ou d'autres opérations de restauration similaires visant à améliorer ses capacités géomorphologiques. Ces actions, en plus d'être très coûteuses, ne sont pas forcément durables dans le temps. Elles demandent à être régulièrement renouvelées afin que le cours d'eau reste dans un bon état. Ces coûts importants de réalisation sont souvent un frein à la mise en oeuvre de ce genre de travaux, limitant potentiellement le renouvellement de ces opérations. De plus, ces opérations sont très dépendantes de la météorologie et du climat qui influencent l'hydrologie du cours d'eau : le matériel sédimentaire déposé doit être mobilisé par une crue suffisamment importante pour atteindre une compétence susceptible d'augmenter le débit spécifique, dans un contexte où l'Ariège en aval de Pamiers est une rivière au régime pluvio-nival. Le débit du cours d'eau accusait déjà une diminution des hautes eaux entre 1950 et 1999 de 130 à 60 m³/s malgré une augmentation des débits instantanés (Mercier, 1999), et une perte peu significative mais réelle (1,3 m³/s) sur les débits moyens journaliers entre 2012 et 2022, toutes saisons confondues. Les résultats obtenus sont d'autant plus étonnants que durant la période 2012-2022, l'Ariège a connu deux crues particulièrement importantes en 2019 et en 2022 (cf. analyse des événements hydrologiques). L'impact de ces événements exceptionnels a probablement été gommé par l'augmentation constante et toujours plus importante de la sévérité et de la durée des étiages, principalement sur la crue de décembre 2019 qui a été suivie durant l'été 2020 d'une période très longue (28 jours consécutifs) pendant laquelle les débits n'ont jamais excédé 20 m³/s. La période d'étiage s'allonge également puisque le mois d'octobre rencontre de plus en plus d'étiages dont la sévérité est similaire à ceux de juillet. Dans ce contexte, les dépôts d'alluvions sont de moins en moins mobilisés, s'accumulent dans le lit mineur et participent à la rétraction du lit.

Ces modifications de débit sont aujourd'hui expliquées par plusieurs facteurs, d'origine anthropique et climatique. Tout d'abord, la forte artificialisation des berges de ce cours d'eau l'a rendu beaucoup moins mobile qu'auparavant, alors que les opérations de restauration engagées par les syndicats de rivière n'ont pas suffi à retrouver un bon état hydro-géomorphologique et sa mobilité originelle. La reforestation des terrains de montagne avec les politiques RTM, la présence d'ouvrages successifs (barrages, seuils), ou encore les extractions de granulats en lit mineur opérées dans le passé récent, sont autant de facteurs limitant la production et le transport sédimentaires. Ils interviennent aussi sur la turbulence du cours d'eau et le niveau de torrentialité des événements hydrologiques qui favorisent le transport (Mercier, 1999). Le canal EDF court-circuitant l'Ariège entre Pamiers et Bonnac et soustrayant une partie du débit naturel vient exacerber la mutation de l'hydrologie déjà constatée. Ainsi, certains secteurs rectilignes subissent une rétraction importante du lit mineur, pouvant à terme dégénérer en un enfoncement du lit mineur (ce phénomène est déjà observé globalement sur le cours d'eau, mais de manière plus impressionnante sur certaines sections), et démontre bien que les capacités de charriage se sont affaiblies sur l'Ariège. Enfin, bien que la variabilité interannuelle et saisonnière des débits ait été analysée dans la thèse de A. Mercier (1999), et confirmée dans l'analyse des événements plus récents, des changements répartis de manière homogène sur l'année s'observent (rallongement des durées et des périodes d'étiage, mutation du profil des crues qui deviennent plus soudaines et plus rapides) et peuvent être reliés au contexte actuel de changement climatique avec une plus forte influence méditerranéenne (Mercier, 1999). Il est possible de dresser l'hypothèse que ces phénomènes de variabilité saisonnière ne pourront que s'intensifier dans un contexte de changement climatique, avec des débits encore plus importants en moyenne pendant les saisons hivernale et printanière, et des cours d'eau à l'étiage toujours plus sévère et long. Ces évolutions hydroclimatiques pourraient avoir pour conséquence une dynamique de la production et du transport sédimentaires encore moins homogène :

- exacerbées lors de phases d'érosion importantes et très localisées dans l'espace ;
- favorisées par des sécheresses plus intenses et plus durables ;
- perturbées par des phases de dépôts massifs et soudains du matériel sédimentaire en fin d'épisodes de crues beaucoup plus courts que par le passé.

Une évolution surfacique de la bande active variable dans l'espace

L'évolution de la bande active est fortement corrélée à la rétraction du lit mineur, l'occupation du chenal de pleins bords par les alluvions pouvant y contribuer si les débits seuils nécessaires à la mobilisation et au transport des flux solides ne sont pas atteints. En effet, les bancs d'alluvions qui ne sont pas mobilisés pendant une longue période tendent à se végétaliser, et cette végétalisation renforcera à son tour les difficultés pour le cours d'eau à mobiliser ces alluvions, voire marquera la stabilisation définitive du banc en fonction du degré et de la nature de la végétalisation.

Le calcul de la moyenne des résultats générés par les deux méthodes présentées en amont nous paraît être un moyen pertinent de pallier leurs défauts de sur- et de sous-estimation. Nous remarquons à partir de ce constat que le tronçon court-circuité (A1301 à 1401) présente une certaine hétérogénéité des résultats qui peut être due à l'amoindrissement du débit lié à la prise d'eau EDF mais aussi à une sinuosité importante. Ces deux facteurs peuvent expliquer cette variation de la bande active :

- d'une part, les débits réservés vont intervenir sur la diminution des débits moyens, qui vont favoriser les dynamiques de dépôts et entraver la mobilisation des bancs d'alluvions ;

- d'autre part, les processus d'érosion et de dépôt sont fortement marqués dans la partie méandreuse d'un chenal où les rives concaves sont fortement érodées quand les rives convexes recueillent des accumulations importantes.

Aussi, lors d'un premier zoom sur les tronçons A1301 et A1302, la bande active paraît diminuer, ce qui peut être expliqué par une mauvaise interprétation du début de la zone d'étude lors de la polygonisation de ce tronçon, les limites entre l'étude AGERIN et celle-ci n'étant pas les mêmes. On peut tout de même admettre une évolution de la bande active stabilisée (proche de 0) entre 2012 et 2022. Ceci s'explique par la présence du seuil de la Cavalerie privant de sédiments le premier tronçon de l'Ariège, comme on peut le constater sur la photo satellitaire de 2022 (Fig. 43). Bien que le premier tronçon fasse partie des trois tronçons de la zone d'étude ayant la plus forte sinuosité, son faciès méandrique ne permet pas un dépôt et un élargissement de la bande active en raison du piégeage des sédiments. Enfin, le tronçon A1302 présente un gain important de la bande active (+26,45%), pouvant s'expliquer par la concentration des débits par la passe à poisson au niveau du seuil artificiel permettant une augmentation localisée du débit et de la vitesse des écoulements, rendant possible une mobilisation des sédiments néanmoins suivie d'un dépôt rapide sur le même kilomètre.



FIGURE 43 - IMAGE SATELLITE D'UN BANC DE DEPOTS D'ALLUVIONS EN AMONT DU SEUIL DE LA CAVALERIE A PAMIER
SOURCE : GOOGLE MAPS SATELLITE

Sur le second zoom, situé sur le tronçon A1306, on observe une surface de bande active mais stabilisée sur 10 ans. Cette raison peut s'expliquer par la présence d'un ouvrage gabionné de protection des berges sur la rive droite au niveau de Salvayre (Fig. 44). Cet ouvrage se situe au niveau du coude du méandre qui est la zone la plus sensible à l'érosion en période de crue. En limitant les processus d'érosion, cet ouvrage prive ainsi le cours d'eau d'une partie de son espace de mobilité et du stock sédimentaire, et donc la possibilité d'un engraissement de la rive convexe. La contrainte de cet aménagement génère un phénomène de compensation sur le tronçon A1307, avec un gain important de la bande active (+20%).



FIGURE 44 - PHOTOGRAPHIES DE L'OUVRAGE DE PROTECTION SITUE A BONNAC

Du tronçon A1407 à A1403, on observe une légère diminution, constante, selon la méthode GEMO. Lorsque les résultats sont moyennés avec ceux de la méthode AGERIN, cette partie voit une très légère hausse de la surface de la bande active. Cela donne l'impression que cette partie, plutôt rectiligne, est restée plutôt stable en 10 ans. Par conséquent, cette faible augmentation de la surface de la bande active peut être reliée avec le constat déjà fait dans l'étude AGERIN de 2015 faisant état d'une incision du lit mineur dans cette section. Ce constat peut être confirmé par les résultats de l'évolution de la largeur du lit mineur qui montre une forte rétraction sur l'ensemble de ces tronçons. Ces tronçons étant globalement rectilignes et n'ayant connu qu'une faible mobilité durant cette période, l'hypothèse selon laquelle cette rétraction serait due à l'incision du lit mineur en raison d'une capacité de charriage faible est en effet la plus probable. Enfin, le méandre au niveau du tronçon A1408 est marqué par une forte sinuosité. Ce méandrage marqué est en corrélation avec un gain de la surface de la bande active. A l'aval de Saverdun (du tronçon A1501 à A1506), les résultats révèlent une diminution de la bande active qui s'explique par un contexte d'incision du lit jusqu'au substrat molassique face au déficit des apports sédimentaires.

Une évolution de la sinuosité traduit pas un espace de mobilité en réduction

La méthode choisie pour calculer la sinuosité est identique à celle utilisée par le bureau d'étude AGERIN en 2015. Cette méthode consiste à calculer le rapport entre la longueur d'un segment du lit mineur sur la longueur entre les points d'inflexion de ce même segment. Pour cet exercice, nous avons choisi de reconduire le découpage en trois tronçons de la zone d'étude tel que celui utilisé par AGERIN pour l'étude 1953-2012, afin de pouvoir faire une comparaison et analyser les résultats sur l'évolution de la sinuosité (carte p. 31 de l'atlas). Les résultats obtenus montrent que le tronçon étudié est peu sinueux excepté à Bonnac. Cette morphologie n'a pas beaucoup évolué entre 2012 et 2022 malgré les crues morphogènes enregistrées en 2019 et début 2022. Cette stabilité du cours d'eau durant cette dernière décennie peut être due aux actions des communes environnantes pour la maîtrise morphodynamique de l'Ariège, surtout dans les zones urbanisées, afin de maîtriser les processus d'érosion et de limiter les risques liés aux inondations.

L'état de la morphodynamique du cours d'eau paraît cependant se dégrader au cours du temps. Entre 1953 et 1971, la sinuosité du tronçon A13 a augmenté de 2 à 3% tandis que sur ce même tronçon, la sinuosité diminue de -3 à -2% durant les intervalles 1971-1998 et 1998-2012. A partir de 2012, la sinuosité a très peu évolué : 0,54% sur le tronçon A15 et 1,68% sur le tronçon A13. Cependant sur cette

dernière décennie la sinuosité du tronçon A14 a diminué quant à elle de -17.58%. Toutefois, ce résultat n'est pas représentatif de la réalité. En effet ce résultat est dû à une évolution significative du méandre de Bonnac contrairement au reste du tronçon qui a peu évolué. Cette évolution globale de la sinuosité, en apparence positive, peut donc être seulement biaisée par l'évolution importante notée sur la partie méandreuse de Bonnac, alors que ce profil de cours d'eau est naturellement sinueux, et cette sinuosité tend à être renforcée si certains aménagements n'interviennent pas dans les processus morphodynamiques. C'est d'ailleurs pourquoi nous avons décidé de travailler à une échelle beaucoup plus fine. A l'échelle des transects de 1 km, l'évolution de la sinuosité de l'Ariège durant la période 2012-2022 varie entre -0,1 et 0,1, excepté à Bonnac. Si on se base sur les valeurs de la sinuosité c'est le seul méandre du tronçon à atteindre un indice de sinuosité élevé en 2022 (3,5). Rappelons que pour parler de méandre la sinuosité doit être supérieure ou égale à 1,5. C'est visiblement la partie la plus sensible du cours d'eau.

Globalement, ce constat vient renforcer l'état des lieux élaboré en 1999 dans la thèse de A. Mercier qui relevait déjà une réduction de l'espace de mobilité de l'Ariège, traduit par des chenaux de plus en plus rectilignes et aménagés. Malgré les actions du syndicat de rivière, le degré d'artificialisation est tel que les actions pour améliorer le cours d'eau pour entretenir sa sinuosité ne sont pas encore assez efficaces. Il est également important de considérer la longueur des processus à l'œuvre et de leurs effets, et donc l'importance de la dimension durable dont doivent faire preuve les démarches entreprises.

b) Cartographie de la bande active : critique des méthodes employées

Nous avons deux types de méthodes différentes, présentant des atouts et des inconvénients pour chacune d'elles. La méthode AGERIN est orientée uniquement sur la photo interprétation, un système approximatif à une échelle fine. La ripisylve constitue une canopée quasiment constante le long de notre zone d'étude et vient complexifier l'appréhension de la forme de la bande active. La méthode GEMO a pallié cette limite par l'utilisation des nombreux points GPS pris tout du long de notre travail de terrain. Pour la bande active, ces points GPS ont permis d'améliorer la précision sur les largeurs de celle-ci en 2022 tout en prenant en compte la taille à l'instant T des îlots. Cette méthode s'appuie également sur des photographies du terrain pour plus de précision. Toutefois, nous avons également utilisé les ortho-photos de 2019, ce qui peut parfois créer un décalage avec la réalité de 2022. De plus, nous avons été confrontés à des incohérences sur la définition de la bande active qui ne faisait pas l'unanimité dans les références bibliographiques, ce qui explique aussi cet écart entre les deux méthodes (Fig. 45 & 46).

Concernant la sinuosité, nous avons fait une comparaison entre les résultats de 2012 obtenus en 2012 par AGERIN et nos résultats pour 2019. Pour pouvoir faire une comparaison pertinente, nous avons gardé le découpage du tronçon Pamiers-Saverdun en trois tronçons pour qu'il corresponde au découpage de l'étude AGERIN. Cependant, cette échelle ne nous donne pas suffisamment d'informations pour analyser l'évolution de la sinuosité sur le tronçon (A13, A14 et A15). Nous avons jugé nécessaire de télécharger les données de l'étude AGERIN puis refaire le découpage du tronçon, cette fois-ci à une échelle plus fine, pour évaluer la variation de la sinuosité entre 2012 et 2019.

La différence entre ces deux méthodes est que la première, celle de l'étude AGERIN, fait le calcul de la sinuosité à l'échelle de l'Ariège tandis que la seconde permet de visualiser les changements à l'échelle locale. Ce second découpage est d'autant plus pertinent qu'il nous a permis de voir d'énormes changements comme au niveau du méandre de Bonnac où la sinuosité a diminué de -38% en 7 ans.

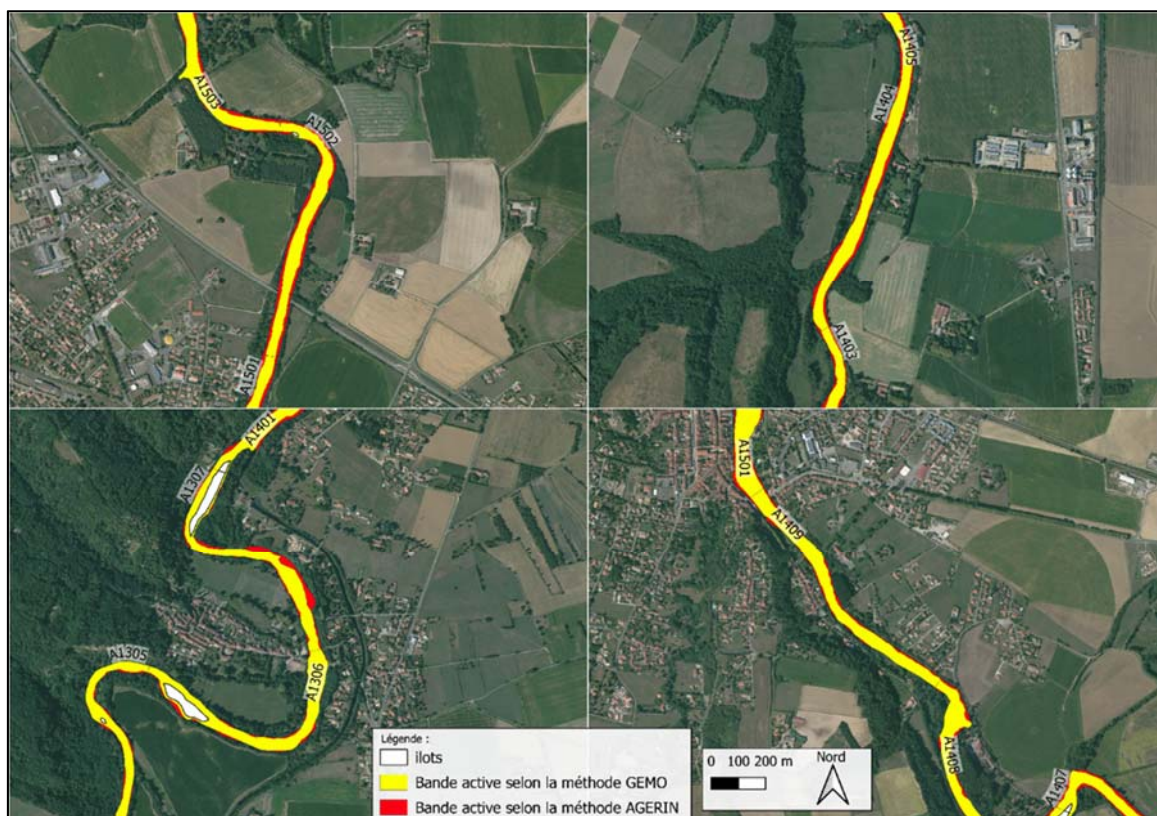


FIGURE 45 - REPRESENTATION DES DIFFERENCES DE CARTOGRAPHIE ENTRE LES DEUX METHODES

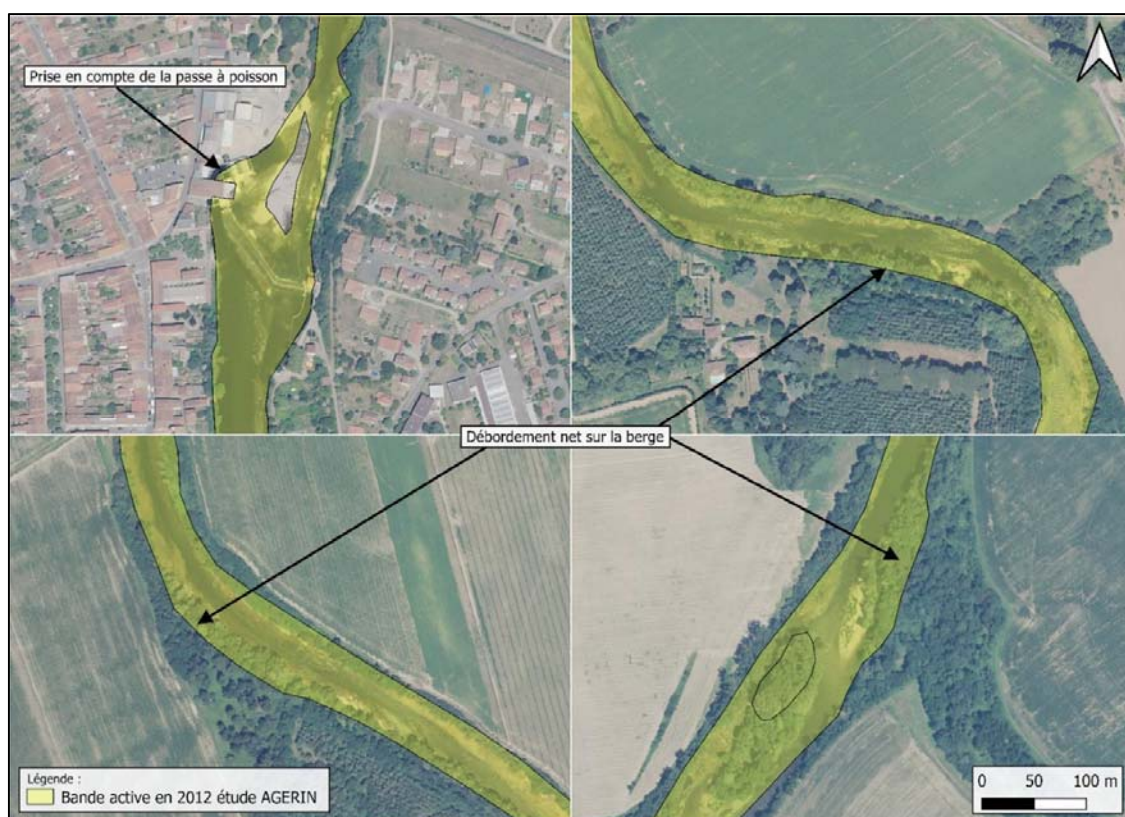


FIGURE 46 - CARTE DES INCOHERENCES DANS LE TRACE DE LA BANDE ACTIVE DE 2012 (SOURCE : ETUDE AGERIN, ORTHO-PHOTOGRAPHIES DE 2016)

	Forces	Faiblesses
Méthode AGERIN	Utilisation d'une même base de données, travail uniforme et homogène	Aucune donnée terrain, travail non précis à une échelle fine, incohérence ponctuelle
Méthode GEMO	Travail de terrain approfondi, prise en compte rapide de modification de la bande active et du lit mineur après les crues	Utilisation de données à deux années différentes, diminution de la fiabilité

TABEAU 4 - SYNTHÈSE AFOM DES FORCES ET FAIBLESSES DES MÉTHODES AGERIN ET GEMO

c) Analyse et détails de la crue morphogène de janvier 2022

La prospection des rives de l'Ariège avait pour but initial la collecte de points GPS permettant de redessiner la largeur du chenal plein bord du cours d'eau. Toutefois, ce travail de terrain s'est déroulé seulement quelques jours après la dernière crue morphogène de janvier 2022. Par conséquent, les relevés sur le terrain ont permis de noter certaines des traces visibles de la crue sur le cours d'eau. En effet, la crue a particulièrement érodé de nombreuses berges et secteurs autour de l'Ariège. De plus, la puissance de cette crue a également remobilisé et déplacé les bancs alluviaux vifs au sein de la bande active. La prise de points GPS destinée à la mesure de la largeur du lit a été couplée avec des points permettant de réaliser un inventaire cartographique des zones d'érosion liées à la crue.

Le constat a pu être fait de zones importantes de dépôts de fines bien au-delà du chenal plein bord, jusqu'à une dizaine de mètres en lit majeur (Fig. 49), et la présence de nombreux arbres déracinés qui soulignent l'intensité du débit de cet événement (Fig. 50). D'après les données de la station de mesure de Saverdun, le débit journalier moyen du jour pendant lequel le pic a été enregistré s'est élevé à 422 m³/s, pour un débit maximum instantané de 472 m³/s. Il s'agit d'ailleurs du débit maximum instantané le plus élevé enregistré sur le mois de janvier depuis 1980. La crue s'est maintenue au-dessus de 150 m³/s pendant deux jours (figure 47).

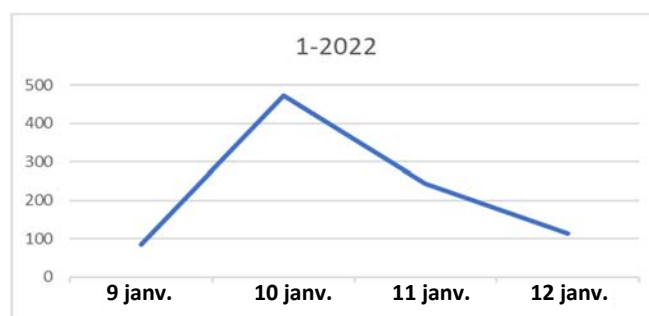


FIGURE 47 - DÉBITS MAXIMUMS ENREGISTRÉS LORS DE LA CRUE DE JANVIER 2022 À LA STATION DE SAVERDUN.
SOURCE : HYDRO.EAUFRANCE.FR

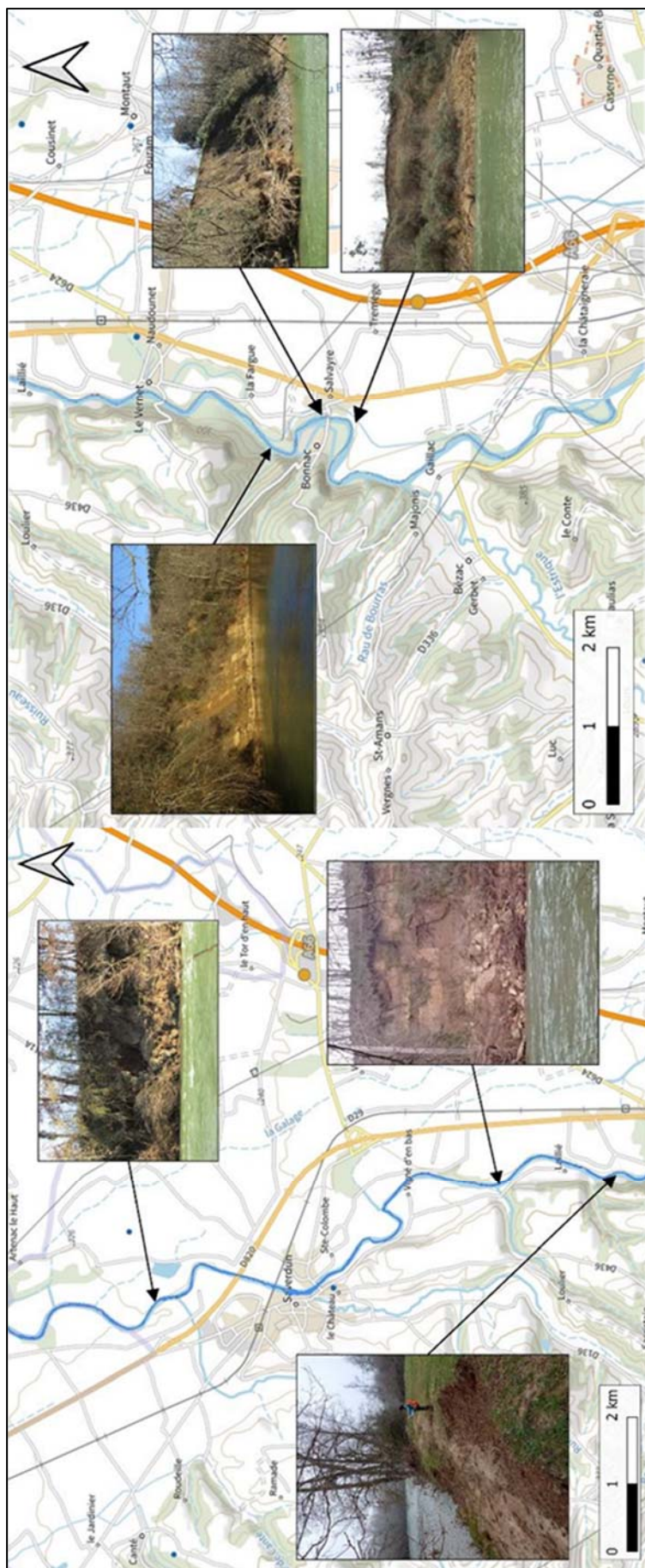


FIGURE 48 - REPRESENTATION DES IMPACTS DE LA CRUES LA PLUS RECENTE (JANVIER 2022) LORS DES RELEVÉS DE TERRAIN. FOND DE CARTE IGN

Tous ces éléments ont été reportés sur une carte disponible dans l'Atlas cartographique (pp. 35-48 de l'atlas). Ce travail de recensement met en lumière les zones les plus propices à l'érosion qui peuvent être intéressantes à intégrer dans la mise en place d'un protocole de suivi du cours d'eau.

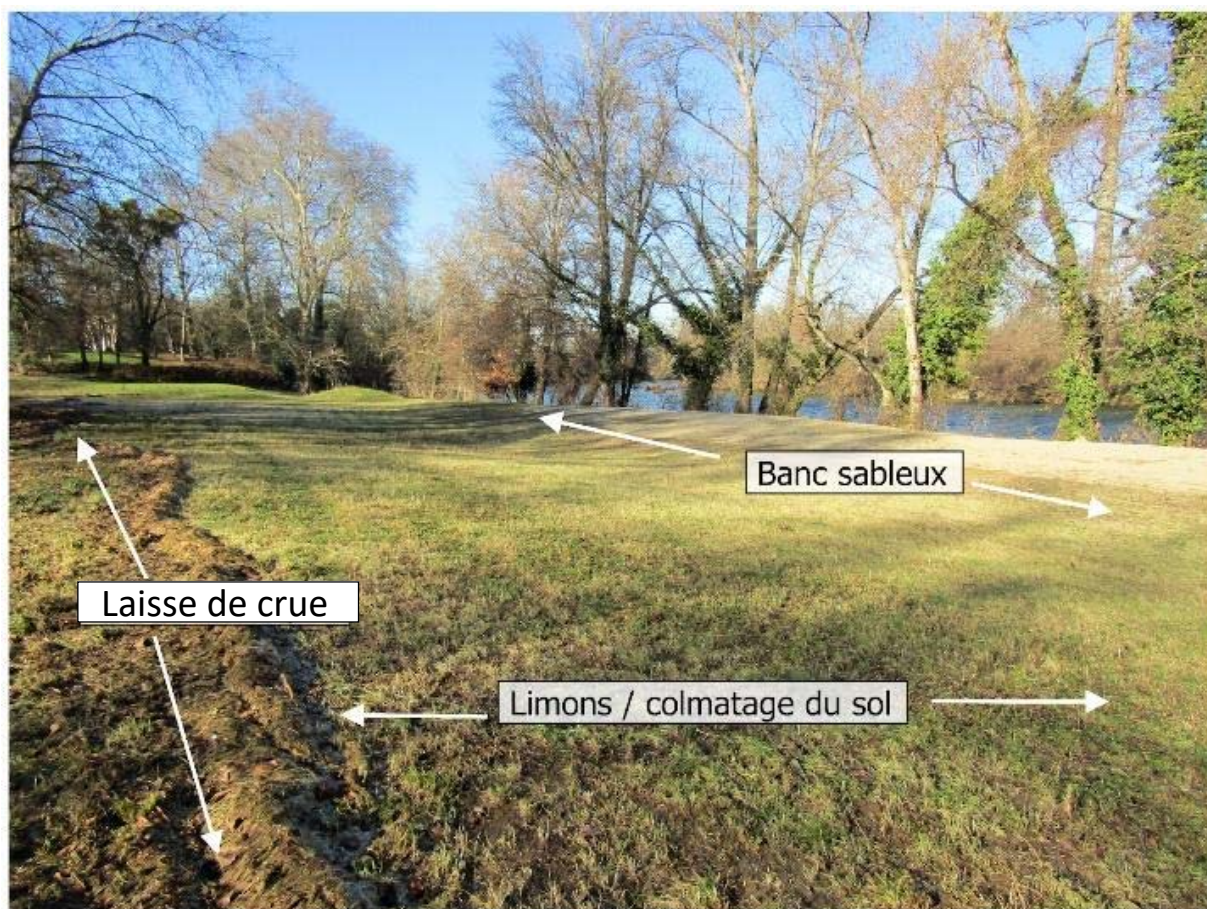


FIGURE 49 - ZONE DE DEPOT DE FINES IMPORTANT DANS LE LIT MAJEUR AU NORD DE LA COMMUNE DE SAVERDUN



FIGURE 50 - ARBRES DERACINES SUR LA COMMUNE DE SAVERDUN

- 3^{ème} partie -

Regard prospectif sur l'Ariège : indicateurs et protocoles de suivi

I. Diversité et définition des indicateurs de suivi

Les hydrosystèmes sont des milieux dynamiques qui connaissent de nombreux changements. En ce qui concerne la rivière Ariège et le tronçon court-circuité (TCC) de Pébernat, ils ont été impactés par des aménagements, tels que la construction du barrage dont les travaux ont commencé en 1947. Cet aménagement a provoqué un déficit en eau entraînant une modification de la sinuosité globale du cours d'eau, mais aussi des modifications du lit mineur. Afin de suivre ces évolutions géomorphologiques et dans le cadre de la commande du SYMAR Val d'Ariège, on cherche à suivre l'état des caractéristiques physiques du cours d'eau (type et répartition des sédiments, largeur du lit, profondeur, caractéristiques d'écoulements...) pour comprendre les dynamiques de transport sédimentaire et leurs impacts sur le milieu fluvial (morphologie, biodiversité...).

Pour suivre et quantifier ces évolutions hydromorphologiques, les indicateurs de suivi sont un outil pertinent. Ils permettent, à l'aide de paramètres mesurables, de définir un état du cours d'eau (ADEME, 2021). En effet, mettre en place des indicateurs de suivi permet d'harmoniser les relevés afin qu'ils puissent être comparés et réalisés par différents opérateurs, ce qui en fait de bons outils de suivi. Ils permettent de définir un état à un temps "T". Le niveau de complexité se définit notamment par la diversité et le nombre de relevés que demande l'indicateur. Si cette complexité permet d'obtenir une valeur plus fiable, elle peut être un obstacle à la reproductibilité car coûteuse en temps et/ou matériel. Gage de leur fiabilité, des protocoles ont été mis au point afin de permettre une gestion et un suivi complet des cours d'eau. Ces protocoles préconisent l'utilisation d'indicateurs permettant de prendre des mesures sur le terrain et de rendre compte des besoins et des sites en difficulté.

La Directive-Cadre sur l'Eau fixe comme objectif le bon état écologique des cours d'eau, et c'est grâce aux indicateurs qu'il est possible de suivre l'avancée de la gestion et de l'état de ces derniers. Ce bon état écologique doit être atteint par tous les États membres de l'Union Européenne et concerne les eaux de surface, tout comme les eaux souterraines. A l'échelle nationale, la DCE impose un suivi des cours d'eau depuis les années 2000. Pour assurer ce suivi, l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) et l'Office Français de la Biodiversité (OFB) ont conçu trois protocoles : CARHYCE (Caractérisation de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau), SYRAH-CE (Système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau) et AURAH-CE (AUDit RAPide de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau) (Baudoin, 2017 ; Valette 2012 ; Valette, 2013). Ces protocoles s'appuient sur l'évaluation du fonctionnement de l'hydrosystème et sont une aide pour caractériser l'état des cours d'eau.

Le protocole CARHYCE est un protocole national standardisé utilisé afin de recueillir des données de terrain et quantifier le niveau d'altération hydromorphologique du cours d'eau. Les principaux objectifs de ce protocole sont de caractériser les cours d'eau au niveau stationnel, d'assister la conception de programmes de restauration ou de conservation et d'en suivre l'efficacité. Il est composé de deux parties : un suivi écologique, permettant d'étudier le lit mineur, le lit majeur et la biodiversité qu'ils contiennent ; et un suivi géomorphologique permettant de cartographier les faciès d'écoulement et de mesurer la granulométrie. Ces suivis sont à réaliser tous les 3 ans. Leur mise en place se fait dans des conditions précises. En effet, ce protocole s'applique aux cours d'eau accessibles

à pied et où l'installation de matériel peut être réalisée dans de bonnes conditions de sécurité. Il doit être réalisé à un débit proche du débit moyen afin de faciliter la lecture des faciès d'écoulement. Les relevés de flore, permettant de qualifier les types d'habitats présents dans la ripisylve, doivent être réalisés lors de la phase végétative des végétaux. L'ensemble du protocole est réalisé sur un site représentatif du cours d'eau appelé station. Elle est composée d'une quinzaine de transects sur lesquels sont appliqués tous les indicateurs. Ensuite, toutes les données récoltées sont entrées dans une base de données nationale. Le protocole CARHYCE a déjà été mis en place en Ariège en 2018 sur 4 stations par l'Association des Naturalistes de l'Ariège-CEN (ANA, 2018) et également par l'ONCFS et la Région Ariège en 2017.

SYRAH-CE et AURAH-CE sont des méthodes d'audit visant à déterminer l'état hydro-géographique d'un cours d'eau à un temps précis. Ils ont été conçus pour révéler les pressions et altérations d'origine anthropique qui peuvent s'exercer sur un cours d'eau à différentes échelles.

SYRAH-CE est un protocole particulièrement complet. Il permet d'évaluer les continuités sédimentaires et biologiques mais peut parfois être très lourd à mettre en oeuvre. Le protocole nécessite de déterminer à l'échelle d'un tronçon les usages du sol et les aménagements. Ce travail préliminaire permet d'identifier les pressions et les risques susceptibles d'altérer l'hydrosystème. Il est également nécessaire de détailler avec une grande précision le cours d'eau afin de pouvoir réaliser des modélisations cartographiques de la zone.

AURAH-CE est la version simplifiée du protocole SYRAH-CE. Il doit être appliqué à des cours d'eau que l'on peut entièrement parcourir à pied, ce qui impose de découper le cours d'eau en plusieurs tronçons. Ce protocole ne mesure que 8 variables : informations générales sur la station, géométrie du lit à pleins bords, traces de curage, digues, protection des berges, granulométrie et évaluation du colmatage, indices d'incision et faciès d'écoulement ; ce qui simplifie la liste de matériels nécessaires pour sa réalisation.

Ces trois protocoles sont considérés comme des références dans le suivi hydrogéomorphologique des cours d'eau, car ils sont utilisés et formalisés par l'OFB et anciennement l'ONEMA. Cependant, leur fiabilité vient de leur exhaustivité. Ils sont réalisés sur des linéaires très longs et possèdent dans leur protocole des indicateurs nécessitant du matériel de pointe. Ils sont donc très exigeants et demandent de la main d'œuvre et des investissements financiers.

Dans sa commande, le SYMAR Val d'Ariège a fait état de moyens humains, techniques et financiers limités dans le cadre de cette mission. La réalisation de protocoles de suivis morphologiques aussi complexes que CARHYCE n'est donc pas pertinente. Nous nous sommes donc inspirés des paramètres qui suivent pour proposer des indicateurs plus adaptés au terrain d'étude et à son contexte. Chaque indicateur est présenté avec son protocole, les contraintes logistiques et matérielles, ses avantages et inconvénients, ainsi qu'un état 0 et l'analyse des données récoltées lorsqu'il a été possible de le faire. Ils sont organisés en deux catégories :

- les indicateurs globaux : basé sur l'observation, ils permettent de suivre plusieurs paramètres en un seul protocole ;
- les indicateurs géomorphologiques : ils se concentrent sur un seul paramètre, permettant des résultats très précis et détaillés.

II. Indicateurs globaux et d'observation

Les phénomènes hydromorphologiques affectent à la fois le lit mineur du cours d'eau mais aussi les berges et la végétation qui l'entourent. A l'aide d'outils comme les grilles d'observations, la cartographie, les images aériennes ou la photographie, il est possible d'observer ces phénomènes et leur dynamique à différentes échelles.

a) Observation

Lors de notre sortie sur le terrain, nous avons mis au point une grille d'observation qui nous a servi de document de travail et de collecte de données. L'objectif de ce document était d'acquérir rapidement et de manière synthétique un état des lieux du tronçon court circuité et de son milieu. Après réflexion, il nous a paru pertinent de partager ce document de travail avec le SYMAR car il est facilement mobilisable et reproductible sur l'ensemble du linéaire. Il peut permettre à terme de dégager des tendances d'évolution du cours d'eau, en reproduisant la prise de données régulièrement.

Notre grille d'observation n'est pas un protocole scientifique, il s'agit simplement d'un document de travail qui permet d'harmoniser la collecte et le traitement de données collectées sur le terrain. Aussi, en se basant sur l'observation, les données sont le résultat d'une interprétation. Elles revêtent ainsi une part de subjectivité car elles dépendent de l'observateur et de ses conceptions, connaissances, et interprétations des termes. Si ce travail est réalisé par plusieurs techniciens, il peut être nécessaire de se mettre d'accord sur les définitions.

Qu'est-ce qu'on observe et pourquoi ?

- Le lit mineur du cours d'eau : pour apprécier sa morphologie, la présence d'affleurements du substrat rocheux, d'îlots, de bancs sédimentaires ;
- Les berges : il est intéressant de noter leur composition (végétation, substrat, aménagement...), les différences observées entre chaque rive, puis d'analyser leur évolution ;
- Les bancs sédimentaires : zone de dépôt de sédiments, ce sont des milieux importants qu'il faut suivre sur le TCC pour apprécier leur stabilité/instabilité.

Matériel

- Une grille d'observation
- Un GPS

Logistique

Nous nous sommes servis de la cartographie *Openstreetmap* du TCC à l'échelle 50 mètres que nous avons découpée en zones. Cette échelle nous permet d'avoir une grande précision, et d'annoter les informations sur le document (bancs sédimentaires, zones d'érosion, faciès...). Une seule personne suffit pour compléter la grille d'observation.

Choix du lieu

Nous avons au total 15 points de collecte de données via les grilles d'observations pour l'ensemble du TCC. Nous avons décidé de remplir une grille d'observation à chaque fois que le paysage n'était plus homogène (présence d'un nouveau banc sédimentaire, berges différentes, présence de molasse dans

le fond du lit...). Pour la création de nouveaux points, nous conseillons de se baser sur ces mêmes principes.

Pas de temps

Nous avons réalisé l'état 0 lors de notre sortie terrain la semaine du 17 janvier. Nous conseillons de refaire ces observations :

- Une fois par an au minimum, notamment pour apprécier l'évolution de la végétation ;
- Avant et après des travaux, car ils vont faire évoluer les paramètres pris en compte notamment dans le cadre d'une recharge sédimentaire ;
- Après une crue, pour les mêmes raisons qu'exposées précédemment.

Traitement des données

Après la collecte des données, nous avons conçu un fichier Excel. Il comprend un feuillet "Analyse" permettant de faire des analyses plus approfondies de ces données, mais également d'effectuer des comparaisons entre plusieurs dates et/ou plusieurs zones géographiques. Ce document peut permettre d'identifier certains sites, ou encore de suivre les sites choisis en fonction des dates. On retrouve les mêmes éléments présents dans la fiche de terrain répartis en 4 catégories :

- Général : pour les informations sur l'emplacement, la date et l'observateur ;
- Les berges : divisées en rive droite/rive gauche permettant de noter des informations sur les sédiments ou alluvions qui s'y trouvent, ainsi que la végétation ;
- Le lit mineur : pour noter des informations sur le type de sédiments présent ou les affleurements, la typologie du cours d'eau ainsi que l'éventuelle présence de zones de dépôts ;
- Les bancs sédimentaires : dans le cas où il y aurait des bancs sédimentaires dans la zone, cette catégorie permet de noter les caractéristiques du ou des bancs en termes de sédiments et de végétation.

Ce document sert de récapitulatif des sorties de terrains et permet de simplifier la recherche de zones avec des bancs sédimentaires par exemple, puisque les informations peuvent directement être sélectionnées et triées (Fig. 51). On peut ainsi afficher uniquement les sites où la rive gauche est constituée de graviers et galets. Il est possible de combiner les critères de tri et ainsi afficher les zones à Bonnac où il n'y a pas de sédiment en rive gauche (Fig. 52). En fonction des besoins, ce document pourra aussi être utilisé pour représenter plus facilement les observations de terrain, comme on le suggère dans l'onglet "analyse" avec un exemple sur le suivi de végétalisation des bancs sédimentaires sur chaque site. Sans filtre, on voit que l'on trouve des bancs sédimentaires dans les secteurs A2, B, C, D, E2, F, G2, G3, H1 et H2, soit des zones de dépôts (Fig. 53).

Si l'on utilise le discriminant "Absent" pour la végétation on voit que seul les bancs C, D, G3 et H1 apparaissent sur le graphique. En ayant plusieurs dates pour un même site, il sera ensuite possible de voir si la végétation change sur le banc, s'il a tendance à se végétaliser ou de noter si l'on fait des travaux, l'état dans lequel le banc se trouve avant et après les travaux.

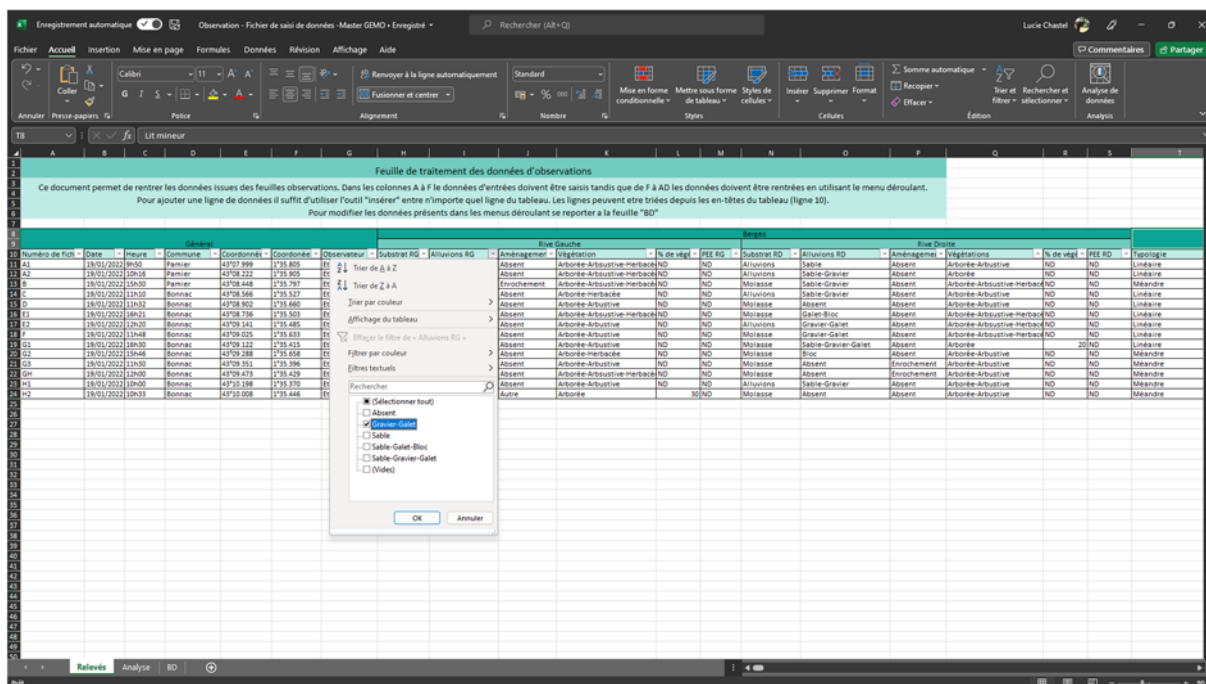


FIGURE 51 - CAPTURE D'ECRAN DE LA SELECTION D'UN CRITERE DE TRI DANS LA FEUILLE "RELEVÉ" DU DOCUMENT EXCEL "OBSERVATION"

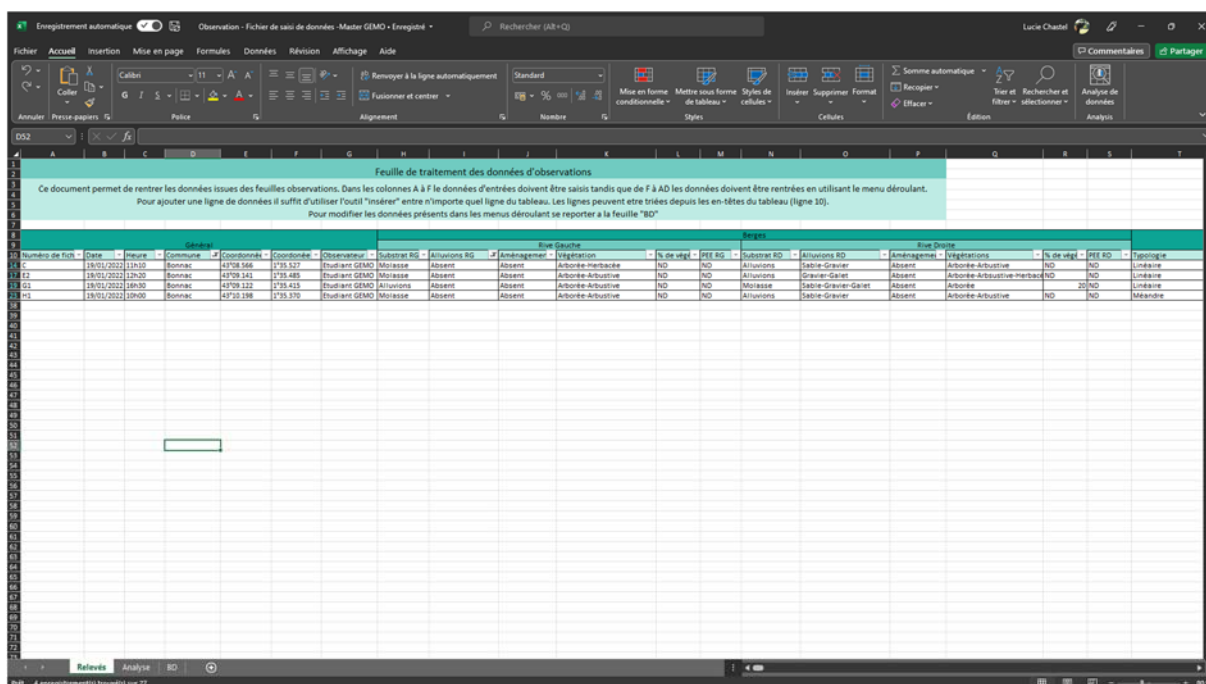


FIGURE 52 - CAPTURE D'ECRAN DE LA FEUILLE "RELEVÉ" DU DOCUMENT EXCEL "OBSERVATION" APRES APPLICATION DE CLE DE TRI

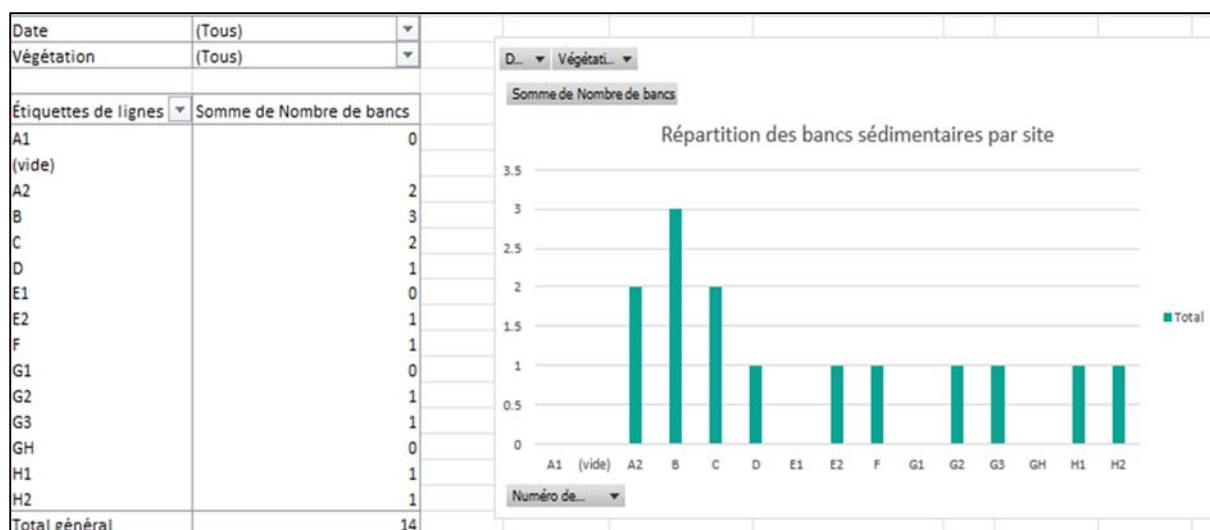


FIGURE 53 - CAPTURE D'ECRAN DE SUGGESTION DE PRESENTATION DES RESULTATS SUR LA FEUILLE "ANALYSE" DU DOCUMENT EXCEL OBSERVATION

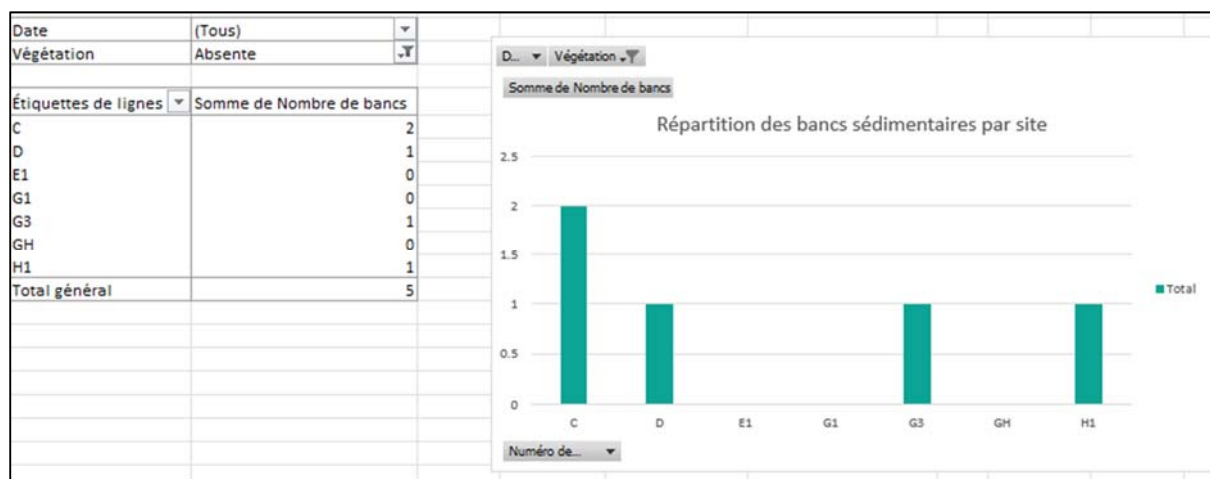


FIGURE 54 - CAPTURE D'ECRAN DE SUGGESTION DE PRESENTATION DES RESULTATS SUR LA FEUILLE "ANALYSE" DU DOCUMENT EXCEL OBSERVATION

b) Suivi photographique

Dans le cadre du suivi hydromorphologique de la rivière Ariège par le SYMAR, nous proposons la mise en place d'un suivi photographique. L'objectif d'un tel suivi est de noter l'évolution d'éléments remarquables et de leur environnement. Des photographies réalisées à des pas de temps précis, dans les mêmes conditions, permettent en les comparant, de mieux visualiser et caractériser la dynamique d'évolution du cours d'eau et de ses berges. Ainsi en appliquant un protocole de suivi photographique, les photographies prises sur le terrain et leurs informations annexes forment une base de données exploitable et deviennent un véritable outil dans la gestion du cours d'eau.

Appliquer un protocole photographique rigoureux permet d'identifier clairement les changements ou l'absence de changements en écartant les biais de perspective, de volume ou encore d'orientation. Le suivi photographique reste assez simple et peu coûteux, il peut donc être réalisé plus régulièrement que des protocoles géomorphologiques complexes. Cependant, à lui seul un suivi photographique

n'est pas suffisant car il n'est pas assez complet, il doit être accompagné d'autres protocoles plus "pointus". L'avantage de ce type de suivi est qu'il peut permettre de communiquer facilement avec les populations locales car il est visuel.

Protocole de rephotographie « manuelle »

Choix du lieu

Dans la mise en place d'un suivi photographique, il est important de définir ce que l'on souhaite photographier : une zone d'érosion, un banc sédimentaire, etc. Une fois les éléments choisis, il faut trouver le bon point de vue. Le choix du "bon" point de vue est défini selon plusieurs critères (*Méthode de l'observatoire photographique du paysage*, 2008) :

- L'accessibilité : un point facilement atteignable, stable, qui ne sera pas modifié au cours du temps, pour permettre la rephotographie. Le site d'observation est accompagné d'un itinéraire bien précis, réalisé de manière rigoureuse qui permettra de retrouver le point photographique exact. Ce travail peut être facilité par la prise de coordonnées GPS ;
- Un point de vue dégagé : afin de pouvoir reproduire la photographie au cours de différentes saisons, il faut prendre un point de vue dégagé sur les éléments à suivre. Il est nécessaire de considérer l'évolution de la végétation au cours des saisons, ce qui peut gêner la prise de photographies. Un entretien régulier peut être envisagé pour maintenir le point de vue ;
- Des éléments remarquables : pour faciliter la rephotographie il est important d'inclure dans le cadre de la photo des éléments remarquables fixes et pérennes tels que des bâtiments, des routes, des lignes électriques...

Matériel

Dans ce protocole, le suivi photographique peut être réalisé avec un appareil photo ou bien avec un téléphone portable disposant d'un appareil photo.

Lorsqu'on réalise un suivi photographique, l'appareil photo est le meilleur outil de travail à disposition, notamment parce qu'il permet d'enregistrer facilement des informations précieuses telles que la focale et le zoom utilisé (*Méthode de l'observatoire photographique du paysage*, 2008). Cela permet lors de la rephotographie de retrouver les paramètres exacts utilisés pour la photo initiale et donc d'obtenir un cadrage identique. Pour un appareil photo qui réalise des photos de bonne qualité, il faut compter un budget de 500 euros minimum.

En ce qui concerne un appareil photo sur téléphone portable, il est possible aujourd'hui de réaliser des photos de très bonne qualité avec des portables récents. L'inconvénient d'un appareil photo sur smartphone est qu'il est plus difficile de retrouver les paramètres exacts pour faire une rephotographie, il est difficile d'obtenir un cadrage parfaitement identique dans le cadre d'un suivi photographique.

Installation de l'appareil photo :

Un fois le "bon" point de vue identifié, le ou la photographe devra également respecter plusieurs critères concernant le matériel utilisé pour la photographie (*Méthode de l'observatoire photographique du paysage*, 2008) :

- L'appareil photo doit être paramétré (angle, focale et zoom) et lors de la rephotographie ces éléments devront être conservés. La conservation d'un même appareil photo tout au long du suivi permet d'assurer une certaine précision dans la prise de photo. Toutefois, si pour des raisons techniques, l'appareil photo venait à changer, il faudra le paramétrer comme le précédent. Des outils comme les grilles peuvent apparaître sur l'écran de l'appareil photo et servir de guide pour le cadrage ;
- Trépied - Un trépied est un élément qui peut grandement faciliter la rephotographie et faciliter la prise de vue. En effet, le trépied va permettre de fixer la hauteur de la prise de vue mais aussi de stabiliser l'objectif afin d'obtenir une photographie nette, avec une ligne d'horizon droite ;
- Le choix du photographe - Il est important que les photographies soient prises si possible par le même opérateur afin d'assurer la même rigueur dans la réalisation de la photographie.

Avant de fixer les réglages définitifs, il peut être intéressant de réaliser plusieurs essais, pour obtenir la photo qui permettra le meilleur suivi et éviter des erreurs telle qu'une ligne d'horizon décalée. Une fois ces essais réalisés, prendre la photo.

Noter les informations

Une fois l'installation validée, il faut reporter toutes ces informations (caractéristiques de l'appareil photo, utilisation d'un trépied, élément du paysage...) dans le tableau (cf. annexe 1) et ajouter à ces informations les coordonnées GPS, l'heure, la date, les conditions météo et toutes autres observations (*Méthode de l'observatoire photographique du paysage*, 2008). Ces métadonnées des photos sont importantes dans le cadre d'un suivi puisque le but est, encore une fois, de rephotographier. Plus les informations de la première photo seront précises et complètes, plus le suivi sera simple à assurer. Cette première photo permet de faire un état 0. Dans le cadre du suivi photographique, il faudra respecter les conditions fixées lors de ce premier passage.

Pas de temps

Pour un suivi des changements globaux de morphologie sur l'ensemble du linéaire, 2 photos par an peuvent être suffisantes, à 6 mois d'intervalle. Sur un suivi de projet, après des opérations de recharge ou une décision de mise en libre évolution d'un tronçon, un suivi plus régulier avec une photo par mois peut être utile pour mieux détecter les changements et les impacts des différents types de gestion.

Suivi photographique

Pour assurer le suivi, il faut ensuite retourner prendre des photos. Conserver les caractéristiques de la première photo et obtenir une nouvelle photo identique est essentiel pour pouvoir comparer et quantifier les changements. En effet, un changement de focale, de zoom ou d'angle peut modifier notre perception des volumes et des distances, ce qui peut fausser l'interprétation (*Méthode de l'observatoire photographique du paysage*, 2008). Enfin, pour s'assurer d'une bonne rephotographie il faut :

- identifier correctement le lieu de la photo ;
- identifier l'orientation de la photo, son angle et la hauteur de prise de vue ;
- s'assurer que les éléments remarquables soient correctement placés dans le cadre. On peut s'aider des lignes directrices dans le paysage et de la grille de l'appareil photo pour s'assurer que tous les éléments soient correctement placés ;

- prendre plusieurs photos respectant ces critères pour être certain d'avoir une photo correcte. Il est d'autant plus essentiel de prendre différentes photos lorsque l'on a peu d'informations sur la 1ère photo ou que l'on change d'appareil, ce qui est généralement le cas lorsque l'on rephotographie des lieux à partir de clichés historiques ;
- Noter les informations qui ont pu changer : date, heure, météo, photographe, paramètre de l'appareil photo et autres observations.

Protocole « piège-photographique »

Le protocole de suivi photographique présenté ci-dessus est un protocole réalisé manuellement par un photographe. Il nécessite une grande rigueur et du temps. Il existe une alternative à cela : des pièges photographiques fixes. Le piège photographique consiste à prendre de façon automatique par un appareil installé de façon pérenne une série de photos sur une longue période, avec un pas de régulier prédéfini. Un opérateur n'a plus ensuite qu'à venir télécharger les photos sans la contrainte d'un repositionnement correct et d'un bon cadrage de la photo. De plus ce dispositif permet de prendre des photos à un intervalles beaucoup plus rapprochés, heure par heure par exemple, ce qui serait impossible à mettre en place en photographie manuelle.

L'acquisition de pièges photographiques peut représenter un certain coût à l'achat. L'entrée de gamme se situe autour de 100 euros mais ces modèles sont peu fiables. En effet, pour garantir la bonne réalisation du protocole il est essentiel que les appareils soient fiables, étanches et possèdent une charge suffisante avec des batteries au lithium ou des piles de qualités. On commence à trouver ces critères dans des gammes autour de 500€. Le prix peut encore grimper si l'on souhaite une meilleure définition de photos ou des photos de nuit (Barraquand, 2016). Une fois paramétré, l'appareil peut prendre plusieurs photos par jour tout en conservant l'angle de vue et les autres paramètres de la photographie tels que la focale. L'opérateur n'a donc qu'à aller relever les données et vérifier le bon état du matériel, tous les 3 mois environ, bien que le matériel soit censé être fonctionnel pour 6 mois. Leur installation demande un travail d'observation similaire au protocole manuel et ils doivent être installés de façon à être à l'abri des crues et ne pas être détectables par le public : en général sur des arbres ou poteaux déjà présents, en accord avec le propriétaire sur des terrains privés et en veillant à ce que le champ de la photographie ne porte pas atteinte à la vie privée.

Le choix du lieu repose sur les mêmes critères que la photographie manuelle. Le piège photographique permet en plus de suivre l'évolution de la hauteur d'eau dans la zone et ainsi d'estimer l'impact de ses variations sur le milieu (reconnexion de bras morts, submersion de bancs sédimentaires, érosion de « falaises » fluviales...). Pour cela, il est intéressant de rajouter une mire de mesure d'eau afin d'avoir un repère et de pouvoir déduire la hauteur d'eau directement des photos. Le pas de temps réduit entre les photos et la grande quantité de données permet de noter avec une plus grande précision des changements ou l'absence de changements, ainsi que l'origine des perturbations. Le traitement des images peut s'avérer être long, c'est pourquoi il faut clairement définir les éléments que l'on souhaite suivre avant de mettre en place le matériel.

Lors de la mise en place de ce dispositif, il faut réaliser quelques tests pour s'assurer de l'angle de vue, mais aussi du bon paramétrage de l'appareil (horodatage des clichés, pas de temps entre les prises de vues automatiques, bon déclenchement de l'appareil). Il existe une autre alternative similaire au piège photographique, il s'agit d'une caméra Timelapse. Le Timelapse permet de réaliser une animation vidéo avec une série de photographies à un intervalle de temps précis. Cette caméra est fixée sur un point fixe pendant une période donnée et fonctionne en toute autonomie. Une fois que l'on relève la

caméra sur le terrain, on obtient un résultat sous forme d'une courte animation vidéo qui condense en quelques minutes l'événement observé qui en réalité a durée des semaines.

Il faut compter de 500 à 2000 euros pour ce type de matériel. C'est un dispositif plutôt coûteux mais qui pourrait s'avérer intéressant pour étudier l'évolution d'un chantier ou encore l'évolution des bancs sédimentaires sur la rivière Ariège. En effet, sur certains secteurs qui présentent des bancs sédimentaires vifs très mobiles, la mise en place d'une caméra Timelapse permet d'observer finement l'évolution sur une longue période de ces accumulations sédimentaires et de leur transit (Zone Atelier Bassin du Rhône, 2017).

Présentation de nos exemples : éléments remarquables et analyses

Au cours du mois de janvier, nous avons cherché des sites pour lesquels la mise en place d'un suivi photographique serait intéressant. Au total, sur le tronçon court-circuité de Pébernat, nous avons identifié 8 points photographiques, tous accessibles facilement et présentant des éléments remarquables simples servant de repères pour une rephotographie. Ces éléments ne sont pas toujours immuables et peuvent disparaître, des arbres ou des portions de berge par exemple. Nous avons donc cherché à multiplier ces éléments de repères sur nos clichés afin de faciliter la rephotographie.

De plus, même en ayant ces éléments remarquables de bonne qualité et l'endroit exact de la prise de vue, il peut être nécessaire de faire des traitements sur les photographies (recadrage, zoom...). Il est nécessaire d'en réaliser plusieurs sur le terrain, en modifiant les proportions ciel/terre par exemple, pour être sûr d'avoir une bonne rephotographie. Il peut être intéressant de marquer à la peinture (si possible) les points de prise de vue pour faciliter la prise de photo.

Point 1 - Ligne haute tension

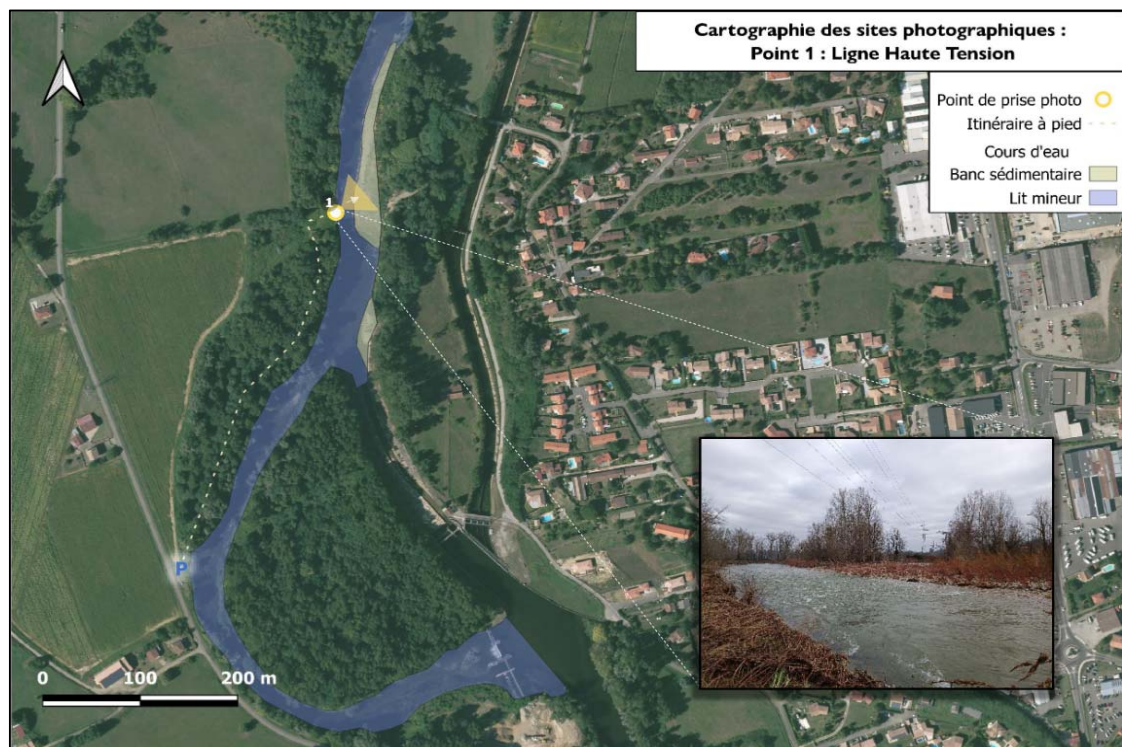


FIGURE 55 – LOCALISATION ET ITINERAIRE DU POINT N°1



FIGURE 56 - BANC SEDIMENTAIRE VEGETALISE, JANVIER 2022

Cette photographie (Fig. 56) est prise au début du tronçon court-circuité, sous la ligne électrique. Elle nous donne un bon point de vue sur le **banc sédimentaire végétalisé**. Les éléments remarquables ici sont les **lignes** et les **pylônes électriques**.

Point 2 - Route d'Escosse



FIGURE 57 - BANC SEDIMENTAIRE ROUTE D'ESCOSSSE EN MAI 2013 (A GAUCHE) ET EN FEVRIER 2022 (A DROITE)

SOURCE : SYMAR VAL D'ARIEGE & MASTER GEMO

Le cliché pris route d'Escosse en mai 2013 (Fig. 57) nous montre un point de vue intéressant sur un banc sédimentaire. Ce point de vue nous permet d'apprécier l'évolution du linéaire du cours d'eau qui, à cet endroit, est très instable en fonction des crues. Le banc sédimentaire au premier plan est particulièrement intéressant car régulièrement mobilisé par des crues. La photographie est prise légèrement en biais sur la droite, la ligne d'horizon n'étant pas horizontale.

Les éléments remarquables sont : le **poteau électrique** à droite de la photographie, l'**étiquette bleue** et **les nœuds sur le poteau** peuvent également servir de repères pour la hauteur (au total, quatre paires de nœuds sont présents sur la photographie). Les deux clichés espacés de 9 ans permettent de voir l'effet de l'érosion sur l'endiguement qui protège la berge sur laquelle se trouve la route.

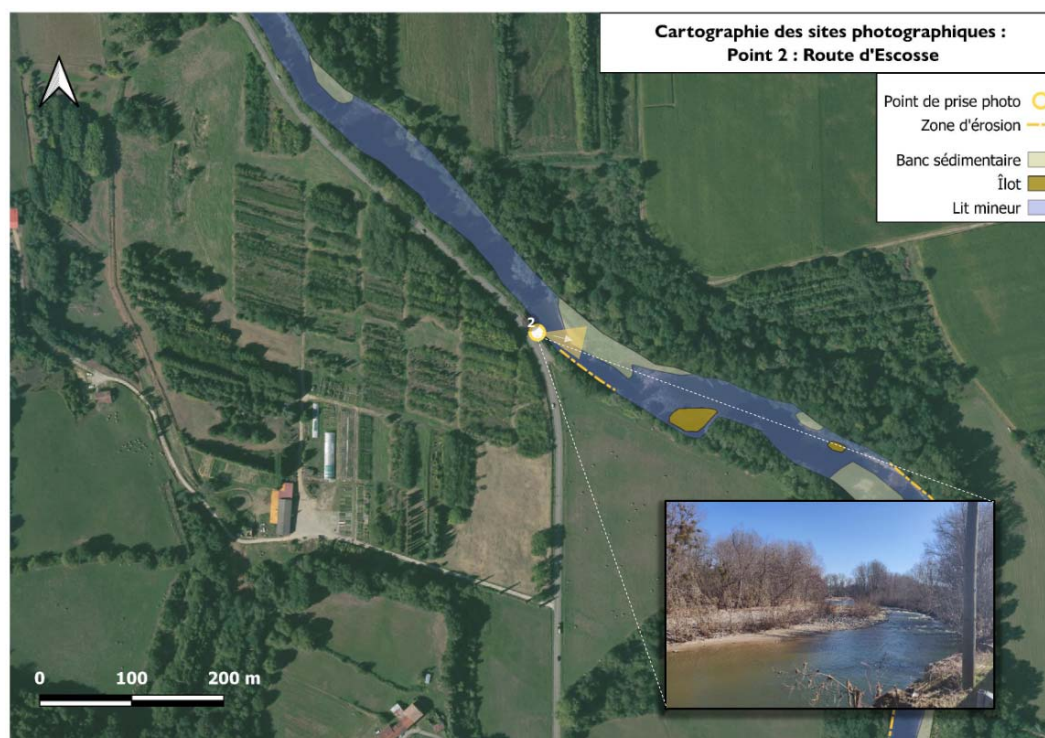


FIGURE 58 - CARTOGRAPHIE ET ITINERAIRE DU POINT N°2

Point 3 - Coteaux molassiques forêt bambou



FIGURE 59 - FALAISE DE MOLASSE EN FACE DE LA FORET DE BAMBOU, PRISE EN JANVIER 2022

Cette photographie (figure 59) nous permet d'apprécier l'évolution de l'érosion de cette falaise de molasse. Cependant, il ne s'agit pas d'un repère fiable, car à cause de l'érosion justement, elle peut facilement évoluer. Ce cliché risque d'être compliqué à refaire manuellement car le point de vue est sur le banc sédimentaire, et qu'il n'y a aucun aménagement et/ou élément remarquable qui permet de servir de repère. Le seul élément de paysage remarquable, permettant de reproduire les photographies, est **la limite supérieure des coteaux**.

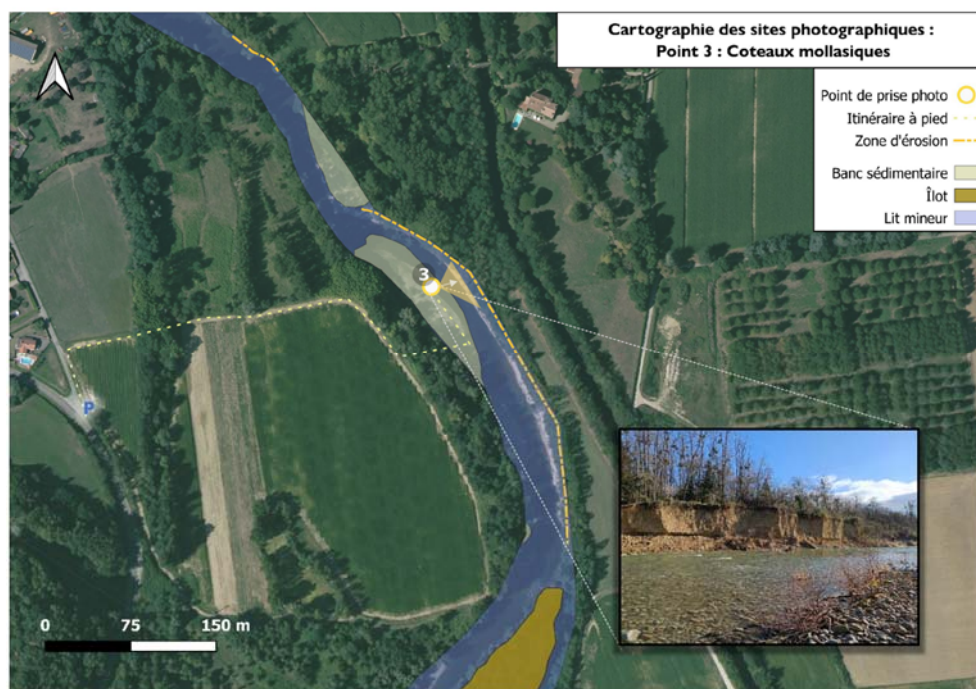


FIGURE 60 - CARTOGRAPHIE ET ITINERAIRE DU POINT N°3

Point 4 - Coteaux molassiques de Gaillac



FIGURE 61 - PHOTOGRAPHIE DE LA FALAISE DE MOLASSE DU HAMEAU DE GAILLAC, PRISE EN JANVIER 2022

Comme la photographie précédente, la figure 61 permet d'apprécier l'évolution de l'érosion d'une falaise de molasse au niveau du hameau de Gaillac. La photographie est prise depuis la rive droite de l'Ariège. Les éléments remarquables sont l'église et la ligne électrique située au milieu de la photographie.

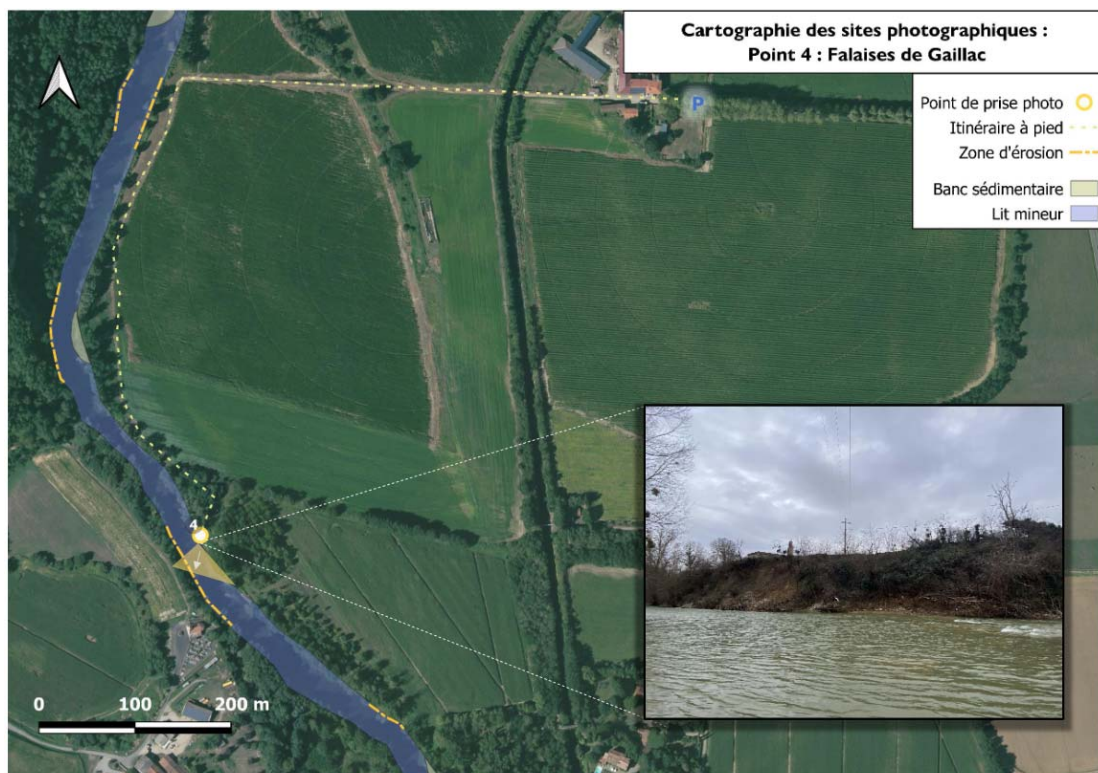


FIGURE 62 - CARTOGRAPHIE ET ITINERAIRE DU POINT N°4

Point 5 - Pont Bonnac



FIGURE 63 - VUE SUR L'ARIEGE DEPUIS LE PONT DE BONNAC (ANNEES 1950) (A GAUCHE), ET EN FEVRIER 2022 (A DROITE)
SOURCE : [HTTPS://DELCAMPE.NET](https://delcampe.net) & MASTER 2 GEMO

La photographie de février 2022 double celle prise dans les années 1950, après l'installation de l'usine hydroélectrique de Pebernats. Il est impossible d'obtenir la rephotographie exacte de ce point, les paramètres de l'appareil photo étant différents. La photographie de référence sera alors celle de février 2022. Elle nous permet d'apprécier l'évolution du banc sédimentaire en arrière-plan ainsi que la berge rive gauche de l'Ariège. Nous l'avons prise sur le pont de Bonnac et nos points de références sont : la ligne de crête de la colline et le mur, vestige de l'ancien pont de Bonnac.

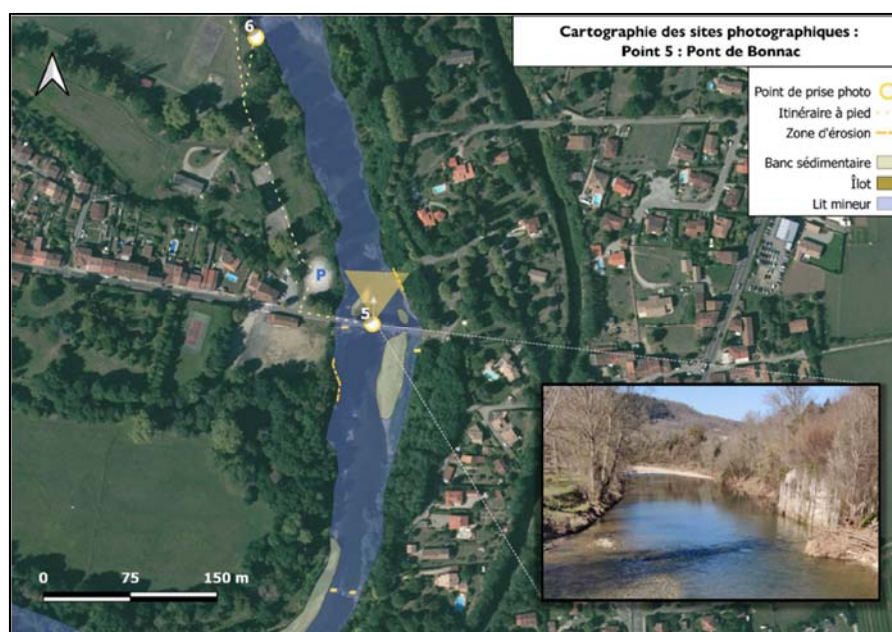


FIGURE 64 - CARTOGRAPHIE ET ITINERAIRE DU POINT N°5. SOURCE : MASTER 2 GEMO

Les deux clichés montrent bien l'évolution de la rivière sur les 70 dernières années. La morphologie du cours d'eau a été profondément modifiée. Les bancs sédimentaires présents sur les photographies ont évolué : celui situé dans la continuité de la berge rive gauche a disparu, tandis que le banc sédimentaire en arrière-plan s'est élargi vers la rive droite, participant à l'enfoncement du lit mineur dans la molasse sur la rive gauche. La persistance de ce banc prouve sa stabilité, d'autant plus qu'il est devenu plus important. Aujourd'hui il n'est plus végétalisé, grâce aux travaux de dévégétalisation du SYMAR ainsi que la crue de janvier 2022.

Point 6 - Banc Bonnac



FIGURE 65 - BANC DE BONNAC RIVE DROITE EN NOVEMBRE 2021 (A GAUCHE) ET EN FEVRIER 2022 (A DROITE)

Le point de vue visible sur la figure 65 permet de suivre l'évolution d'un banc sédimentaire stable proche à l'aval du pont de Bonnac. La présence de ce banc entraîne une incision du lit dans la molasse en rive gauche. Des travaux de coupe et déracinement de la végétation sont réalisés sur ce banc par le SYMAR et la rephotographie permettra d'apprécier les évolutions du milieu. Les repères pour la rephotographie sont le **bâtiment** situé sur le centre de la photographie ainsi que le **poteau électrique**.

Les photographies pré- et post crue permettent de montrer l'intérêt des travaux de coupe et de déracinement de la végétation : ils ont facilité la mobilisation des sédiments et l'érosion du banc lors de la crue de janvier 2022. La crue a emporté la couche supérieure du banc mais a aussi érodé sa partie latérale gauche ; la végétation herbacée a été arrachée par la crue, laissant le banc nu. La berge rive droite semble avoir été épargnée par la crue. Cet exemple prouve l'intérêt d'un suivi photographique rigoureux permettant de suivre et comprendre l'efficacité des mesures de restauration.

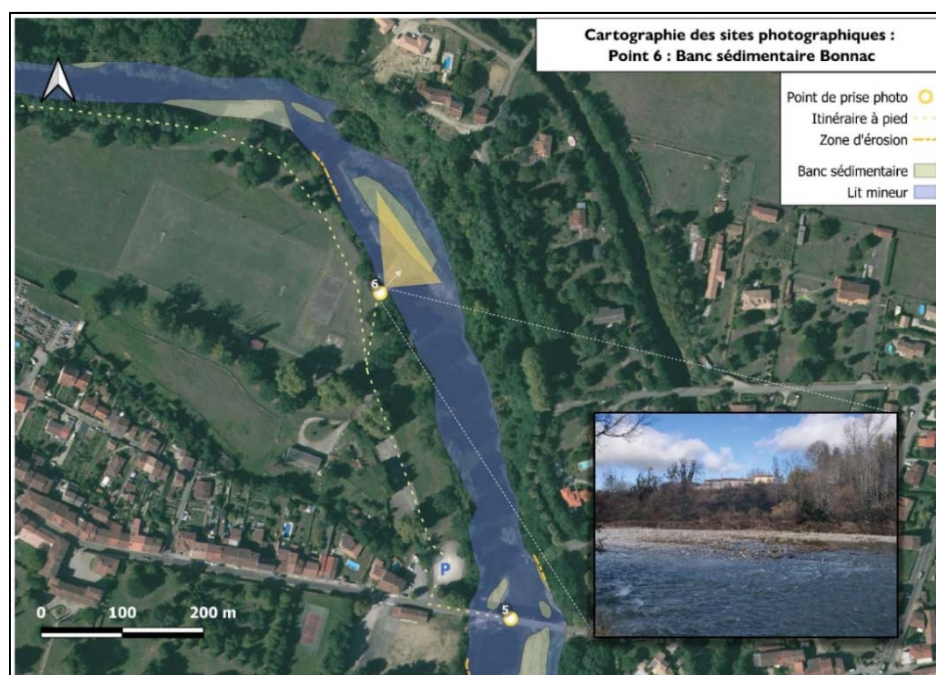


FIGURE 66 - CARTOGRAPHIE ET ITINERAIRE DU POINT N°6

Point 7 – Méandre de Bonnac méandre



FIGURE 67 - MEANDRE DE BONNAC, CLICHES PRIS EN AVRIL 2013 (A GAUCHE) ET FEVRIER 2022 (A DROITE)
SOURCE : SYMAR VAL D'ARIEGE & MASTER 2 GEMO

Ce point photographique nous permet d'apprécier l'évolution de la rive droite et de la berge de la rivière. Ce méandre est intéressant car c'est un point relativement instable, où les berges et la végétation bougent beaucoup en fonction des crues. Les éléments remarquables sont les **deux arbres** ayant des ramifications en Y. Comme on l'a dit supra, ces points remarquables ne sont pas immuables et peuvent disparaître à cause d'une crue ou d'une coupe ; il faudra donc être vigilant. Même si cela reste difficile à confirmer avec seulement deux clichés, le lit de la rivière semble s'être incisé ici.

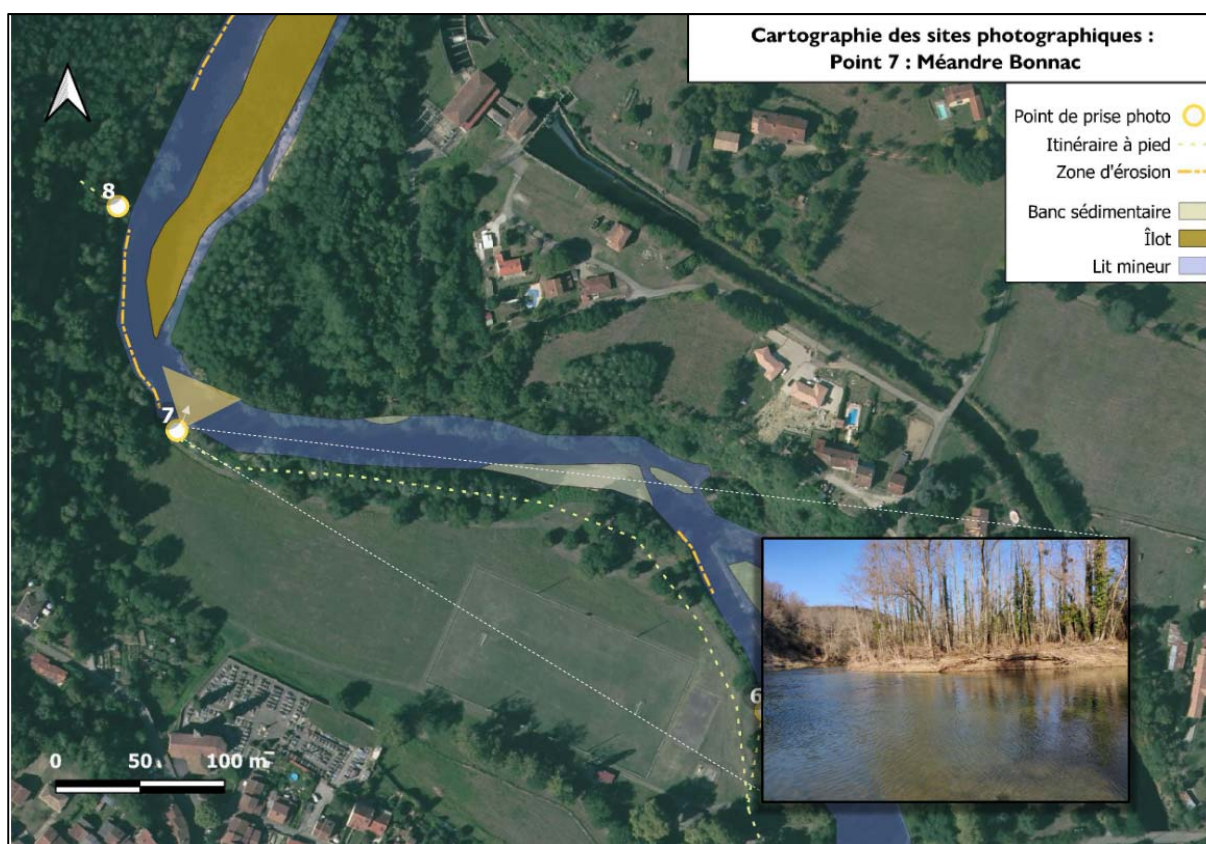


FIGURE 68 - CARTOGRAPHIE ET ITINERAIRE DU POINT N°7

Point 8 - Bonnac point haut



FIGURE 69 - PHOTOGRAPHIES DU POINT "BONNAC POINT HAUT" VUE DU CASTELA EN AVRIL 2019 (A GAUCHE) ET EN FEVRIER 2022 (A DROITE). SOURCE : SYMAR VAL D'ARIEGE, MASTER 2 GEMO

Cette photographie est prise depuis la colline appelée *Le Castela*. Ce point de vue en hauteur, en fin de tronçon court-circuité, permet une vision du banc sédimentaire important situé en rive droite. Les points de vue en hauteur sont particulièrement intéressants car ils permettent de voir l'ensemble des éléments géomorphologiques du site.

La *centrale hydroélectrique* et le **pylône électrique** au milieu de la photographie, et l'**arbre** en haut à gauche, peuvent servir de repères pour la rephotographie.

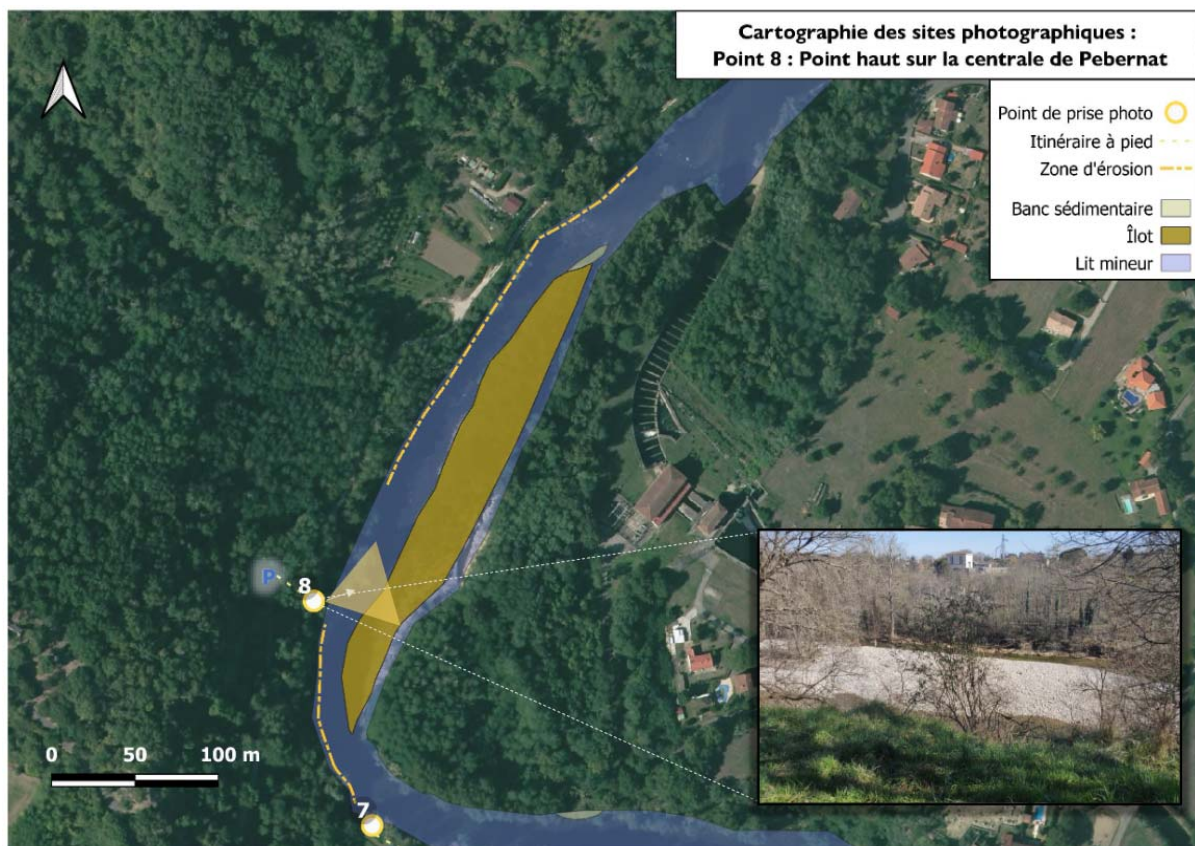


FIGURE 70 - CARTOGRAPHIE ET ITINERAIRE DU POINT N°8

III. Indicateurs géomorphologiques

a) Faciès d'écoulement

Les faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques, sont des portions de cours d'eau (d'une longueur comprise entre 1 et 10 fois la largeur plein bords du cours d'eau) présentant une certaine homogénéité structurelle et fonctionnelle sur le plan des vitesses, des hauteurs d'eau, de la granulométrie du substrat, de la pente du lit, de la ligne d'eau et des profils en travers. L'uniformité qualifie la globalité du faciès, mais ne signifie pas une absence de diversité des conditions intra faciès (Malavoi et Souchon, 2002 & OFB).

Les faciès d'écoulement sont considérés comme le reflet des contraintes exercées par la géologie et de la morphologie et du style fluvial adoptés par la rivière. L'identification de ces faciès peut se révéler particulièrement utile dans le cadre de suivis biologiques, car ils permettent de déterminer les types d'habitats disponibles pour la faune. Les prélèvements de mésofaune peuvent être orientés sur des secteurs présentant des faciès d'écoulement lents et calmes, là où les prélèvements piscicoles seront plutôt orientés sur des faciès turbulents. De plus, un changement de faciès peut refléter un changement de morphologie important et donc une zone où il serait intéressant de renouveler des campagnes de mesure d'indices comme la granulométrie.

L'identification des faciès d'écoulement a souvent été décriée car trop complexe et facilement soumise aux biais de l'observateur. Néanmoins, les travaux de Malavoi (Malavoi, 1999) ont permis la mise en place d'une clé de détermination, réduisant les biais et faisant du suivi des faciès d'écoulement un solide indicateur du bon état de la rivière. Les faciès d'écoulement, générés par les processus géodynamiques d'érosion et de transport solide, sont l'un des principaux outils permettant de faire le lien entre le fonctionnement hydromorphologique et le fonctionnement écologique d'un cours d'eau.

Protocole

La réalisation de ce protocole peut nécessiter l'usage d'une mire de mesure d'eau et d'un courantomètre afin de mesurer la profondeur du cours d'eau et son débit.

La clé de détermination rédigée par Malavoi et aujourd'hui utilisée par l'OFB, permet d'identifier 11 types de faciès d'écoulement dont 6 majeurs et 5 secondaires. Ces 11 types peuvent être regroupés en 4 méga-types pour simplifier la détermination (voir figure ci-dessous). La hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement sont des paramètres importants dans l'identification des types de faciès. Le protocole d'identification des faciès doit donc être réalisé à un débit d'étiage proche du débit moyen mensuel sec. Il est également nécessaire de réaliser ce protocole sur tout le linéaire du cours d'eau afin de ne manquer aucun type d'habitats potentiel. L'identification des faciès d'écoulement se fait à deux niveaux selon l'OFB :

Niveau 1 : la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement permettent d'identifier les faciès « profond » et « peu profond » mais également de faire la différence entre faciès « lotique » et « lentique ».

- Faciès profonds, hauteur d'eau supérieure à 60 cm : chenaux lotiques (CLO), chenaux lenticques (CLE), mouilles de concavité (MOU), fosses de dissipation (FOS) ;
- Faciès peu profonds, hauteur d'eau inférieure à 60 cm : plats (PLA), plats lenticques (PLL), radiers (RAD), rapides (RAP), cascades (CAS) ;
- Faciès « lenticques », vitesses inférieures à 30 cm/s : mouilles, chenaux lenticques, plats lenticques ;
- Faciès « lotiques », vitesses supérieures à 30 cm/s : radiers, plats, rapides, chenaux lotiques.

Niveau 2 : Le profil en travers

Il permet de différencier les 4 grandes catégories évoquées ci-dessus en 11 faciès distincts (Fig. 71).

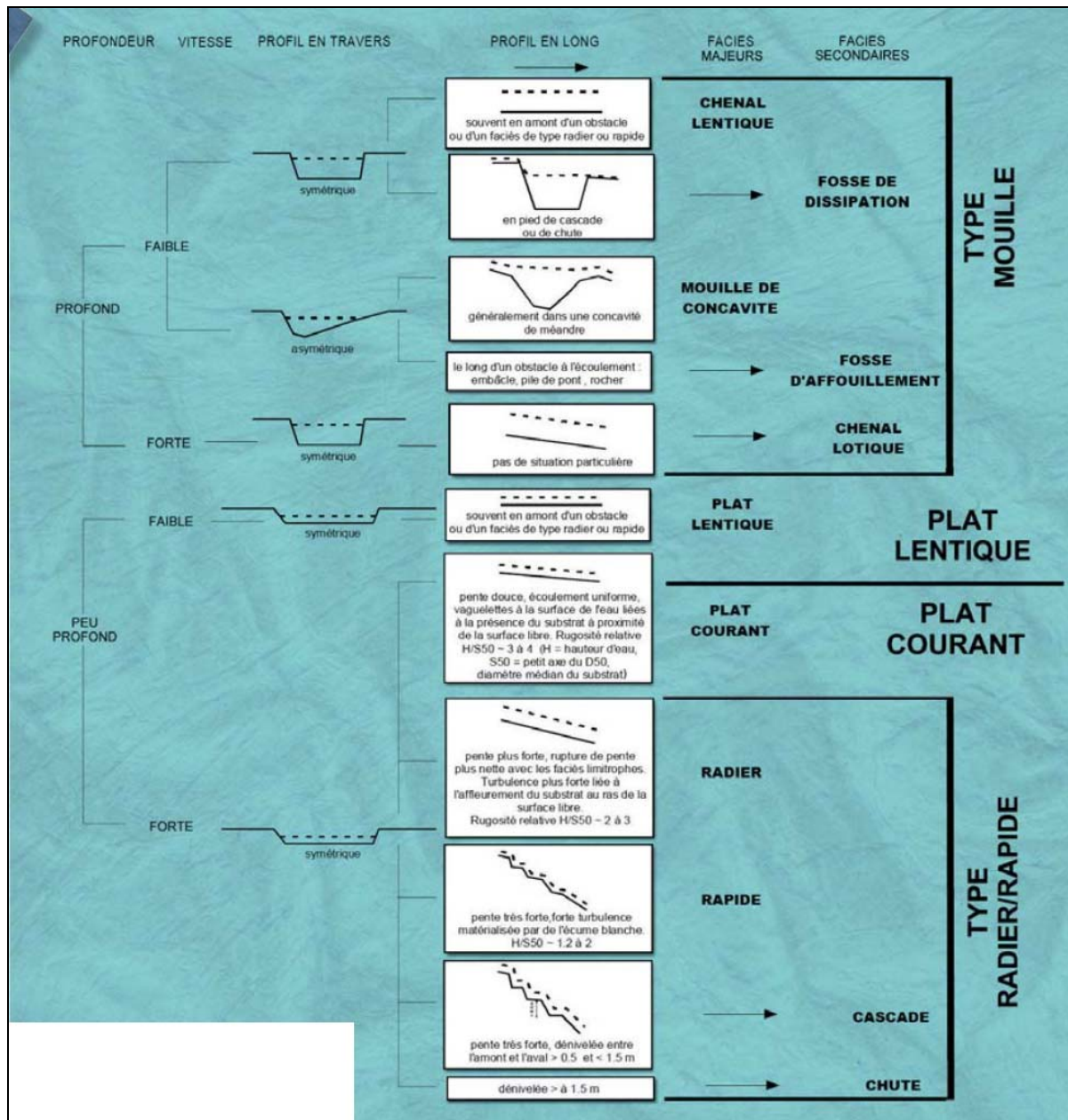


FIGURE 71 - CLÉ DE DÉTERMINATION SIMPLIFIÉE DES FACIÈS D'ÉCOULEMENT.
SOURCE : MALAVOI ET BRAVARD, 2010 D'APRÈS MALAVOI ET SOUCHON, 2002

Exploitation des résultats

Un cours d'eau en bon état est un cours d'eau présentant une certaine diversité de faciès d'écoulement. L'alternance de séquences types (radier/mouille ; radier/plat courant/mouille ; etc...) sont considérés comme des unités fondamentales d'une rivière naturelle en bon état.

Les faciès « lotiques » et peu profonds sont en principe majoritaires sur les cours d'eau. Ils apportent de l'oxygène dans l'eau par un brassage mécanique et sont indispensables à la faune aquatique, notamment les salmonidés. La présence de seuils, qui vont modifier la hauteur d'eau, peut faire disparaître les faciès peu profonds et également entraîner une réduction de la vitesse de l'eau.

Ce phénomène, dû à la présence de seuils, va engendrer de nombreux impacts négatifs sur la qualité de l'eau :

- une augmentation de la température notamment en étiage, ce qui va aggraver la baisse de la teneur en oxygène du cours d'eau ;
- une réduction des surfaces de brassage mécanique de l'eau, même si le seuil présente une chute d'eau importante ;
- une réduction de la vitesse de l'eau et donc une sédimentation plus importante des sédiments fins ; à long terme, les matières fines peuvent provoquer une fermeture des substrats grossiers et provoquer l'uniformisation du milieu, le rendant ainsi inapte à la reproduction ou au développement de nombreuses espèces de poissons ou d'invertébrés ; comme Malavoi le préconise dans son étude, ajouter un travail de granulométrie peut être intéressant afin d'associer à chaque faciès une taille de sédiments déposés ; le protocole de granulométrie proposé par Malavoi est très proche du Wolman Pebble Count présenté dans la partie suivante de ce rapport ;
- une multiplication trop importante des algues ;
- la stabilisation des berges et donc l'encaissement du cours d'eau.

Ces dépôts de sédiments sont par ailleurs amenés à être plus ou moins régulièrement évacués par un effet de « chasse ». Cet apport massif de sédiments fins dans l'eau peut aggraver la baisse de l'oxygène dissous dans l'eau et relarguer des micropolluants en quantité importante. Les sédiments fins peuvent également avoir un effet abrasif sur les branchies et les appareils respiratoires de la faune.

Plus la morphologie d'un cours d'eau se rapproche d'une morphologie « naturelle » avec succession de faciès lotiques et lenticques, plus l'autoépuration du cours d'eau est efficace. La réduction des zones lotiques dans un cours d'eau diminue également la diversité des habitats et impacte donc la biodiversité, en favorisant le remplacement des espèces d'eau vive par des espèces d'eau calme.

Etat 0

Lors du mois de janvier, nous avons envisagé de caractériser les faciès d'écoulement sur le tronçon court-circuité de Pebernat en suivant la clé de détermination de Malavoi. Mais nous avons dû faire à un niveau d'eau de l'Ariège particulièrement élevé à la suite de la forte crue survenue dix jours auparavant. Nous avons alors décidé de réaliser simplement une identification rapide des faciès sur ce cours d'eau en le réduisant les faciès à deux catégories : eaux calmes ou eaux vives. Si les résultats obtenus sont difficilement exploitables à cause du niveau d'eau trop élevé de la rivière, ils permettent en revanche d'obtenir une idée du temps de travail nécessaire à la réalisation de ce protocole et de la représentation cartographique des résultats obtenus. Nous avons passé en tout 3 demi-journées pour la caractérisation des faciès d'écoulement.

b) Granulométrie *Wolman Pebble Count*

Comme nous l'avons expliqué dans le rapport rédigé en 2021 (Master 2 GEMO, 2021), les sédiments qui constituent le fond du lit et les berges des rivières sont des éléments qui caractérisent la géomorphologie du cours d'eau. Les sédiments vont former un milieu sur lequel divers processus physiques et biologiques vont pouvoir se dérouler. Ces processus peuvent ne pas avoir lieu dans le cas d'une zone trop homogène, avec uniquement du sédiment fin ou, au contraire, seulement des éléments très grossiers. Par exemple, les poissons ne viennent frayer que dans des zones où la

granulométrie est hétérogène et où des petits graviers se mélangent à des sédiments plus gros. Il est donc important du point de vue écologique d'avoir une hétérogénéité des zones sédimentaire sur le cours d'eau. De même, une accumulation de sédiments fins peut entraîner un colmatage et une déconnexion du lit mineur à son écoulement hyporhéique et aux nappes, causant des problèmes d'assèchement. Suivre la granulométrie d'un site peut donc donner des informations sur plusieurs éléments du cours d'eau (Descloux, 2014 ; Datry, 2008 ; Degoutte, 2012).

Ces milieux sont altérés et modifiés par des événements morphogènes tels que les crues et il y a à l'état naturel ou peu transformé une continuité dans le déplacement des sédiments de l'amont vers l'aval. Dans le cas de problème de recharge sédimentaire, comme c'est le cas le long du TCC de Pamiers-Pébernat, le débit est rarement suffisant pour déplacer les classes de sédiment au-delà des sédiments fins, alors qu'en aval il y a un manque de sédiment. Réaliser un suivi granulométrique du transit sédimentaire sur le TCC permettrait de voir quels sédiments sont bloqués et de déterminer la fraction granulométrique mobilisable dans le lit mineur, sur les berges ou les plages de dépôts (Datry, 2008). Ce suivi doit être réalisé à minima sur du moyen terme afin d'identifier les espaces les plus mobiles mais il peut aussi être réalisé sur du long terme afin d'appréhender l'impact des sédiments dans une modification de la sinuosité. Par ailleurs, croiser les données avec l'intensité des crues peut permettre de déterminer le débit nécessaire à la remobilisation des sédiments, si la fréquence de ces crues est suffisante ou s'il peut être intéressant de réaliser des opérations de recharges ou de dévégétalisation, afin de s'assurer que les bancs puissent toujours être mobilisables. Ainsi, cela peut aider à déterminer les actions qui favorisent le bon transit des sédiments de l'amont vers l'aval. Ces mesures de granulométrie doivent donc être réalisées sur des zones de dépôt, c'est-à-dire des bancs alluviaux situés dans le lit mineur ou des zones d'atterrissement le long des berges.

Il est également possible de réaliser ces mesures dans le lit mineur en eau du cours d'eau, avec le même protocole, afin de réaliser un suivi de frayères par exemple. Dans ce cas, la répartition et la gradation du dépôt sédimentaire seront déterminantes pour identifier des zones potentielles et pourront aider à déterminer des zones de prospection en absence de plus d'informations.

La procédure de mesure *Wolman Pebble Count* a pour objectif de mettre en place un suivi granulométrique du lit d'un cours d'eau, grâce à la mesure de la distribution des sédiments en taille de 100 particules. C'est le protocole de suivi géomorphologique fluvial le plus couramment utilisé, notamment avant des travaux de recharge sédimentaire. Nous avons suivi les instructions de Oldrich Navratil (Navratil, 2014), Maître de conférences à l'Université Lumière Lyon 2.

Matériel

- Décamètre (≈ 20€) ou corde graduée
- Règle graduée (≈ 2€) ou gabarit (≈ 15€)

Logistique

L'opération nécessite deux agents, l'un mesurant les particules pendant que le second note les observations dans le tableau. Une mesure granulométrique prend en général 30 à 45 minutes. Le traitement des données sur le tableur Excel prend environ 15 minutes.

Choix du pas de temps des mesures

- 1 fois par an : un minimum, pour apprécier les changements après 4 saisons et le déroulement d'une saison hydrologique complète ;

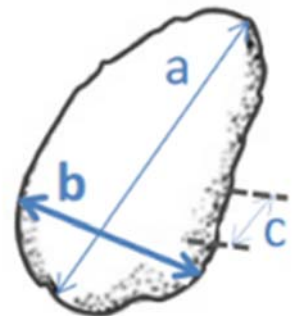
- 2 fois par an : compromis temps/qualité des données ;
- 1 fois par saison : pas de temps le plus complet qui permet de produire beaucoup de données et de comprendre une partie du transport sédimentaire et l'évolution des bancs sédimentaires.

Il est également important de refaire les mesures après chaque crue d'au moins 250m³/s, lorsque le niveau d'eau est revenu à la normale. Cela permet de savoir ce qui a été transporté par le cours d'eau en fonction de la puissance de la crue.

Choix du site d'étude

Le choix doit se porter sur des bancs sédimentaires, de préférence en amont et sur le milieu du banc pour éviter les sédiments trop fins. En fonction de la morphologie sédimentaire, il y a différentes possibilités de relevés :

- mesurer en ayant plusieurs sites d'études, suivant un zigzag d'un banc à l'autre (possible lorsque les bancs se succèdent) ;
- mesurer plusieurs transects parallèles en partant de la tête du banc jusqu'à obtenir 100 particules.



Procédure

1. Déposer un décimètre ou une corde graduée à la perpendiculaire du cours d'eau ; sélectionner la plus grosse particule de l'échantillon, mesurer son axe b, qui sert ensuite d'intervalle.
2. Sélectionner et mesurer ensuite les particules à chaque intervalle, en reportant la valeur dans le tableau
3. Après 100 mesures, calculer la distribution statistique des particules mesurées. Pour cela compléter la courbe granulométrique de surface.
4. Reporter les effectifs totaux par catégorie dans le tableau Excel.

A: axe le plus long (longueur)
B: axe intermédiaire (largeur)
C: axe le plus court (épaisseur)

FIGURE 72 - AXE DE MESURE D'UNE PARTICULE. SOURCE : O. NAVRATIL, 2014

Si les recommandations sont de 100 particules à mesurer, il est possible de déplaçonner cet indice et d'utiliser un nombre supérieur de relevés, notamment sur des bancs très hétérogènes où il peut être intéressant de faire au moins 3 séries de mesures (un en tête de banc, un au milieu et un en fin de banc).

Exemples :

Nous avons repéré plusieurs zones de dépôts où la granulométrie est facilement réalisable, permettant de suivre comment le débit affecte le milieu, ainsi que pour définir les types de sédiments qui se déposent. Nous avons retenu sept sites où il peut être intéressant de réaliser une granulométrie et nous en avons réalisé trois nous-mêmes en suivant le protocole présenté ci-dessus. Le site 1 (Fig. 73) se trouve au début du TCC, dans un méandre, en rive droite convexe où une végétation arbustive commence à se développer en bord de berge. Sur la rive concave se trouve un enrochement pour éviter l'érosion des berges qui mettraient en danger la route juste au-dessus. Sur ce banc, nous avons fait 100 relevés sur 3 bandes de 10m : une en tête de banc, une en milieu de banc et une à l'arrière du banc

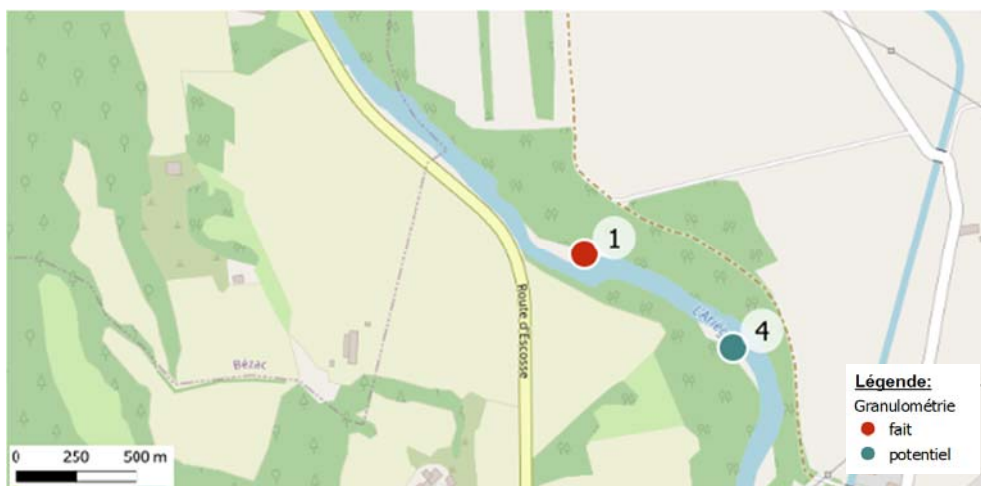


FIGURE 73 - CARTOGRAPHIE N°1 DES SITES DE MESURE DE LA GRANULOMETRIE

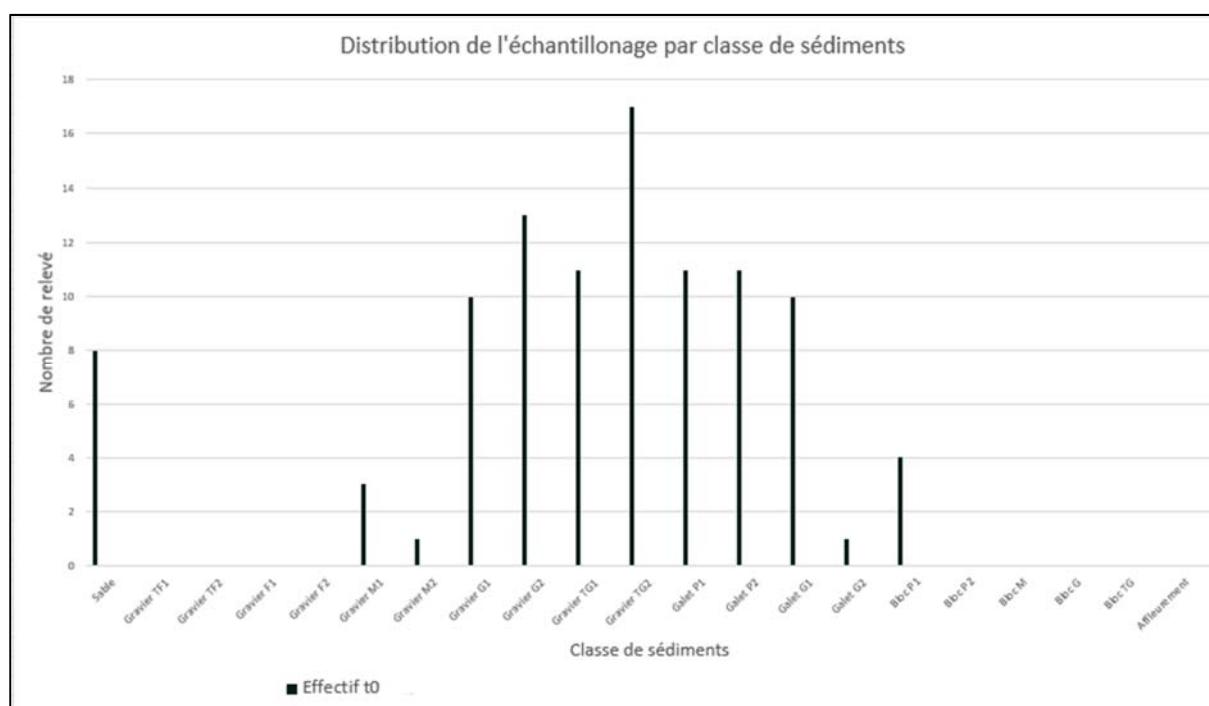


FIGURE 74 - EFFECTIFS SELON LES CLASSES DE SEDIMENTS (N°1)

Le graphique représenté sur la figure 74 permet de simplement visualiser les effectifs de chaque classe. Ici on voit que la majorité de nos sédiments se distribue entre des gros graviers et les premières classes de galet avec tout de même 8 relevés de sédiment inférieur à 2mm, soit des sables. Ce graphique est une aide à la visualisation du banc et des sédiments qui le constituent.

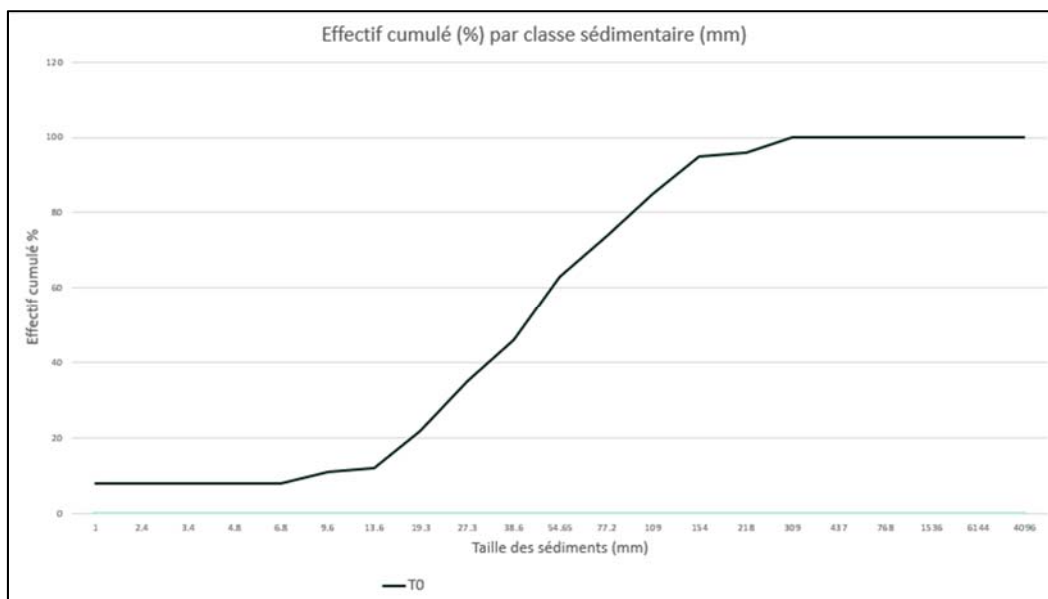


FIGURE 75 - EFFECTIF CUMULE EN POURCENTAGE EN FONCTION DE LA TAILLE DE SEDIMENT (N°1)

Le graphique représenté sur la figure 75, également automatisé après saisie des données, ramène chaque classe à un pourcentage. Ainsi si un banc est très hétérogène où que le nombre de relevés est différent de 100 il est possible de comparer la distribution des sédiments. Ici, hormis pour les sables, on voit que la distribution est continue entre les classes présentes. On observe un gradient classique des zones de dépôt, où les gros sédiments, autour de 30 mm ici, se déposent en premier le long du banc puis la taille des sédiments a tendance à se réduire jusqu'à 19 mm.

Pour le site 2 (Fig. 77), on observe sur le graphique (Fig. 76) que les sédiments sont répartis dans seulement 8 classes (contre 12 sur le site 1), avec des sédiments globalement plus fins. Ce que confirme le deuxième graphique où l'on voit que la majorité du sédiment est comprise entre 8mm et 19mm et la pente de la courbe nous montre que la plupart des sédiments font autour de 10mm. On a donc un site plutôt homogène composé de graviers mais de peu de sables.

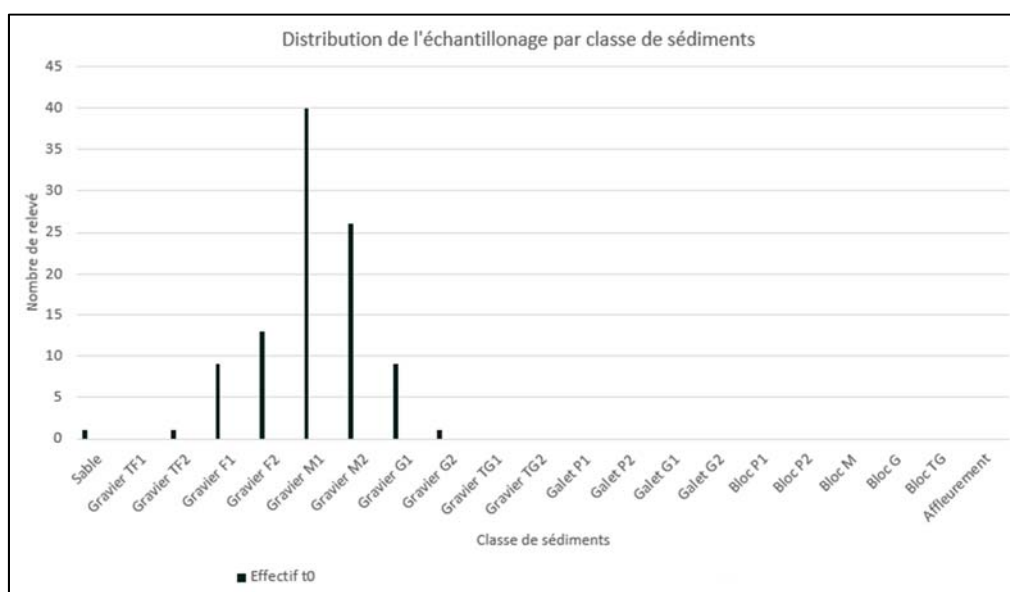


FIGURE 76 - EFFECTIFS SELON LES CLASSES DE SEDIMENTS (N°2)

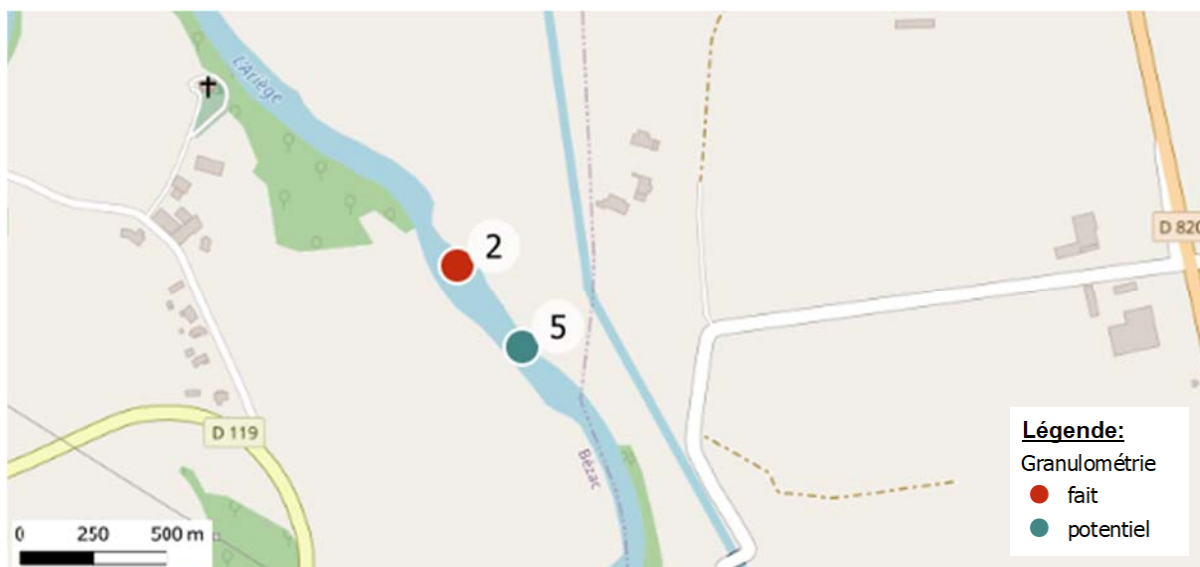


FIGURE 77 - CARTOGRAPHIE N°2 DES SITES DE MESURE DE LA GRANULOMETRIE

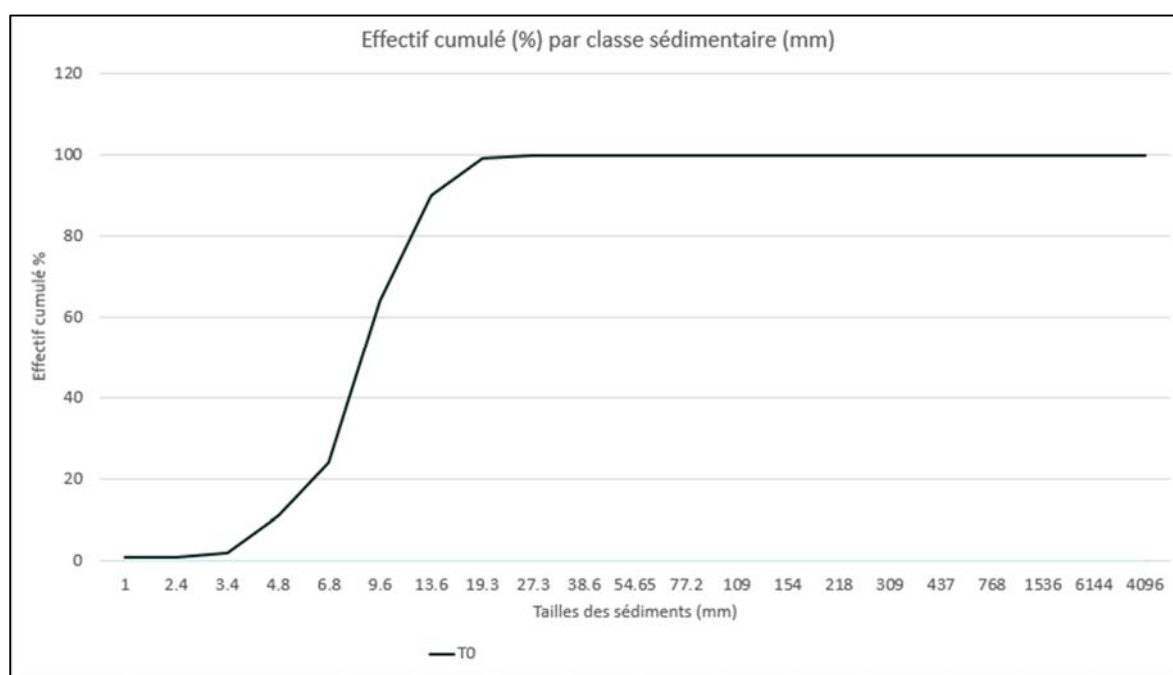


FIGURE 78 - EFFECTIFS CUMULE EN POURCENTAGE EN FONCTION DE LA TAILLE DE SEDIMENTS (N°2)

Enfin sur le site 3 (Fig. 79-80-81), on peut voir qu'on a également des sédiments fins, constitués de sables et de graviers. Cependant, avec les effectifs cumulés on voit que la répartition des sédiments est totalement différente que sur le site 2. Sur le site 3, la répartition des sédiments entre les 8 classes est bien plus équilibrée alors que dans le site 2 on n'avait quasiment que des graviers M1 pour autant de classes présentes.



FIGURE 79 - CARTOGRAPHIE N°3 DES SITES DE MESURE DE LA GRANULOMETRIE

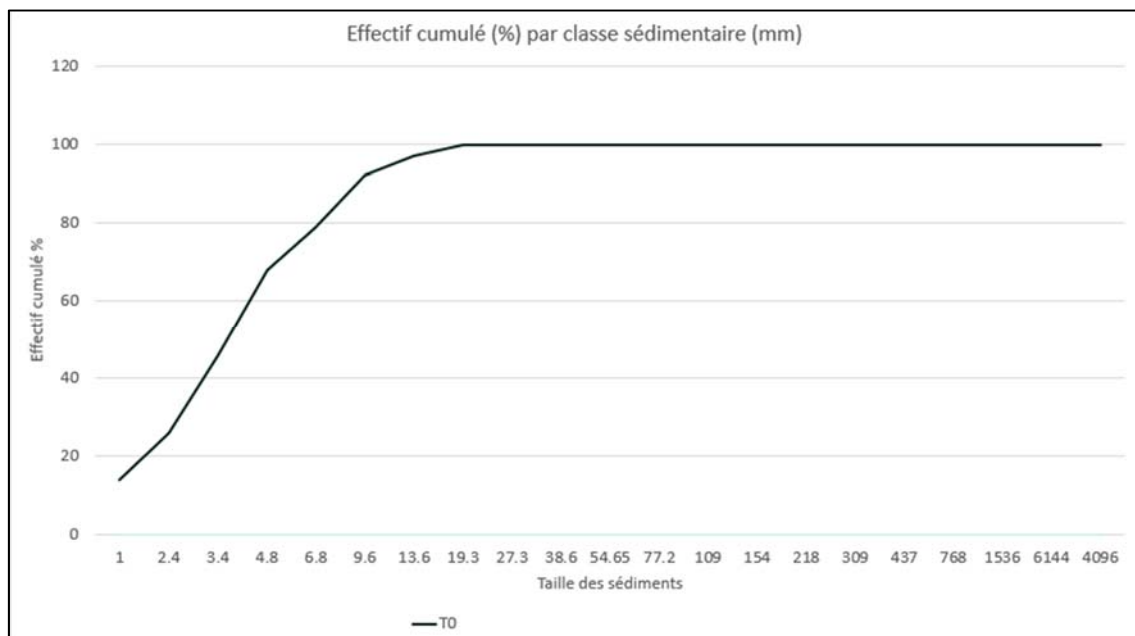


FIGURE 80 - EFFECTIFS CUMULE EN POURCENTAGE EN FONCTION DE LA TAILLE DE SEDIMENTS (N°3)

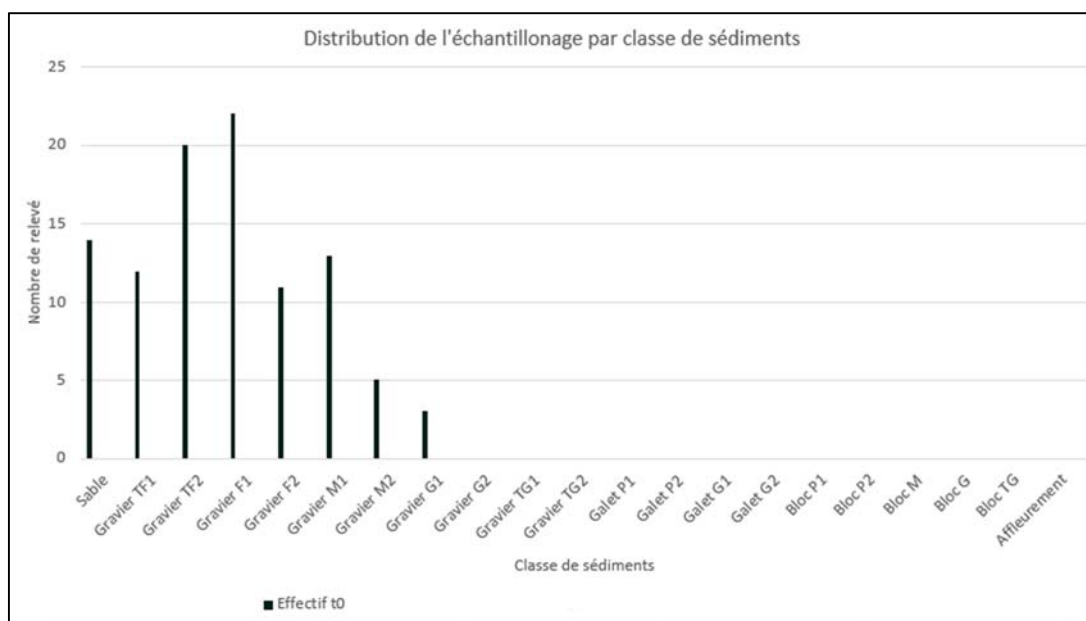


FIGURE 81 - EFFECTIFS SELON LES CLASSES DE SEDIMENTS (N°3)

Ces relevés permettent d'établir un état 0. Les sites peuvent ainsi être comparés pour suivre comment se répartissent les sédiments dans le TCC. Mais l'objectif de ce document est également de suivre l'évolution de chaque site. En effet, après le passage des prochaines crues, il sera intéressant de refaire une granulométrie afin de déterminer leur potentiel morphogène sur certains sites et de voir quels sédiments ont été mobilisés. Les données à t+1 peuvent être enregistrées dans le document Excel de chaque site afin de pouvoir voir clairement et immédiatement s'il y a eu un changement. De plus, en croisant ces données avec la hauteur d'eau/débit lors de crues, il sera possible de déterminer les conditions hydrodynamiques propices à la mobilisation des sédiments le long du tronçon court-circuité.

c) Indicateur de suivi du colmatage

Le colmatage est un phénomène qui se produit lorsque des sédiments fins ou de la matière organique s'infiltrent dans les interstices entre les alluvions tapissant le fond du lit. Cela entraîne notamment une modification des conditions de vie au sein des habitats (CARHYCE, OFB, 2020). Une modification de la structure et de la stabilité du pavage alluvial est également visible, de même qu'au niveau des échanges d'eau, de matières et d'oxygène avec la surface. Ce phénomène s'est accentué avec l'augmentation des activités agricoles et de l'exploitation forestière, et partout où l'absence de végétation rend les sols particulièrement sensibles à l'érosion. La quantité de sédiments fins qui arrivent au cours d'eau est donc supérieure à la normale (Waters, 1995 ; Hancock, 2002). L'artificialisation des milieux liée à l'aménagement débridé des territoires, la présence de carrières d'extraction de granulats en lit mineur et le développement des infrastructures sont également responsables de l'afflux de sédiments fins dû aux phases de travaux en rivière qui mobilisent énormément de matière sédimentaire. A cela s'ajoute la diminution du nombre de crues morphogènes et la régularisation des débits due aux infrastructures hydrauliques qui limitent ou empêchent la mobilisation des sédiments (Petts, 1983).

Les zones calmes, avec une pente réduite et/ou un courant faible comme les zones de mouilles (zone avec les caractéristiques précédentes) sont propices au colmatage. Mais c'est dans les zones d'infiltrations importantes, où le sédiment fin est entraîné en profondeur, que le colmatage se produit

le plus facilement, autrement dit sur les radiers (Jobson & Carey, 1989 ; Brunke & Gonser, 1997). Le colmatage génère une absence d'hétérogénéité, car le substrat va devenir compact et homogène. Sur ce type de substrat, la biodiversité ne peut pas se développer et les espèces ne peuvent chasser. Par conséquent les zones de colmatage vont être progressivement délaissées et appauvries en biodiversité. La compaction du sol va également rendre le milieu inadapté aux nématodes et à la microfaune car il s'appauvrit aussi en oxygène.

Pour évaluer le niveau du colmatage d'un cours d'eau et suivre ce phénomène on peut utiliser différents indices dont la complexité de réalisation et de coûts varie beaucoup. Les plus courants consistent à la réalisation de mesures directes (Wolman, 1954) ou bien à des estimations visuelles des pourcentages de sédiments fins présents (Platts, 1983). Ces méthodes sont subordonnées de manière importante au regard de l'observateur. Mais pour le colmatage de surface, la méthode des paniers (Bloesch, 1979) peut permettre de réduire ce biais. La composition granulométrique peut aussi être un moyen d'approcher le niveau de colmatage. Mais comme il n'est pas directement lié à la granulométrie, ces méthodes sont discutables et doivent être adaptées à l'échelle locale.

Il existe également des méthodes indirectes comme l'évaluation des concentrations en oxygène (Marmonier et al., 2004) qui permet à l'aide d'une sonde de relever le niveau d'oxygène dans le sol et de déduire le niveau de colmatage du lit.

Protocole dit "des bâtons"

Cette méthode est celle présentée et testée dans « Évaluation du colmatage du substrat des frayères à salmonidés sur le bassin de la Garonne amont, année 2015 » (Marmonier et al., 2004) et qui fait partie du suivi CARHYCE. Il s'agit d'une méthode peu coûteuse qui peut permettre indistinctement de mener un suivi sur un site particulier comme d'avoir une approche globale à l'échelle d'un tronçon si elle est réalisée sur plusieurs sites, comme le préconise CARHYCE. Le protocole consiste à évaluer le niveau d'oxygénation du lit. En enfonçant le bâton dans le lit on a déjà une première information suivant la profondeur à laquelle on peut l'enfoncer. Ensuite, l'oxydation du bois dans le substrat va permettre de déterminer les milieux anaérobie et aérobie et donc de visualiser à partir de quelle profondeur le cours d'eau est colmaté et dans quelles proportions.

Matériel

Pour réaliser ce protocole, il faut des bâtons en bois clair tel que le pin, de 30 cm de long et d'environ 10 mm de diamètre, ainsi qu'une massette pour les enfoncer dans l'eau.

Choix du lieu et installation

L'installation des bâtons doit se faire en tête de radier ou de plat courants, qui sont a priori des milieux favorables au colmatage. De plus, au sein de ces faciès calmes, le matériel peut être plus facilement installé et retrouvé. Les bâtons peuvent être installés à n'importe quelle saison mais l'eau doit entièrement recouvrir le bois. Le dispositif doit rester installé au moins 1 mois, et il faut donc faire attention aux épisodes de crue qui pourraient déplacer ou faire disparaître l'installation. Il peut être intéressant d'aligner les bâtons selon des repères visuels présents sur les berges, qu'il faut noter et qui peuvent faciliter le relevé ultérieur du matériel.

Une fois le site choisi, il faut installer le bois sous l'eau. Il faut trouver les endroits où l'on peut enfoncer les bâtons dans le sol et noter leur position. Les bâtons doivent être enfoncés en quasi-totalité dans le sol et la partie hors sol (max 5cm) doit être mesurée et notée. Ce protocole peut aussi être appliqué

en eau plus profonde mais demande plus de matériel. Au moment de retirer les bâtons, il faut mesurer la partie qui dépasse, ou noter la hauteur qui a été recouverte. Une fois retirés, il faut mesurer la hauteur des bâtons et des tâches sombres qu'il peut y avoir sur le bois.

Interprétation

Dans le substrat, la perte en oxygène modifie l'activité microbienne et donc le phénomène d'oxydation. L'oxydation du bois et le changement de couleur qui en résulte va être un moyen de suivre les conditions d'oxygénation du milieu. En milieu désoxygéné, le bois noirci est le résultat de l'activité microbienne qui va utiliser le carbone contenu dans le bois.



FIGURE 82 - PHOTO DES BATONS APRES UN MOIS PASSE DANS LE SUBSTRAT
SOURCE: MARMONIER ET AL., 2004

En un mois, le bois peut noircir (marron à gris clair) là où l'anoxie est la plus forte et continue. Différentes zones peuvent se succéder et sont généralement clairement marquées par un changement de couleur franc. La distance entre l'extrémité du bâton qui était dans le substrat et la première tâche indique à partir de quel niveau le sol n'est plus poreux et qu'il est donc par conséquent colmaté. Ce protocole permet également d'évaluer la connectivité entre la partie souterraine et externe du cours d'eau (zone hyporhéique). L'intensité de la coloration du bois peut changer, et il est donc recommandé une concertation entre les observateurs sur l'amplitude de variation recherchée susceptible de définir des milieux pauvres en oxygène.

Cette méthode reste simple, peu coûteuse, et facile à mettre en place le long des cours d'eau. Elle permet de localiser et de quantifier le colmatage dans différentes zones praticables à pied. Néanmoins, cette méthode reste imprécise car l'identification des tâches et du degré de coloration peut s'avérer ardue. De plus, il est parfois difficile de retrouver le matériel.

Protocole de suivi : encaissement du substrat

Une autre méthode permet d'évaluer l'intensité du colmatage des cours d'eau (Archambaud et Alber, 2013 ; Owens et al., 1999). Facile à mettre en oeuvre, elle permet de déterminer immédiatement l'état du colmatage.

Cette méthode établit le niveau de colmatage suivant la facilité d'extraction des gros éléments sédimentaires et la densité des sédiments fins. En créant une perturbation, par le descellement d'un élément alluvial grossier (galet), on observe les perturbations et le nuage de fines qui se créent et qui peuvent correspondre à l'un des 5 codes suivants :

- Code 1 : si les éléments se soulèvent facilement, on attribue la classe 1. Les éléments sont posés sur la sous-couche granulométrique et ne génèrent pas de nuage de limon lorsqu'ils sont soulevés ;
- Code 2 : si les éléments se soulèvent plus difficilement, on attribue la classe 2 en fonction de la quantité de limon libérée dans l'eau sous les éléments. Le nuage généré est peu dense, c'est-à-dire que la couche de surface est collée par une couche de limon légèrement colmatant, qui lie les éléments entre eux ;
- Code 3 : si les éléments se soulèvent avec un nuage de limon assez épais, on attribue la classe 3. Les éléments sont très enchâssés ;
- Code 4 : si les éléments se soulèvent difficilement, on attribue la classe 4. Le nuage de limon produit est très dense. La structure est bien enchâssée dans une sous-couche très compacte dont l'emprise est forte sur les éléments ;
- Code 5 : si les éléments ne se soulèvent pas ou très difficilement (structure cimentée ou sous forme d'un dallage), on attribue la classe 5. C'est le cas lorsque la granulométrie est recouverte par une épaisse couche de limon (Malavoi, 2010).

Applicable principalement sur des radiers ou sur des zones peu profondes, ce protocole ne demande aucun matériel particulier et donne des résultats immédiats. Néanmoins l'évaluation du colmatage reste très simplifiée et cette évaluation est difficilement comparable entre sites différents, d'autant plus si l'opérateur change. Tout comme la méthode des bâtons, cette méthode reste approximative mais autorise un suivi relatif entre les zones à l'échelle d'un tronçon. Des méthodes comme le carottage cryogénique, la benthométrie ou encore la conductivité hydraulique peuvent être utilisées pour obtenir des résultats plus précis, mais ce sont des méthodes plus coûteuses.

Si le carottage cryogénique semble difficile à mettre en place, la benthométrie pourrait être envisagée en partenariat avec d'autres acteurs sur le cours d'eau. Elle demande d'abord un prélèvement des invertébrés benthiques avec un benthomètre, puis leur analyse en laboratoire pour identifier et conserver les espèces.

La méthode d'évaluation et de suivi via la conductivité hydraulique pourrait également être envisagée si le suivi est souhaité sur du long terme et pour plusieurs sites. Nécessitant l'achat de mini-piézomètres, ces outils doivent ensuite être enfoncés de 30 cm dans les sédiments, que la granulométrie soit fine ou grossière. Nécessitant trois mesures par site, une fois l'investissement fait dans l'outil, le protocole ou les calculs pour interpréter les résultats restent relativement simples d'utilisation (Descloux, 2011).

Le colmatage affectant majoritairement les frayères, des suivis ont déjà été réalisés dans la région Occitanie, notamment sur la Garonne par l'association MIGADO (Coll, 2016), mais aussi par l'ANA-CEN en Ariège dans le cadre de l'étude de la continuité écologique et du suivi des poissons. Il existe également des exemples de chantiers de décolmatage, menés par les fédérations de pêche (Fédération départementale de pêche 64, 2011). Il pourrait donc être intéressant de collaborer avec elles pour assurer un suivi homogène sur l'ensemble du cours d'eau.

d) Protocole du suivi de l'érosion

Ce protocole permet d'étudier l'érosion verticale et latérale de la rivière Ariège. L'érosion latérale concerne l'encaissant molassique des rives gauche et droite ainsi que le plancher alluvial de la rivière, l'érosion verticale s'attaque au matelas alluvial s'il est présent, ou au soubassement molassique dans le cas contraire.

Nous avons donc retenu deux méthodes pour étudier ces processus d'érosion. La première méthode consiste à mettre en place des barres de mesure de l'érosion dans la molasse. La seconde méthode permet d'étudier l'incision du plancher alluvial, voire de l'encaissant molassique, avec des chaînes d'érosion. Lors des périodes de crues, notamment lors des débits de pleins bords, les berges sont érodées sur les rives concaves des zones de méandre où par ailleurs le lit de la rivière s'incise. De ce fait, il est intéressant de mettre en place un protocole qui permet d'évaluer les zones érodées lors de ces crues (et aussi par les processus d'érosion subaériens pour le protocole des barres d'érosion) pour connaître les changements morphologiques du lit de la rivière et de son encaissant molassique.

La chaîne d'érosion permet d'étudier le transport hydrosédimentaire de la rivière Ariège et donc de mesurer le transport solide. L'intérêt avec la chaîne d'érosion, c'est sa capacité à livrer des résultats sur plusieurs années à propos du fonctionnement des processus d'érosion sur la rivière. D'un autre côté, cette méthode peut également mettre en évidence un exhaussement du lit par un dépôt sédimentaire et dans ce cas-là, la chaîne sera comblée par les matériaux (Malavoi, 2011). Cependant, sur la rivière Ariège, la tendance est plus à l'incision du lit mineur et il est donc peu probable que les chaînes soient comblées. Au contraire, sur le TCC de Pébernat, réaliser ce protocole peut être intéressant car il est soumis au contraire à une accumulation de sédiments.

Les barres d'érosion vont pour leur part permettre d'étudier et de mesurer le recul des coteaux molassiques présents sur les berges de la rivière. Ce suivi devra différencier l'érosion induite par les processus d'érosion subaériens (ruissellement, mouvement de masse), de l'érosion induite par le cours d'eau, notamment au moment de ses crues. De ce fait, il sera nécessaire de mettre en place des barres métalliques à hauteur d'eau en période d'étiage et des barres de fer beaucoup en position plus élevée sur les berges de la rivière.

Chaînes d'érosion

Choix du lieu d'implantation des chaînes d'érosion

Pour une efficacité maximale, plusieurs chaînes d'érosion doivent être implantées le long du linéaire. Il est préférable de les mettre en place sur des zones où le faciès d'écoulement est turbulent où on a le plus de chances d'observer une évolution du plancher sédimentaire. Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas d'intérêt à mettre en place des chaînes sur des secteurs de rivière plus calme, cependant les changements seront a priori moins significatifs et moins évidents à interpréter. Il est nécessaire de mettre en place ces chaînes sur le plancher alluvial du cours d'eau. Lorsqu'on parle de plancher alluvial, cela concerne donc l'ensemble des dépôts alluviaux, les berges mais aussi les zones de dépôt sédimentaire qui émergent de la surface du cours d'eau (bancs alluviaux vifs).

Il est préconisé de choisir en priorité les zones de bancs alluviaux vifs, très utiles notamment pour évaluer l'impact des crues. Sur ces zones de dépôts sédimentaire, les chaînes d'érosion devront être implantées au milieu des bancs. En effet, en choisissant de mettre en place une chaîne au milieu du banc, l'étude réalisée et les résultats constatés seront plus révélateurs que si nous mettons en place la chaîne d'érosion à l'avant du banc sédimentaire par exemple.

Mise en place des chaînes d'érosion

Lors de la mise en place des chaînes, les points GPS doivent être relevés afin de pouvoir retrouver facilement les chaînes lors des visites de contrôle. Elles doivent être disposées à 2 m de profondeur, pour qu'elles soient suffisamment ancrées dans le lit de la rivière et ne soient pas emportées à la première crue, avec des maillons qui font 1 cm de diamètre (Malavoi, 2011).

Pour étudier l'évolution de l'incision du lit, il est nécessaire d'attendre au moins un an pour analyser les résultats. On peut également réaliser des relevés chaque mois pendant un an afin de disposer d'une courbe évolutive plus précise mais cela demande plus de temps. Il est mieux de privilégier une observation annuelle ou biannuelle en fonction des crues morphogènes que l'on a identifiées sur l'année. De plus, si l'on se base sur le TCC, réaliser des relevés tous les mois serait peu pertinent car les changements morphologiques ne sont pas constants. Il pourrait aussi être intéressant de réaliser des relevés après chaque crue morphogène mais dans ce cas-là il faut souvent attendre une longue période de décrue pour faire un relevé sans difficulté d'accès au cours d'eau. Une crue morphogène sur la rivière Ariège concerne toute crue supérieure ou égale à une moyenne de 250 m³/s par jour.

Une fois les données d'année collectées, il faut prendre le temps d'analyser l'incision de la chaîne pour estimer le changement morphologique sédimentaire du plancher alluvial (Malavoi, 2011). Les résultats permettent ainsi de comprendre le rôle des crues et de leurs impacts sur le cours d'eau. L'utilisation de ce procédé est donc tributaire du régime des crues qui peut beaucoup varier d'une année à l'autre. Pour avoir une vision d'ensemble, ce protocole doit être mis en place sur plusieurs années, car c'est avec un plus large échantillon de mesures que les observations et relevés pourront déboucher sur une analyse et des conclusions pertinentes. Concernant le coût de l'opération, il est relativement faible, il faut prévoir une ou deux journées par an pour relever les résultats.

Barres d'érosion

Choix des lieux d'implantations

Pour le choix d'implantation des barres en fer, il faut cibler en priorité les sections à méandres du cours d'eau. Ce sont ces secteurs qui sont le plus soumis au pouvoir d'érosion de la rivière, en particulier sur les berges concaves. De plus, il est plus intéressant d'appliquer cette méthode à la mesure de l'érosion des coteaux molassiques plutôt que sur les alluvions, car le procédé d'érosion est beaucoup plus quantifiable sur les encaissants molassiques que sur des alluvions, qui sont forcément plus impactées morphologiquement lors du passage d'une crue.

Mise en place des barres d'érosion

En ce qui concerne le matériel, il nous faut pour ce protocole des barres en fer de 8 mm de largeur et de 1 m à 1,20 m de longueur (Antoine, 2022). Il faut que les barres de fer soient de section suffisamment large et suffisamment enfoncée (jusqu'à 0,80 m maximum) dans la berge pour ne pas céder, se tordre ou être emportée par des corps flottants lors d'une crue. Pour leur implantation, il faut idéalement faire un carroyage (réalisation d'un quadrillage de manière identique et localisé sur une surface) de 1 m sur 1 m qui varie selon l'amplitude de la berge. Sur des berges de surface très réduite, on peut être amené à placer des barres tous les 1 m. Sur des berges avec une plus grande surface (figure 83), on peut admettre des intervalles plus grands (2-3 m). Les barres de fer sur chaque zone d'étude seront triplées en hauteur. Il faut en positionner une à 2 m au-dessus du niveau du cours d'eau en période d'étiage, une à 1 m en dessous de la barre du dessus et une au niveau de la rivière. Il

est essentiel de tripler les barres de fer parce que l'incidence de l'érosion peut être différente selon la hauteur.

Pour les implanter rigoureusement, il faut marquer la barre avec de la peinture marquant le niveau d'enfoncement de manière à pouvoir quantifier lors des relevés suivants le volume de berge éventuellement emporté. Il est préférable de mettre en place les barres en période d'étiage, de manière à ne pas manquer d'observer le comportement de la berge dès les plus petites crues. Toutes les barres sont équipées sur leur extrémité externe d'un bouchon de protection utilisés sur les chantiers de BTP afin que quiconque ne puisse se blesser. Pour la même raison les barres ne doivent pas dépasser hors de la berge de plus de 10 à 20 cm. Ce dépassement doit bien sûr être noté à l'installation et vérifié lors des visites de contrôle ultérieures. Enfin, elles doivent être géolocalisées par point GPS, de façon à les retrouver plus facilement.

Une fois que tout le dispositif est en place, il convient de revenir chaque année pour observer et relever l'érosion observable sur chaque barre en se basant sur la marque de peinture et la mesure de la longueur de l'extrémité externe des barres réalisée à chaque visite. On marque avec la peinture l'avancée sur la barre observée, puis on enfonce à nouveau la barre d'un mètre pour qu'elle reste stable.

L'idéal serait de réaliser des relevés tous les trois mois, de façon à disposer d'un suivi régulier pour connaître à quelles périodes la berge est le plus attaquée, quelles sont les faciès d'écoulement et les niveaux de crue les plus efficaces. En période de crue justement, il est nécessaire de réaliser des relevés plus réguliers car c'est à ce moment que l'érosion est a priori la plus forte.

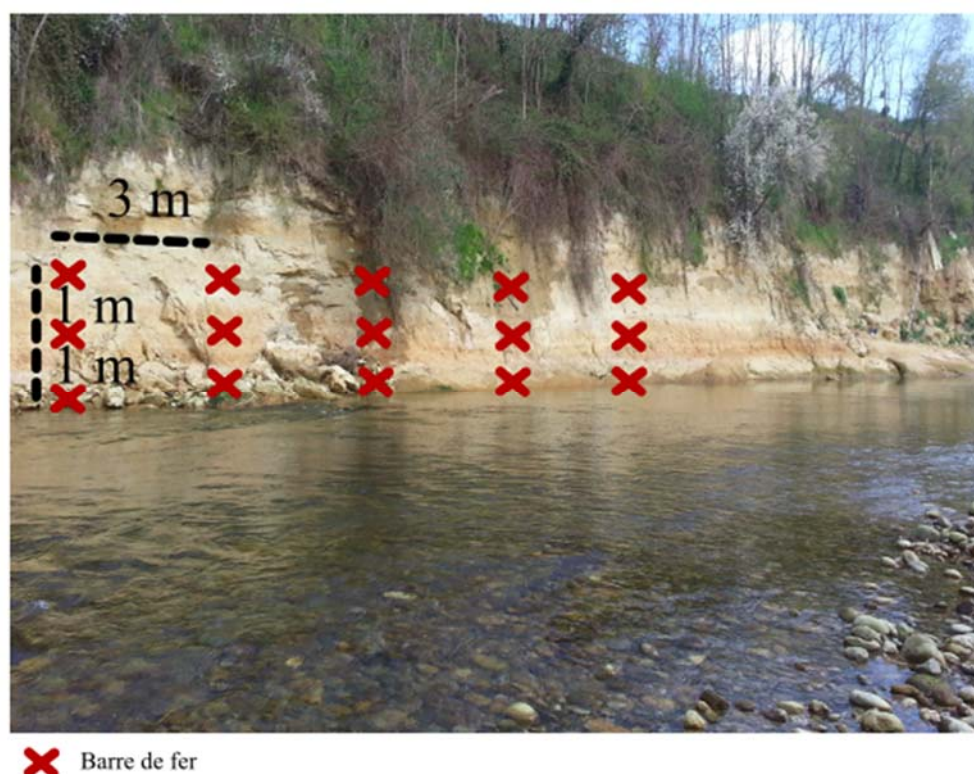


FIGURE 83 - EXEMPLE SCHEMATIQUE DE LA MISE EN PLACE DES BARRES DE FER

Nous pouvons voir sur la figure 89 prise sur le TCC de Pébernat l'implantation schématique des barres de fer sur un secteur de la rivière Ariège. La présence de molasse sur la berge est très claire, ce qui en fait un endroit idéal pour mettre en place les barres en fer. Ici, on peut voir une berge avec une grande amplitude donc il est mieux d'espacer les barres de 2-3 m. Si la berge ciblée était plus courte, il aurait été possible d'équiper le site tous les 1 m. Ces barres en fer sont représentées de couleur rouge de manière grossière sur la photo, normalement lors de la mise en place comme nous avons pu le dire précédemment il ne faut pas qu'elle dépassent de plus de 10-20 cm.

Le coût de l'opération est relativement faible. Il faut prévoir trois journées par an pour réaliser les relevés voire quelques journées supplémentaires si plusieurs crues importantes surviennent et évaluer les débits les plus efficaces en termes d'érosion. Le risque principal avec cette méthode est la perte de matériel.

Conclusion

L'ensemble de ces indices de suivi évoqués dans cette troisième partie doivent permettre de suivre de façon assez simple les variations hydrogéomorphologiques du coût d'eau, à moindre coût tout en restant fiable. Ces protocoles ont été pensés pour pouvoir être répétés à de courts intervalles et ainsi suivre les changements les plus subtils. Le but est d'identifier les conditions qui permettent de mobiliser la bande active. Il est possible de préciser ces indices avec d'autres protocoles plus coûteux ou plus lourds si on le souhaite. Avec l'adjonction de partenaires, il serait possible d'améliorer la taille du tronçon suivi et aussi la précision du suivi et le type de matériel mobilisé. Ces changements vers des protocoles plus complexes ou un travail collaboratif peuvent être programmés dans le temps afin de répartir les coûts.

CONCLUSION GENERALE

Il serait difficile de retrouver l'aspect du cours de l'Ariège antérieurement à sa modification par l'Homme. Mais connaître son évolution longue, d'abord du XIXème siècle à nos jours, puis sur les dix dernières années nous a permis d'approcher quel pouvait être l'état initial d'avant l'ère industrielle. Ainsi, l'Ariège au temps de Napoléon 1er apparaît comme plus large, ayant une sinuosité moins marquée mais également des îlots différemment répartis. L'installation d'ouvrages canalisant la rivière ou utilisant sa force motrice ont peu à peu contribué à rétrécir sa largeur et entravé le transit sédimentaire. L'exploitation de sablières et de granulats en lit mineur a elle aussi contribué à réduire drastiquement la charge solide mobilisable de l'Ariège. S'ajoutent à cela le changement climatique qui, en modifiant visiblement en profondeur le régime des crues, les a rendus moins morphogènes, et donc moins à même de dynamiser la production et le transit sédimentaires.

L'ambition de ce dossier était, en lien avec le projet du SYMAR-Val d'Ariège de restauration écologique de l'Ariège, de permettre au syndicat de suivre d'une part les évolutions futures du cours d'eau, et d'autre part, de lui permettre de quantifier aisément l'impact de ses actions. Notre apport était de proposer des indicateurs fiables, peu coûteux et faciles à mettre en œuvre.

La suite à donner à cette première approche pourrait donc être le test de ces indicateurs en conditions réelles afin d'en évaluer la pertinence d'une part, et d'autre part de commencer à qualifier et à quantifier l'impact des premiers travaux de restauration réalisés par le SYMAR-Val d'Ariège.

Bibliographie

Ouvrages

DEGOUTTE, 2012, *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières*, en particulier chapitre « Transport solide en hydraulique fluviale ». Lavoisier, Tech et Doc, 542 p.

MALAVOI J.R., BAVARD J.P., 2010, *Eléments d'hydromorphologie fluviale*, ONEMA, Collection Comprendre pour Agir, 224 p.

Master 2 GEMO, 2021, *Restauration des cours d'eau : le cas des recharges sédimentaires*, rapport d'atelier, SYMAR Val d'Ariège, Université Toulouse Jean Jaurès, 67 p. + 12 fiches action.

Thèses

BLANPIED, 2019, *La torrentialité dans les Pyrénées centrales : évolution depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, spécificités et dynamiques géomorphologiques actuelles*. Thèse Environnement, Université Toulouse Jean Jaurès et laboratoire GEODE UMR-5602 CNRS, 352 p.

MERCIER, Alexis, 1999, *L'anthropisation d'un système fluvial à haute énergie : l'exemple de l'Ariège (Pyrénées centrales françaises), Géodynamique des milieux naturels et anthropisés*, Thèse de géographie, Université de Limoges, 374 p. + annexes.

Articles scientifiques

ASTRADE L., GAUCHON Ch., HUGEROT Th., PLOYON E., 2021, « De la carte diachronique à la trajectoire géohistorique : modélisation du changement paysager d'un cône torrentiel », *Mappemonde* [en ligne], 132, consulté le 15 décembre 2021, URL : <http://journals.openedition.org/mappemonde/6704>

BLOESCH J., BURNS N.M., 1979, « A critical review of sedimentation trap technique », *Schweiz., Zool. Hydrol.*, n° 42, pp. 15-55.

DATRY, T., DOLE-OLIVIER, M.-J., MARMONIER, P., CLARET, C. *et al*, 2008, « La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau », *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, Lavoisier, IRSTEA, CEMAGREF, pp. 3-18.

MERCIER, A., 2000, « Le rôle de l'anthropisation des débits de l'Ariège dans son évolution morphologique », *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, vol.7, pp. 81-88.

MORANDI, B., PIEGAY, H., 2011, « Les restaurations de rivières sur Internet : premier bilan », *Natures Sciences Sociétés*, vol.3, pp. 224-235.

PLATTS W.S., MEGAHAN W.F., MINSHALL G.M., 1983, *Methods for evaluating stream, riparian and biotic conditions*, Rapport INT-138, U.S. Department of Agriculture – forest Service, pp. 1-70

WOLMAN M. G., 1954, « A method of sampling coarse river-bed material », *Transactions of the American Geophysical Union*, 35(6), pp. 951-956.

Documents techniques

AGERIN SAS, 2015, *Etude de définition d'une stratégie de gestion durable du bassin versant de la rivière Ariège*, SYMAR Val d'Ariège, 40 p.

BAUDOIN J.M., BOUTET-BERRY L., CAGNANT M., GOB F., KREUTZENBERGER K., LAMAND F., MALAVOI J.R., MARMONIER P., PENIL C., RIVIERE C., SADOT M., TAMISIER V., TUAL M, 2017, *Carhyce : Caractérisation hydromorphologiques des cours d'eau. Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied*, OFB, Université de Paris, EDF, Université de Lyon, CNRS, 36 p. + annexes.

COLL M., DURBE G., BOSC S., MENCHI O., 2016, *Evaluation du colmatage du substrat des frayères à salmonidés sur le bassin de la Garonne amont - Année 2015*, Université Toulouse 3, MIGADO, Fédération départementale de pêche 31, 27 p.

DATRY T., DOLE-OLIVIER M.-J., MARMONIER P., CLARET C., La recharge en granulats : une technique souple et rapide pour la restauration des petits cours d'eau.

MALAVOI J.R., SOUCHON Y., 2002, « Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques », *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, n° 365/366, pp. 357-372.

VALETTE L., PIFFADY J., CHANDESIS A., SOUCHON Y., 2012, *SYRAH-CE : description des données et modélisation du risque d'altération de l'hydromorphologie des cours d'eau pour l'Etat des lieux DCE*, ONEMA-CEMAGREF, Pôle hydroécologie des cours d'eau, 82 p. + annexes.

VALETTE L., CHANDESIS A., SOUCHON Y., 2013, *Audit RAPIDE de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau, Méthode de recueil d'informations complémentaires à SYRAH-CE sur le terrain*, Version 2.0, ONEMA-IRSTEA, Pôle Hydroécologie des cours d'eau, 46 p. + annexes.

Comptes-rendus

ANA- ASSOCIATION DES NATURALISTES DE L'ARIEGE, Rapport d'activité, 2018, 32 p.

DARTIGUELONGUE J., 2021, *Suivi de la fraie des grands salmonidés migrateurs sur l'Ariège à l'automne 2020*, MIGADO/SCEA, 45p + annexes.

FEDERATION DEPARTEMENTALE PÊCHE 64, Test de l'efficacité du décolmatage des frayères à salmonidé sur le Gave d'Oloron, 2011

Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, 2008. Méthode de l'observatoire photographique du paysage.

Sites internet

ADEME, 2021, Observer et améliorer, quels indicateurs de suivi mettre en place ?, [consulté le 17/01/2022],

<https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/reduire-impacts/reduire-cout-dechets/dossier/observer-ameliorer/indicateurs-suivi-mettre-place>

BARRAQUAND J., 2016. Tout savoir sur les pièges photographiques.

<https://www.jaimelachasse.fr/actualites-chasse/les-pieges-photographique>

Chambre d'Agriculture de l'Ariège

<https://ariege.chambre-agriculture.fr/productions-techniques/cultures/gestion-de-leau/lirrigation-en-ariege/>

NAVRATIL O., “Les sédiments charriés en rivière. Processus et mesures sur le terrain (2)”, 2014

<https://www.canal-u.tv/chaines/unit/les-sediments-charries-en-riviere-processus-et-mesures-sur-le-terrain-2>

RNN Platière, 2018. Time Lapse Travaux Platière 2018.

<http://ileplatiere.unblog.fr/2018/03/30/30-mars-2018-premier-anniversaire-de-la-fin-des-travaux/>

Zone Atelier Bassin du Rhône, 2017. La restauration écologique du Rhône- Quels travaux de renaturation ? Quels enseignements des suivis scientifiques pour la gestion ?

https://www.graie.org/zabr/zabrdoc/actualites/Actes_AM-au-bord-du-Rhone_avr17.pdf

Ressources archivistiques et d'enquête

Archives départementales de l'Ariège, Foix (série S, W, Fi)

- *Cadastre napoléonien*
 - FRAD09_3P3460_001
 - FRAD09_3P3460_002
 - FRAD09_3P3460_003
 - FRAD09_3P3460_007
 - FRAD09_3P3460_011
 - FRAD09_3P3624_003
 - FRAD09_3P3624_007
 - FRAD09_3P3624_008
 - FRAD09_3P3624_023
 - FRAD09_3P3624_025
 - FRAD09_3P3624_028
 - FRAD09_3P3624_031
 - FRAD09_3P3624_032
 - FRAD09_3P3624_034
 - FRAD09_3P3624_035
 - FRAD09_3P3624_027

Archives Municipales de Pamiers

- O226
- O227-1
- O227-2
- O229-1
- O229-2

Enquêtés

- Maire de Bonnac
- Maire de Saverdun
- Riverains
- SYMAR-VA
- Technicien EDF

Annexe 1

Questionnaire « Géohistoire de l'Ariège dans son tronçon de Pamiers à Bonnac (09) »

Consigne initiale

Nous sommes étudiants en master 2 de Géographie – Gestion des Environnements Montagnards à l'Université Toulouse 2 – Jean Jaurès. Dans le cadre de nos études, nous réalisons un diagnostic de l'Ariège pour le SYMARVA, et à ce titre, nous recherchons des riverains de la rivière Ariège pour nous renseigner sur ses évolutions récentes. Nous venons à vous car vous êtes (un riverain/un élu local/un acteur du territoire/etc.), et nous pensons que vous pouvez nous fournir la matière nécessaire à l'élaboration de notre étude. Ce questionnaire est court (moins de 10 minutes), anonyme et ne fera pas l'objet d'un enregistrement. Vous aurez un droit de regard sur les réponses données, et pouvez faire le choix à tout moment de ne pas répondre à une question, voire d'interrompre l'entretien à tout moment sans avoir à vous justifier.

I – Profil de l'enquêté

- 1) Âge :
- 2) Catégorie socio-professionnelle :
- 3) Lieu de résidence, et depuis combien de temps :

II – Perceptions de l'Ariège et des milieux avoisinants

- 4) Décrivez-vous l'Ariège comme une rivière naturelle, aménagée, autres réponses ?

.....
.....
.....

- 5) Pratiquez-vous des activités ou des loisirs liés à la rivière Ariège ?

.....
.....

- 6) La rivière Ariège a-t-elle une importance dans votre environnement ?

.....
.....
.....

- 7) Depuis que vous habitez/travaillez ici, avez-vous observé des changements sur le cours d'eau, et si oui ce changement a-t-il été rapide, progressif, radical, subtil, etc. ?

.....
.....
.....

8) Pourriez-vous donner des exemples de changements que vous avez constatés ? Et sauriez-vous les dater, ou les localiser approximativement ?

.....
.....
.....
.....
.....

9) Ces changements vous paraissent-ils inquiétants ? Ou au contraire de bon augure ?

.....
.....
.....

10) Avez-vous constaté des phénomènes d'érosions, d'incisions du lit ou autres sur la rivière ces dernières années ?

.....
.....
.....
.....

11) Selon-vous, quelle est l'importance de la rivière Ariège par rapport au territoire des communes de Pamiers, Saverdun et Bonnac ?

.....
.....
.....
.....
.....

12) Avez-vous connaissance de la politique de restauration de la rivière menée par le SYMAR ? Si oui, qu'en pensez-vous ? Avez-vous des revendications ou des remarques à apporter ?

.....
.....
.....
.....

13) Avez-vous connaissance des grands aménagements de la rivière ? Si oui, lesquels ?

.....
.....
.....
.....

14) Savez-vous depuis quand EDF intervient sur le cours d'eau ?

.....
.....
.....
.....
.....

15) Avez-vous connaissance de leurs activités ?

.....
.....
.....

III – Restauration des cours d'eau

16) Avez-vous connaissance d'actions de restauration de cours d'eau ?

.....
.....
.....

17) Quels types d'actions sont mis en place ?

.....
.....
.....

18) Quels sont leurs intérêts ?

.....
.....
.....

19) A qui profitent ces intérêts ?

.....
.....
.....

IV – Anciens usages

20) Possédez-vous des documents iconographiques (photos, cartes postales, cartes, plans...) historiques sur la rivière ?

.....
.....

21) Connaissez-vous les anciens usages pratiqués sur la rivière ?

.....
.....
.....
.....

22) Connaissez-vous quelqu'un qui a vu l'évolution des paysages de la rivière, si oui, le contact svp

.....
.....
.....

V – Conclusion

23) Y a-t-il quelque chose dont nous aurions oublié de parler et qu'il vous semble important d'ajouter ?

.....
.....
.....
.....
.....

24) Qu'avez-vous pensé de ce questionnaire ?

.....
.....
.....
.....
.....

25) Accepteriez-vous de participer à un entretien plus complet (1 à 2 heures) sur ce même sujet ?

26) Souhaiteriez-vous être informé des résultats de ce travail de diagnostic territorial ?

Coordonnées de l'enquêté (s'il le souhaite) :

- téléphone :

- mail :

- adresse postale :

Merci d'avoir accepté de répondre à ce questionnaire

Annexe 2

Exemples de fiches de suivi « protocole de re-photographie »

Fiche n° 1 – Proposition Master GEMO

Protocole photographie		
Photographie n° :	Rephotographie n° :	Localisation : Coordonnées GPS :
Marqueurs de paysage (permettant le repérage du site) :		
Photographe :		
Date :		
Heure :		
Appareil :		
Focale :		
Hauteur d'appareil :		
Orientation :		
Observations :		

Fiche n° 2 – Autre fiche

SITE		Date	N° point de vue	Photographe
Livradois - Forez D999		09/04/97	12 0001	AM FILAIRE
Appareil	PENTAX 6 x 7	Croquis		
Focale	90 mm			
Hauteur	1 m 58			
Orientation				
Heure	10 h 40			
Voie	D 999			
Commune limitrophe	Vernet la Varenne			
Référence carte	IGN 4 2633 - 0			
Observations : marquage, repérage, mesures le trépied est sur le bitume sur le bord de la chaussée bornage au sol				
Observations de tirage :				
Date des re- photographies	avril 1997	avril 1998	avril 1999	avril 2001
	avril 2002	avril 2003	avril 2004	avril 2005
	avril 2007			

Annexe 3

Fichiers Excel « Indicateurs de suivi »

Ensemble de fichiers livrés sur un support de stockage numérique amovible

Liste des figures

Figure 1 - bloc diagramme paysager : le paysage stéréotype	1
Figure 2 - Représentation des différents zonages de protection le long de l'Ariège, et spécifiquement sur notre zone d'étude	2
Figure 3 - Représentation des différents axes de travail	3
Figure 4 - Flottage du bois dans l'Aude au XIX ^e siècle. Source : La Dépêche du Midi	6
Figure 5 - Connaissance des anciennes pratiques sur l'Ariège	6
Figure 6 - Activités et pratiques de loisirs sur l'Ariège.	7
Figure 7 - Perception des modifications de l'Ariège par les riverains	8
Figure 8 - Point de vue sur la régie électrique en rive gauche a Saverdun vers 1900 et en 2022	10
Figure 9 – Autre point de vue de la régie électrique de Saverdun vers 1900 et 2022	10
Figure 10 - Régie électrique de Saverdun en rive droite vers 1900 et en 2022	11
Figure 11 - Pont de Saverdun dans les années 1990 et en 2022	11
Figure 12 - Pont de Saverdun vue de la rive gauche vers 1990 et en 2022	11
Figure 13 - Rive gauche du pont de Saverdun en 1910 et 2022	12
Figure 14 - Pont de Saverdun en 1978 et 2022	12
Figure 15 - Quai Roussilles à Saverdun vers 1900 et aujourd'hui	12
Figure 16 - prise de vue de l'Ariège derrière le pont de la voie ferrée en 2012 et 2022	13
Figure 17 - L'Ariège vue du pont de la voie ferrée depuis la rive gauche en 1940 et en 2022	13
Figure 18 - Centrale hydroélectrique de Saverdun, prise depuis le parking de la Cavalerie	14
Figure 19 - Trajectoire des aménagements de Pébernat	15
Figure 20 - Carte IGN Topo et cadastre Napoléonien du tronçon à méandre de Bonnac. Source : Géoportail	16
Figure 21 - Cartographies IGN Topo et cadastre Napoléonien du tronçon court-circuité de la Cavalerie à Pamiers. Source : Géoportail	16
Figure 22 - Plan d'aménagement du cours d'eau à Bourges (vers la Cavalerie) vers 1950	18
Figure 23 - Présentation de la préparation des ortho-photos de 2019 pour les relevés de terrain.	22
Figure 24 - représentation des différentes parties du lit mineur de l'ariège sur la zone d'étude	24
Figure 25 - Débits moyens mensuels de l'Ariège à Saverdun de 1980 à 2021	26
Figure 26 - Histogramme des débits moyens journaliers de 1982 à 2021	28
Figure 27 - présentation des relations entre les débits et leur fréquence de non-retour dans le temps (en vert) et de leur Indice de Confiance haut et bas (en rouge). Source des données : hydro.eaufrance.fr	28
Figure 28 -diagramme de densités des débits enregistrés entre 1982 et 2022, répartis sur chacun des mois de l'année. Source des données : www.hydro.eaufrance.fr	29
Figure 29 - : Evolution des débits maximums instantanés mensuels moyens entre 1980-2011 et 2012-2022. Source des données : hydro.eaufrance.fr	30
Figure 30 - présentation des faciès (durée et intensité des débits – Qmax) de crues importantes	31
Figure 31 - représentation des événements de crue importants enregistrés a la station de Saverdun à partir des débits maximums instantanés. Source des données : hydro.eaufrance.fr	32
Figure 32 - Evolution des débits minimums instantanés mensuels moyens entre 1980-2011 et 2012-2022. Source des données : hydro.eaufrance.fr	33
Figure 33 - représentation des événements d'étiages sévères enregistrés sur la station de Saverdun à partir	34
Figure 34 - Carte des tronçons ayant subi les modifications les plus importants entre 2012 et 2022.	36
Figure 35 - Carte des tronçons ayant subi de faibles modifications entre 2012 et 2022	37
Figure 36 - Carte des modifications au sein du tronçon A1405 entre 2012 et 2022	38

Figure 37 - Evolution de la surface de la bande active pour chaque tronçon en 2012 (en bleu) et	38
Figure 38 - Evolution de la surface de la bande active pour chaque tronçon en 2012 (en bleu) et en 2019 (en orange) d'après la méthode créée par le master 2 GEMO	39
Figure 39 - résultats de l'évolution en % de la surface de la bande.....	40
Figure 40 - Analyse de l'évolution de la sinuosité entre	43
Figure 41 - cartographie de la sinuosité de la section de Bonnac, évolution de SI.....	44
Figure 42 - cartographie de la sinuosité de la section de Saverdun,.....	44
Figure 43 - Image satellite d'un banc de dépôts d'alluvions en amont du seuil de la Cavalerie à Pamiers Source : Google Maps satellite	47
Figure 44 - photographies de l'ouvrage de protection situé à Bonnac.....	48
Figure 45 - représentation des différences de cartographie entre les deux méthodes	50
Figure 46 - carte des incohérences dans le tracé de la bande active de 2012 (source : étude AGERIN, ortho-photographies de 2016).....	50
Figure 47 - débits maximums enregistrés lors de la crue de janvier 2022 a la station de Saverdun. Source : hydro.eaufrance.fr.....	51
Figure 48 - Représentation des impacts de la crues la plus récente (janvier 2022) lors des relevés de terrain. fond de carte IGN	52
Figure 49 - Zone de dépôt de fines important dans le lit majeur au Nord de la commune de Saverdun	53
Figure 50 - arbres déracinés sur la commune de Saverdun	53
Figure 51 - Capture d'écran de la sélection d'un critère de tri dans la feuille "relevé"	58
Figure 52 - Capture d'écran de la feuille "relevé" du document Excel "Observation"	58
Figure 53 - Capture d'écran de suggestion de présentation des résultats sur la.....	59
Figure 54 - Capture d'écran de suggestion de présentation des résultats sur la.....	59
Figure 55 – Localisation et itinéraire du point n°1	64
FIGURE 56 - BANC SEDIMENTAIRE VEGETALISE, JANVIER 2022	64
Figure 57 - banc sédimentaire route d'Escosse en mai 2013 (à gauche) et en février 2022 (à droite)	65
Figure 58 - cartographie et itinéraire du point n°2	65
Figure 59 - falaise de molasse en face de la forêt de bambou, prise en janvier 2022.....	66
Figure 60 - cartographie et itinéraire du point n°3	66
Figure 61 - Photographie de la falaise de molasse du hameau de Gaillac, prise en janvier 2022	67
Figure 62 - cartographie et itinéraire du point n°4	67
Figure 63 - Vue sur l'Ariège depuis le pont de Bonnac (années 1950) (à gauche), et en février 2022 (à droite).....	68
Figure 64 - cartographie et itinéraire du point n°5. Source : Master 2 GEMO	68
Figure 65 - Banc de Bonnac rive droite en novembre 2021 à gauche) et en février 2022 (à droite)....	69
Figure 66 - cartographie et itinéraire du point n°6	69
Figure 67 - Méandre de Bonnac, clichés pris en avril 2013 (à gauche) et février 2022 (à droite)	70
Figure 68 - cartographie et itinéraire du point n°7	70
Figure 69 - Photographies du point "Bonnac point haut" vue du Castela en avril 2019 (à gauche) et.	71
Figure 70 - cartographie et itinéraire du point n°8	71
Figure 71 - Clé de détermination simplifiée des faciès d'écoulement.	73
Figure 72 - axe de mesure d'une particule. Source : O. Navratil, 2014.....	76
Figure 73 - cartographie n°1 des sites de mesure de la granulométrie	77
Figure 74 - effectifs selon les classes de sédiments (N°1).....	77
Figure 75 - effectif cumulé en pourcentage en fonction de la taille de sédiment (N°1).....	78
Figure 76 - Effectifs selon les classes de sédiments (N°2).....	78
Figure 77 - cartographie n°2 des sites de mesure de la granulométrie	79

Figure 78 - Effectifs cumulé en pourcentage en fonction de la taille de sédiments (N°2).....	79
Figure 79 - cartographie n°3 des sites de mesure de la granulométrie	80
Figure 80 - Effectifs cumulé en pourcentage en fonction de la taille de sédiments (N°3).....	80
Figure 81 - Effectifs selon les classes de sédiments (N°3).....	81
Figure 82 - photo des bâtons après un mois passé dans le substrat	83
Figure 83 - Exemple schématique de la mise en place des barres de fer	87

Liste des tableaux

Tableau 1 - synthèse des différences relevées entre les deux méthodes utilisées	41
Tableau 2 - Evolution de la surface de la bande active entre 2012 et 2019 d'après la méthode AGERIN	41
Tableau 3 - Evolution de la surface de la bande active entre 2012 et 2022 d'après la méthode GEMO	42
Tableau 4 - synthèse AFOM des forces et faiblesses des méthodes AGERIN et GEMO.....	51

Table des matières

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

SOMMAIRE

INTRODUCTION - HYDROGEOMORPHOLOGIE DE L'ARIEGE : GEOHISTOIRE, INDICATEURS DE SUIVI ET ATLAS CARTOGRAPHIQUE	1
 1^{ERE} PARTIE - GEOHISTOIRE DE L'ARIEGE A PAMIER ET BONNAC, DU MILIEU DU XIXEME SIECLE A NOS JOURS	4
I. Méthodes de travail	4
a) Revue archivistique et bibliographique	4
b) Travail de terrain : entretiens et visite de la centrale hydroélectrique	5
c) Campagne de rephotographie	5
II. Evolution des pratiques et des usages de l'Ariège	5
a) Les anciens usages et actuels de l'Ariège	5
b) Les évolutions de l'Ariège observées au fil du temps	7
c) Paysages de l'Ariège : importance et évolutions	9
III. Evolution du tronçon court-circuité de Pamiers-Bonnac	14
a) Evolution morphologique de l'Ariège	14
b) Evolution des aménagements à Pébernat	15
c) Critique du travail de géohistoire	18
 2^{EME} PARTIE - EVOLUTION DE L'ESPACE DE MOBILITE - ETAT DES LIEUX 2012-2022	20
I. Méthodologies appliquées à la caractérisation de l'espace de mobilité de l'Ariège	21
a) Collecte de données terrain : optimisation et validation d'observations cartographiques	21
b) Traitement des données terrain	23
c) Présentation de l'atlas cartographique	25
d) Définition des événements hydrologiques	25
II. Résultat de l'évolution des caractéristiques hydromorphologiques de l'Ariège	27
a) Analyse des événements hydrologiques	27
b) Evolution de la largeur du lit mineur depuis 1953	35
c) Variation de la surface de la bande active, comparaison de méthodes bivariées	38
d) Évolution de la sinuosité	42
III. Interprétation des résultats et discussion	45
a) Des réponses complexes à l'origine d'une rétraction du lit mineur du cours d'eau	45
b) Cartographie de la bande active : critique des méthodes employées	49
c) Analyse et détails de la crue morphogène de janvier 2022	51

3^{EME} PARTIE - REGARD PROSPECTIF SUR L'ARIEGE : INDICATEURS ET PROTOCOLES DE SUIVI....	54
I. Diversité et définition des indicateurs de suivi	54
II. Indicateurs globaux et d'observation	56
a) Observation	56
b) Suivi photographique	59
III. Indicateurs géomorphologiques	72
a) Faciès d'écoulement	73
b) Granulométrie Wolman Pebble Count	74
c) Indicateur de suivi du colmatage	81
d) Protocole du suivi de l'érosion	85
Conclusion	88
CONCLUSION GENERALE	89
Bibliographie	90
Ressources archivistiques et d'enquête	93
Annexes	94
Liste des figures ...	101
Liste des tableaux	103