

Rapport de stage

Mesures des différents facteurs influençant les phénomènes d'affouillement en méandres, en vue du dimensionnement d'ouvrages en génie végétal

Autrice : Jeanne Desgranges



(Le Buëch, Jeanne Desgranges, 07.2024)

Stage réalisé du 03.06.2024 au 31.08.2024

Structure d'accueil : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et
l'environnement (INRAE)

Unité de recherche : Laboratoire écosystèmes et sociétés en montagne (LESSEM)



Encadrante INRAE : Natacha Fructus

Encadrant académique : Stéphane Rodrigues

Remerciements

Tout d'abord un grand merci à Natacha Fructus, ma tutrice de stage, pour sa bienveillance et sa gentillesse durant ces 13 semaines. Merci pour ces nombreuses discussions ayant animées nos trajets en voiture, qui m'ont ouverte à certaines questions et permise de réfléchir sur différents sujets. Merci également pour tous les moments de vie, les fous-rires et les galères partagés·ées sur le terrain et dont je ne garde que de bons souvenirs.

Je remercie tous·tes ceux nous ayant accompagnés·ées sur le terrain pour leur aide précieuse et leurs connaissances, généreusement partagées. J'ai appris, grâce à vous, tellement de choses.

Je remercie également Juliette Rousset, doctorante au sein d'INRAE, de m'avoir donné l'opportunité de l'accompagner pendant une semaine sur les cours d'eau torrentiels des Alpes suisses et de Haute-Savoie, et de m'avoir partagé ses connaissances sur le génie végétal.

Enfin, je remercie l'ensemble des stagiaires avec qui j'ai eu la chance de vivre ces 3 mois. Merci à eux·elles pour leur bonne humeur constante, leur gentillesse et les nombreuses parties de tarots qui ont animé nos midis passés ensemble.

Glossaire

Nappe d'accompagnement : la nappe d'accompagnement d'un cours d'eau est une réserve d'eau souterraine en forte liaison hydraulique avec le cours d'eau. L'exploitation de cette nappe d'accompagnement peut avoir un impact non négligeable sur le débit d'étiage du cours d'eau.

Méandre : sinuosité ou courbure prononcée du tracé d'un cours d'eau. La zone en méandre se caractérise par une érosion sur la partie externe de la courbure et une zone de dépôt sur la partie interne.

Extrados : dans un contexte fluvial, partie externe de la courbure du méandre.

Intrados : dans un contexte fluvial, partie interne de la courbure du méandre.

Affouillement : phénomène de creusement local du lit au niveau du pied de berge, provoqué par la présence d'une singularité, d'un rétrécissement ou d'une sinuosité.

Crue biennale : une crue biennale est considérée comme une crue morphogène. Il s'agit donc d'une crue à l'origine de transformations géomorphologiques notables du cours d'eau, dues à des phénomènes d'érosion et de dépôt. Les crues morphogènes sont également à l'origine de perturbations affectant les peuplements faunistiques et floristiques et jouant un rôle dans la succession écologique des espèces.

Une crue dite biennale est une crue ayant une période de retour de 2 ans. C'est-à-dire que chaque année, la probabilité que son débit soit atteint ou dépassée est de $\frac{1}{2}$.

Table des matières

Introduction	1
1. Présentation de la structure d'accueil.....	2
1.1. Le laboratoire de recherche INRAE.....	2
1.2. Unité de recherche LESSEM	2
2. Contexte et objectifs du travail de terrain	3
2.1. L'affouillement en méandre	3
2.2. Les techniques mixtes : à l'interface entre le génie végétal et le génie civil.....	3
2.3. Objectifs du terrain	5
2.4. Présentation de la zone d'étude	5
3. Protocoles de mesures et saisie des données	7
3.1. Profils en travers	7
3.2. Caractérisation des berges.....	8
3.3. Détermination de la texture de berge	9
3.4. Profils en long	9
3.5. Mesures granulométriques	10
3.5.1. Méthode Wolman	11
3.5.2. L'outil Granulo Toolbox	12
3.5.3. Analyse granulométrique par tamisage	13
3.6. Limites des protocoles de mesure	14
4. Traitement des données.....	15
4.1. Définition de la hauteur d'affouillement	15
4.2. Formules mathématiques du calcul de l'affouillement	16
4.3. Application des formules et premiers résultats.....	17
4.3.1. Calcul de l'affouillement mesuré sur le terrain.....	17
4.3.2. Calcul de l'affouillement à partir des formules mathématiques.....	17
4.3.3. Résultats obtenus	18
4.4. Limites du protocole	18
5. Apports et réflexions personnels-elles liés-ées à la réalisation de ce stage.....	19
5.1. Adoucir les techniques de restauration des cours d'eau	19
5.2. Projection pour le stage de fin d'étude et dans un futur métier	22
Conclusion	23
Bibliographie	24

Table des figures

Figure 1: Ouvrage en technique mixte situé en rive droite sur le Buëch, au niveau de La Faurie (05)	4
Figure 2 : Coupe schématique de plans et plançons renforcés au moyen de « boudins » de géotextiles (Adam et al., 2008)	4
Figure 3 : Coupe schématique d'une fascine de saules (Adam et al., 2008)	4
Figure 4 : Ouvrage en technique mixte situé en rive droite sur le Buëch, au niveau de la départementale, sur la commune de Saint-Julien-en-Beauchêne (05)	5
Figure 5 : Carte des différents sites de mesure – 1. La Bourbince 2. La Semence 3. L'Ozolette 4. L'Irance 5. La Mare 6. La Coise 7. La Bourbre 8. La Varèze 9. La Sanne 10. La Galaure 11. L'Herbasse 12. La Drôme 13. Le Jabron 14. Le Buëch 15. L'Asse 16. Le Lange 17	6
Figure 6 : Prise des mesures sur deux sections en méandre 1. Le Lange 2. La Drôme.....	8
Figure 7 : Prise de mesure du profil en long	10
Figure 8 : Grille Wolman	11
Figure 9 : Axes d'une particule sédimentaire (Recking, 2017)	11
Figure 10 : Prélèvement des grains	11
Figure 11: Interface « Analyse automatique » de l'outil Granulo Toolbox	13
Figure 12 : Interface « Supervision rapide » de l'outil Granulo Toolbox.....	13
Figure 13 : Pesée des tamis	14
Figure 14 : Illustration schématique des grandeurs h_{aff} , h_{moy} et h_{max}	16
Figure 15 : Interface Hydraulique BedloadWeb, après saisie du profil topographique amont, de la granulométrie et de la caractérisation des berges – Herbasse (section amont des méandres 1 et 2).....	17
Figure 16 : Incision du lit sur l'Herbasse avant travaux (BIOTEC, 2024)	19
Figure 17 : Une partie du linéaire de l'Herbasse restaurée, après travaux (BIOTEC, 2024).....	19
Figure 18 : Ouvrage castor situé le plus en aval sur la Lierne	21
Figure 19 : Bras secondaire reconnecté au chenal principal grâce à l'ouvrage castor	21
Figure 20 : Second ouvrage, situé plus en amont sur la Lierne	21
Figure 21: Ouvrage castor naturel sur la Drôme amont	22

Table des tableaux

Tableau 1: Synthèse des sites sur lesquels ont été faites les mesures	6
Tableau 2 : Détermination de la composition du sol grâce au test du boudin (ISARA Lyon, 2016) .	9
Tableau 3 : Synthèse des profondeurs d'affouillement $h_{aff,T}$ et de l'écart relatif entre $h_{aff,T}$ et $h_{aff,Q2}$ pour les méandres 1, 2, 3, 5, 6 et 7 de l'Herbasse	18

Introduction

Les phénomènes d'érosion de berges font partie des processus naturels liés à la dynamique des cours d'eau. Les érosions en tête de bassin versant assurent notamment la recharge sédimentaire de la partie aval des rivières. Ce transit sédimentaire, impliquant la formation de zones d'érosion et de zones de dépôt, permet la création d'habitats diversifiés pour la faune et la flore (Joan L. Florsheim et al., 2008). La rivière, libre de divaguer latéralement, peut ainsi former des bras secondaires et inonder certaines zones de manière temporaire. Cette divagation est également essentielle dans la création d'habitats diversifiés. La fixation des berges empêche la recharge sédimentaire du cours d'eau par érosion latérale et induit donc un creusement du lit. Cette incision a de lourdes conséquences sur la dynamique de la rivière et sur les milieux et habitats en lien avec elle. En effet, le creusement du lit mineur entraîne la baisse de la nappe d'accompagnement du cours d'eau. Cette baisse de la nappe crée un assèchement des zones humides en périphérie de la rivière avec la disparition d'habitats et une diminution de l'eau disponible pour la faune et la flore. Le creusement du lit peut également provoquer la déstabilisation des ouvrages en génie civil tel que les ponts. De plus la fixation des berges tend à augmenter le risque d'inondation. Il est donc primordial de ne pas intervenir sur les cours d'eau lorsque la situation le permet. Toutefois, l'activité humaine induit parfois la présence d'enjeux forts en zones d'érosion (route, habitation etc.). Dans ces cas, la stabilisation des berges peut être nécessaire. Il convient, avant chaque intervention, de déterminer l'ampleur et les causes de l'érosion et d'analyser le type d'enjeux présents dans la zone afin de proposer une solution adaptée (Peeters et al., 2020).

Lorsqu'une protection de berge est nécessaire, des techniques de génie végétal peuvent être adoptées afin de lutter contre l'érosion tout en limitant l'impact de l'ouvrage sur le milieu naturel. Le génie végétal utilise les propriétés biologiques, physiologiques et physiques des plantes pour proposer des solutions de protection et de stabilisation des sols (Frossard & Evette, 2009). En effet, les végétaux ont des aptitudes naturelles permettant la fixation des sédiments, notamment grâce à leur système racinaire, leur effet de couverture des berges par leur tiges aériennes ou encore leur effet drainant par absorption des racines et évapotranspiration des feuilles (Frossard & Evette, 2009). L'utilisation du génie végétal est parfois limitée (Evette et al., 2009). Cependant, lorsqu'elle est possible, elle offre de nombreux avantages. Tout d'abord, contrairement aux protections en génie civil nécessitant des matériaux très coûteux, les techniques de génie végétal ont des coûts réduits de mise en œuvre (Adam et al., 2008). De plus, le génie végétal tend à reproduire des formations végétales naturelles, propres au terrain où sont mis en place les ouvrages (Cavaillé et al., 2014). Ce sont donc des ouvrages voués à s'insérer dans le paysage initial et capable d'auto-régénération. Leur résistance augmente avec le temps, offrant une protection à long terme (Evette et al., 2008). Enfin, les ouvrages en génie végétal favorisent les habitats pour la biodiversité contrairement au génie civil (Cavaillé et al., 2014).

Le stage réalisé s'insère dans la thèse menée par Natacha Fructus. L'objectif du travail de Natacha est de vérifier la validité des formules théoriques de détermination de l'affouillement en méandre en vue de mieux dimensionner les ouvrages de protection de berge en génie végétal. Sa

thèse se décompose en trois grands axes : un travail de terrain visant à récolter des données sur l'affouillement en méandre, un retour d'expérience sur les ouvrages bois déflecteurs et une partie de modélisation d'ouvrages de pied de berge en génie végétal en canal. Les missions effectuées pendant ce stage ont été menées sur une période de 13 semaines, dans le cadre de la première phase de cette thèse (la phase de terrain).

Ce rapport vise à présenter les missions réalisées pendant ce stage, leurs objectifs et les résultats obtenus. Un retour sur les apports et réflexions personnels-elles liées à ce stage sera également abordé.

1. Présentation de la structure d'accueil

Ce stage a été réalisé au sein du centre de recherche INRAE Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes avec l'unité de recherche du LESSEM.

1.1. Le laboratoire de recherche INRAE

INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) a été créé le 1^{er} janvier 2020 de la fusion entre l'Inra (Institut national de la recherche agronomique) et Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture). La vocation de cette structure est de produire et diffuser des connaissances scientifiques qui seront mobilisées au service de l'innovation, de l'expertise et de l'appui aux politiques publiques. Ainsi INRAE vise à accompagner l'émergence de systèmes agricoles et alimentaires durables. Le laboratoire de recherche présente 18 centres répartis en France dont 2 au sein de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Le premier site se trouve à Clermont, le second se divise entre Grenoble et Lyon. Le centre Lyon-Grenoble est composé de 21 unités de recherche.

1.2. Unité de recherche LESSEM

Le Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés en Montagne s'inscrit parmi les unités de recherche du centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes. C'est au sein de cette unité que ce stage a été réalisé. Le LESSEM mène des recherches à l'interface entre les écosystèmes et les sociétés, notamment sur les terrains de montagne. Les travaux de recherche au sein du LESSEM visent donc à produire de nouvelles connaissances sur les sociaux-écosystèmes et également à proposer un appui à la prise de décision au niveau des politiques publiques territoriales. Le LESSEM se compose de 4 équipes : ASTRRE, BIOSSES, DYNAMICS et COMPET. L'équipe ASTRRE travaille sur l'adaptation des territoires aux évolutions climatiques, en intégrant les acteurs·trices, les activités humaines et la biodiversité présents-es sur le territoire. L'équipe BIOSSES travaille sur la gestion, la conservation et la restauration des milieux naturels de montagne en s'intéressant aux processus écologiques et sociaux à l'œuvre dans les régions concernées. Les recherches du groupe DYNAMICS portent sur la prédiction et l'évolution de la dynamique des systèmes écologiques forestiers et pastoraux. Ce groupe travaille pour une gestion durable de ces écosystèmes face aux changements globaux. Enfin le groupe COMPET est transversal au LESSEM. Il s'occupe de la capitalisation, de l'acquisition et de la diffusion des données scientifiques.

2. Contexte et objectifs du travail de terrain

2.1. L'affouillement en méandre

Dans un cours d'eau, l'affouillement se traduit par un creusement local du lit. Ce phénomène érosif peut être provoqué par un point dur (un obstacle présent dans le lit du cours d'eau) ou s'étendre plus largement par rétrécissement du lit ou présence de méandre. L'affouillement en méandre est induit par l'apparition de courants secondaires, entraînant le déplacement des sédiments de l'extrados du méandre vers l'intrados. Ce phénomène naturel conduit à l'érosion et au creusement de la partie extérieure du méandre (*Bernard et al., 2007*). Le génie végétal peut donc être utilisé pour limiter cette érosion en méandre, si la situation le requiert. Les techniques de génie végétal sont très nombreuses, et dans la quasi-totalité des cas, plusieurs techniques différentes sont utilisées dans un même ouvrage. Mais le génie végétal, dans certaines situations spécifiques, peut également être combiné à des techniques de génie civil. L'utilisation du génie végétal avec le génie civil est regroupée sous le nom de technique mixte ou combinée. Ces techniques mixtes sont notamment adoptées lorsque le milieu est contraint à une pression anthropique importante, lorsque le lit du cours d'eau est très mobile ou encore lorsque la rivière présente un régime torrentiel.

2.2. Les techniques mixtes : à l'interface entre le génie végétal et le génie civil

Plusieurs ouvrages en techniques mixtes ont été observés de manière régulière lors de la campagne de terrain menée pendant ce stage. Deux ouvrages mixtes ont notamment été visités sur le Buëch. Ce cours d'eau prend sa source en Auvergne-Rhône-Alpes, dans la commune de Lus-la-Croix-Haute (26) et se jette dans la Durance, au niveau de Sisteron (04). Mis en place par le Syndicat Mixte de Gestion Intercommunautaire du Buëch et de ses Affluents (SIMIGIBA) et par le département des Hautes-Alpes, les ouvrages ont été placés en extrados de méandre pour lutter contre l'érosion de la berge. Le premier ouvrage (Figure 1), datant de 2015, est à l'origine un ouvrage composé uniquement de techniques de génie végétal : une fascine simple (Figure 2) et 3 lits de plançons (Figure 3). Suite à une crue survenue en 2016 ayant provoquée une forte érosion, le pied de berge a été renforcé par des blocs en enrochement. Cet ouvrage s'inscrit dans le prolongement d'une digue, située en rive droite à l'aval. A l'origine, il a été érigé pour protéger des terrains agricoles et un chemin faisant office de voie douce et passant en haut de berge. A terme cet ouvrage est voué à être retiré afin de redonner de la place au cours d'eau dans cette zone.



Figure 1: Ouvrage en technique mixte situé en rive droite sur le Buëch, au niveau de La Faurie (05)

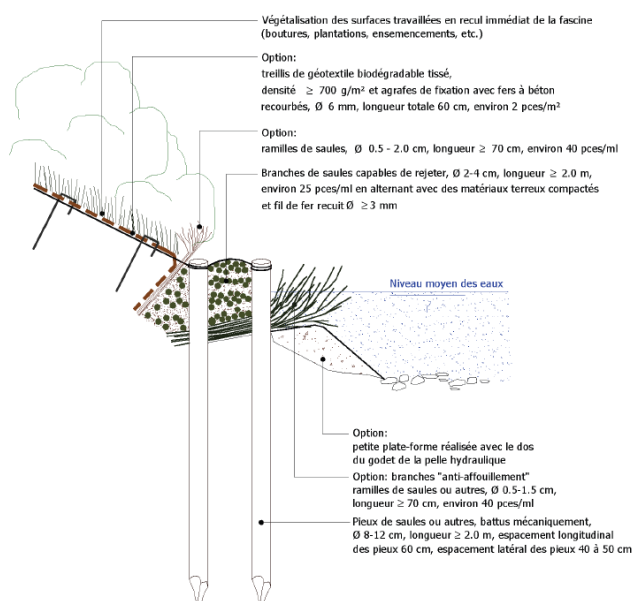


Figure 3 : Coupe schématique d'une fascine de saules (Adam et al., 2008)

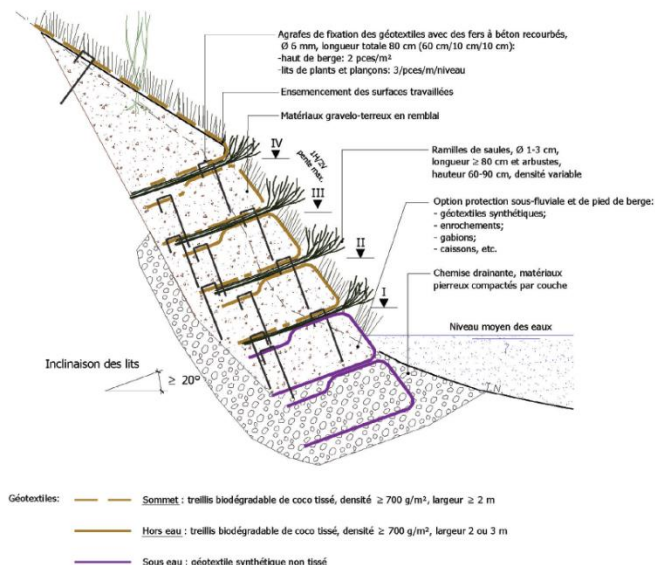


Figure 2 : Coupe schématique de plans et plançons renforcés au moyen de « boudins » de géotextiles (Adam et al., 2008)

Le second ouvrage (Figure 4) se situe juste après la commune de Saint-Julien-en-Beauchêne (05), à l'amont de l'ouvrage précédent. Une technique mixte a été choisie pour cet ouvrage car il se situe dans une zone à très fort enjeu. En effet, la route départementale passe à quelques mètres seulement du haut de berge concernée. La création de cet ouvrage intervient suite au recul sur plusieurs mètres de la berge, entraîné par une crue. La berge présente donc un sabot en enrochement remblayé. Des ramilles anti-affouillement ont été placées à l'interface entre les enrochements et le génie végétal afin de casser les écoulements et de limiter l'affouillement. Au-dessus de ces ramilles ont été mis en place des lits de plants et plançons de saules. Enfin le reste de la berge a été bouturé.



Figure 4 : Ouvrage en technique mixte situé en rive droite sur le Buëch, au niveau de la départementale, sur la commune de Saint-Julien-en-Beauchêne (05)

Ces deux exemples d'ouvrages mixtes illustrent l'utilisation du génie végétal, combiné au génie civil, en vue de limiter les phénomènes érosifs. Cependant la fixation de la berge entraîne une résistance à ces phénomènes d'érosion en extrados, augmentant ainsi la contrainte au niveau du pied de berge. Cette contrainte induit un phénomène d'affouillement, qui mène à un risque de déstabilisation des ouvrages. Dans les techniques mixtes, le pied de berge est protégé par des techniques en génie civil, dont la connaissance permet un bon dimensionnement pour résister à cette érosion. L'enjeu restant étant de savoir jusqu'où élever les enrochements. En revanche, pour les ouvrages uniquement en génie végétal, ce creusement en pied de berge fait partie des principales défaillances liées à la dégradation ou à la destruction des ouvrages (Leblois et al., 2022). Il est très difficile de prévoir la manière dont le pied de berge s'érode. Or cette information est cruciale, puisqu'elle permettrait notamment de savoir à quel niveau planter la végétation pour favoriser sa reprise et son développement racinaire ou encore quels types de structures (souches, fascines...) installer en pied de berge pour renforcer la fixation par les racines. Le dimensionnement des ouvrages en génie végétal passe donc par la compréhension et la prédiction des profondeurs d'affouillement sur des méandres naturels.

2.3. Objectifs du terrain

Il existe de nombreuses formules permettant de calculer les profondeurs d'affouillement en méandre. Ce travail s'intéresse à 12 formules, ayant été étudiées par Natacha lors d'un précédent stage de fin d'études. L'objectif du travail effectué sur le terrain est le relevé de mesures sur une centaine de méandres appartenant à différents cours d'eau. Les missions réalisées sur le terrain sont les suivantes :

- Détermination des profondeurs des fosses dues à l'affouillement en méandre et détermination des profils topographiques au niveau de ces zones d'affouillement
- Détermination de la pente locale et des profils de sections plus régulières et trapézoïdales en amont des zones d'affouillements
- Caractérisation des berges au niveau des fosses d'affouillement (recouvrement de la végétation, texture des sols, substrat dominant, rayon de courbure du méandre, granulométrie)

Les profondeurs d'affouillement pour chaque méandre sont donc déterminées par mesures directes sur le terrain. Les autres mesures permettent, par la suite, de calculer ces mêmes fosses d'affouillement par application des formules mathématiques et de comparer les résultats obtenus avec les valeurs prises sur le terrain. Ainsi, l'objectif final est de vérifier la validité des formules mathématiques.

2.4. Présentation de la zone d'étude

A la date de rendu de ce rapport (19.08.2024), le nombre de méandres s'élève à 97. Ce stage prenant fin le 29.08.2024, l'objectif de 100 méandres sera atteint par la suite. Les mesures ont été faites sur 17 cours d'eau différents répartis en Bourgogne-Franche-Comté, en Auvergne-Rhône-Alpes et en Provence-Alpes-Côte d'Azur (Figure 5).

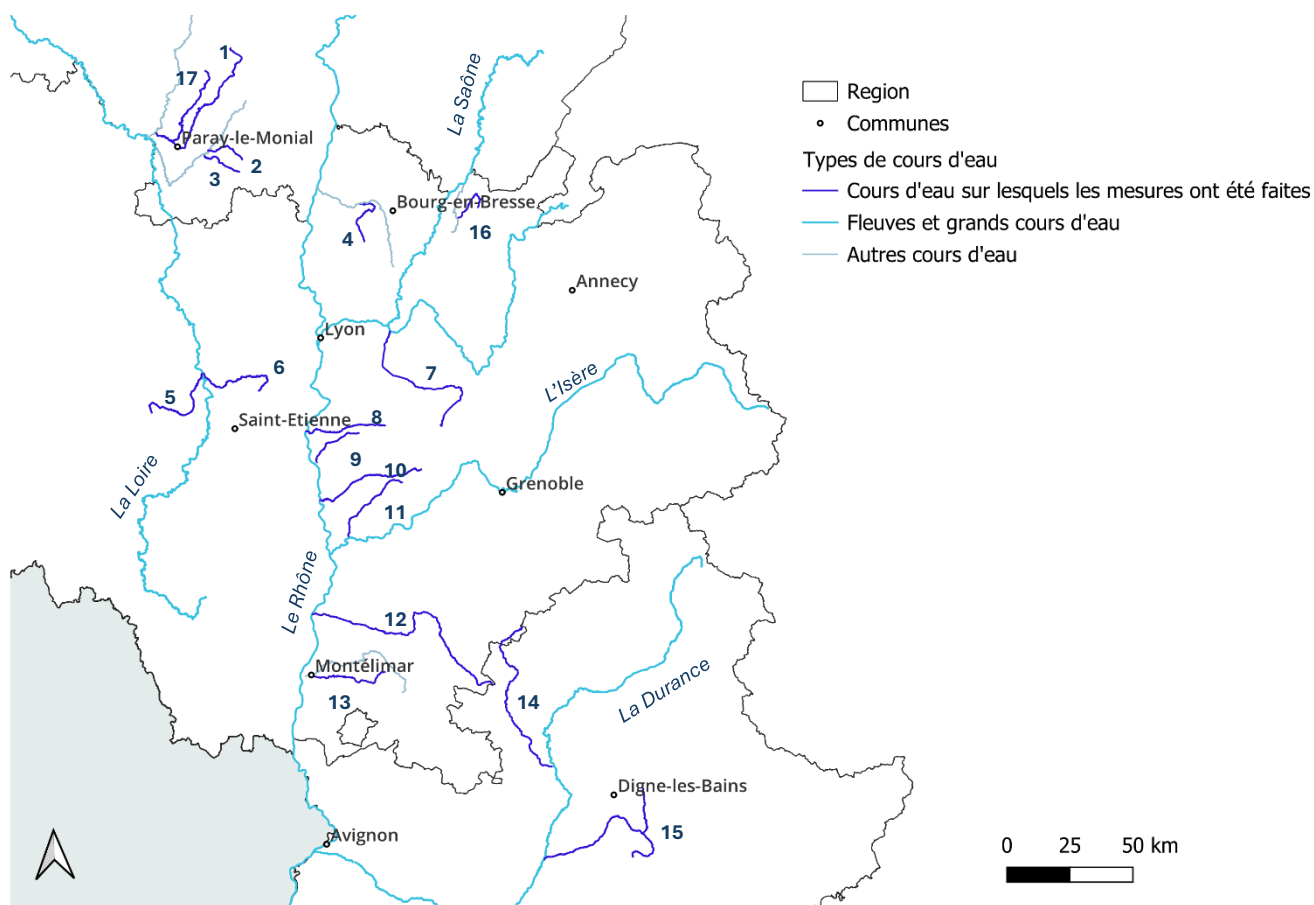


Figure 5 : Carte des différents sites de mesures – 1. La Bourbince 2. La Semence 3. L'Ozolette 4. L'Irance 5. La Mare 6. La Coise 7. La Bourbre 8. La Varèze 9. La Sanne 10. La Galaure 11. L'Herbasse 12. La Drôme 13. Le Jabron 14. Le Buëch 15. L'Asse 16. Le Lange 17

Le tableau 1 récapitule le nombre de méandres pris sur chaque cours d'eau ainsi que les principales caractéristiques des rivières.

Tableau 1: Synthèse des sites sur lesquels ont été faites les mesures

Nom du cours d'eau	Nombre de méandres	Intervalle de largeur largeur plein bord	Intervalle de pente (%)	Granulométrie
L'Asse	4	12 à 18m	0,6 à 1,1 %	Gravier grossier
La Bourbince	4	14m	0,04 à 0,09 %	Sable
La Bourbre	2	11m	0,40%	Gravier moyen
Le Buëch	4	16 à 43 m	0,90%	Gravier grossier
La Coise	7	6 à 8m	0,3 à 0,9 %	Gravier grossier
La Drôme	11	7 à 30m	0,6 à 1,8 %	Gravier grossier
La Galaure	9	9m	0,3 à 0,9 %	Gravier grossier
L'Herbasse	7	4 à 8m	1,3 à 2,7 %	Gravier grossier
L'Irance	3	8m	0,02%	Gravier moyen
Le Jabron	3	7m	0,6 à 0,9 %	Gravier grossier
Le Lange	11	5 à 11m	0,08 à 0,5 %	Gravier grossier
La Marre	6	9m	0,60%	Gravier grossier
L'Oudrache	4	10m	0,06 à 0,2 %	Sable
L'Ozolette	3	6m	0,05%	Sable
La Sanne	5	6 à 10m	0,4 à 1,4 %	Gravier grossier
La Semence	3	8m	0,07%	Sable
La Varèze	11	8 à 11m	0,2 à 1,8 %	Gravier grossier

Sur le terrain, les mesures sont prises sur les méandres présentant des fosses d'affouillement dues à la courbure du méandre et/ou à la présence d'un ouvrage en génie civil, génie végétal ou technique mixte. Sont exclus les méandres dont les fosses sont induites par une singularité dans le méandre qui entraîne un creusement local du lit (point dur créé par de la végétation ou la présence d'un obstacle à l'écoulement dans le lit mineur, seuil trop important en amont, rétrécissement significative du lit).

3. Protocoles de mesures et saisie des données

Pour chaque sortie sur le terrain, un matériel de sécurité et de prévention a été amené. Une paire de Weders, un gilet de sauvetage et des gants étaient à disposition de chaque opérateur·trice. De plus une corde de sécurité et une trousse à pharmacie étaient également disponibles. Le terrain a systématiquement été fait en binôme ou plus.

3.1. Profils en travers

Pour chaque méandre, deux profils en travers sont dressés. Ils permettent de relever la topographie, dans un premier temps dans le méandre, au niveau de la fosse d'affouillement. Le deuxième profil est ensuite réalisé en amont de la fosse, sur une section plus régulière et trapézoïdale.

Matériels

- Cible plastifiée dont le centre se situe à une hauteur de 1,40 m ou mire télescopique (lorsque la profondeur d'affouillement est supérieure à 1,40 m)
- Jumelles laser
- Trépied

Protocole de mesure

Dans un premier temps, une personne sonde le lit du cours d'eau, au niveau de la fosse d'affouillement, afin de déterminer l'emplacement du point le plus profond. Le trépied et les jumelles sont ensuite installées en face de ce point et de manière à relever le profil perpendiculairement au cours d'eau (Figure 6). La prise de mesure peut ensuite débuter. Elle nécessite l'intervention de 2 personnes. La première s'occupe de placer la cible aux différents points d'intérêt pour relever un profil le plus précis possible. La seconde personne s'occupe de la prise de mesure du couple hauteur/distance de chaque point, grâce aux jumelles laser et remplit la fiche de terrain prévue à cet effet (Annexe 1). Le relevé des mesures se fait toujours depuis l'extrados du méandre vers l'intrados. Des points sont effectués à chaque changement significatif de pente, de granulométrie, aux limites de l'eau ainsi qu'aux limites des différentes strates de la végétation (herbacée, arbustive, arborée). Plusieurs points sont également mesurés dans le lit mineur du cours d'eau et au niveau de la fosse d'affouillement. En parallèle, un schéma de la section est réalisé sur papier et des photos de chaque section sont prises avec un téléphone portable.



Figure 6 : Prise des mesures sur deux sections en méandre 1. Le Lange 2. La Drôme

Les mesures pour déterminer le profil en amont de la fosse suivent le même protocole et sont prises depuis la rive gauche vers la rive droite, afin de faciliter le traitement des données par la suite. Un même profil amont peut être relevé pour plusieurs sections en méandre. Dans ce cas, la section amont doit être mesurée en amont de toutes les sections en méandre.

Saisie des données

Les mesures relevées sont ensuite saisies sur Excel. Plusieurs données en sont tirées : la pente de la berge extradados, la largeur plein bord (prise entre les deux limites herbacées de la section), la hauteur moyenne de la ligne d'eau au niveau de chaque section et des graphiques des profils en travers.

3.2. Caractérisation des berges

La caractérisation des berges se fait uniquement sur la section en méandre et concerne la berge extradados.

Matériels

- Téléphone portable équipé de l'application QField

Protocole de mesure et saisie des données

La caractérisation des berges peut être réalisée par une seule personne. Elle se fait via l'application QField, équivalent de QGIS pour smartphone. Une couche regroupant les différents méandres est créée au préalable. Sur le terrain, une nouvelle entité est ensuite créée dans cette couche, correspondant à un nouveau méandre. Différents champs doivent ensuite être complétés :

- Une estimation du rayon de courbure du méandre
- Le substrat dominant
- La texture de berge (protocole à part entière pour ce relevé)
- Le pourcentage de recouvrement de la berge par différents éléments :
 - Le sol nu
 - Les espèces herbacées (hauteur < 1m)
 - Les espèces sous-arbustives (1m < hauteur < 4m)
 - Les espèces arbustives (4m < hauteur < 8m)

- Les espèces arborées (hauteur > 8m)
- La mousse
- Les racines
- Le bois mort

3.3. Détermination de la texture de berge

La détermination de la cohésion de berge fait partie intégrante de la caractérisation de la berge mais possède un protocole à part entière. Ce protocole nécessite l'intervention d'un·e seul·e opérateur·trice.

Matériels

- Petite pelle

Protocole

La texture de berge est déterminée en prélevant, avec la pelle, un échantillon de sol nu sur la berge extradors. Après humidification de la terre, l'opérateur·trice crée un boudin de maximum 1 cm de diamètre, en faisant rouler la terre entre les paumes de ses mains. Si un boudin a pu être réalisé, il faut ensuite essayer de créer un anneau. Le type de texture de berge est déterminé en fonction de la possibilité ou non de former un boudin et dans le cas où cela est possible, du niveau auquel se fissure l'anneau. Le résultat obtenu permet de définir la composition du sol de la berge (Tableau 2).

Tableau 2 : Détermination de la composition du sol grâce au test du boudin (ISARA Lyon, 2016)

Test	Résultat	Conséquence sur la texture
Réalisation d'un boudin	Possible	Argile > 10 %
	Impossible	Argile < 10 %
Réalisation d'un anneau avec le boudin	Fissuration avant 1/2 fermeture de l'anneau	Limons > Argile Argile < 30 %
	Fissuration au 3/4 de la fermeture	Limons < Argile Argile > 30 %
	Anneau réalisable	Argile > 30 %

3.4. Profils en long

Le profil en long est réalisé en amont de la section de méandre. Il permet d'obtenir la pente locale. Un même profil en long peut être réalisé pour plusieurs méandres, si ces derniers se suivent.

Matériels

- Cible plastifiée dont le centre se situe à une hauteur de 1,40 m
- Jumelles laser

- Trépied

Protocole de mesures

Cette prise de mesures requiert la participation de deux individus. Elle se fait sur un linéaire longitudinal au cours d'eau et sur une distance maximale (dans l'idéal 5 à 10 fois supérieur à la largeur du cours d'eau). Le trépied et les jumelles sont placés-ées de manière à ce que l'opérateur·trice relevant les mesures voit le plus loin possible devant et derrière lui-elle. La première personne est donc en charge de noter le couple distance/hauteur de chaque point. La seconde personne se positionne à l'amont des jumelles (Figure 7), le plus loin possible tout en restant visible. Elle effectue une série de 3 à 5 points, depuis sa position jusqu'à celle de la deuxième personne. Les mesures sont ensuite répétées de la même manière depuis la position de la seconde personne jusqu'au point visible le plus loin à l'aval. Lors des mesures, afin de s'affranchir des variations de hauteurs locales, le pied de la cible est placé au niveau de la ligne d'eau et non au niveau du fond du lit.



Figure 7 : Prise de mesure du profil en long

Saisie des données

Les données sont rentrées sur Excel. La pente est ainsi déterminée par régression linéaire (Annexe 2).

3.5. Mesures granulométriques

La mesure de la granulométrie est effectuée afin d'obtenir la valeur du D50, nécessaire à l'application des formules mathématiques pour le calcul de l'affouillement. Cette valeur correspond au diamètre pour lequel 50% des particules de l'échantillon ont une taille inférieure à la valeur du D50. Cette mesure permet également d'obtenir une courbe granulométrique, illustrant la répartition de la taille des sédiments de l'échantillon prélevé.

Trois méthodes ont été utilisées en fonction du type de cours d'eau. Pour les cours d'eau à granulométrie grossière ou moyenne, la méthode Wolman a été adoptée, parfois complétée par

une mesure avec l'outil Granulo Toolbox. Pour les cours d'eau sableux, la granulométrie a été obtenue par tamisage. Chaque méthode est explicitée dans la suite de ce rapport.

3.5.1. Méthode Wolman

Une mesure granulométrique par méthode Wolman est réalisée sur chaque secteur. Un secteur correspond à un tronçon de cours d'eau d'une longueur de 500m à 1km, sur lequel la granulométrie est globalement homogène. Plusieurs méandres peuvent faire partie d'un même secteur. La méthode Wolman consiste à prélever 100 particules de manière aléatoire et à déterminer leurs tailles grâce à une grille Wolman (Figure 8).



Figure 8 : Grille Wolman

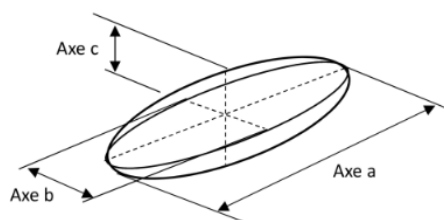


Figure 9 : Axes d'une particule sédimentaire (Recking, 2017)



Figure 10 : Prélèvement des grains

Matériels

- Grille Wolman

Protocole

Les mesures doivent être réalisées à deux. La première personne a pour rôle de prélever les particules et de les passer dans le gabarit Wolman. La seconde personne se charge de noter, pour chaque particule relevée, la classe de taille à laquelle elle appartient. Elle assure également un comptage du nombre total de particules prélevées. La taille d'une particule correspond à la largeur de son axe b (Figure 9). La taille de cet axe est déterminée par le plus petit gabarit de la grille dans laquelle la particule peut passer.

Chaque particule ne doit être prélevée qu'une seule fois. Pour cela, l'opérateur·trice concerné·e effectue, entre chaque prélèvement, une grande enjambée et ramasse une particule située au bout de ses pieds (Figure 10). Le choix des particules ne doit pas être influencé par la vision de l'opérateur·trice. Il est donc recommandé de ne pas regarder le sol au moment du prélèvement.

Saisie des données

Les données sont saisies sur Excel. Les pourcentages cumulés croissants de chaque classe sont calculés afin d'obtenir la courbe granulométrique. Les valeurs de D50 et D84 sont également calculées. Un exemple des résultats obtenus est présenté en Annexe 3.

3.5.2. L'outil Granulo Toolbox

L'outil Granulo Toolbox est développé par l'entreprise GeoPeka. Il permet, à partir de photographies prises sur le terrain, de réaliser un échantillonnage de type Wolman de manière automatique. Ce stage a permis de participer à la phase de tests professionnels du projet, consistant à prendre en main l'outil et à l'utiliser pour des mesures terrain. Un retour a ensuite été fait à l'entreprise en vue d'établir des modifications pour améliorer ou corriger certains problèmes. Cet outil étant en cours de développement, les mesures faites avec la Granulo Toolbox ont systématiquement été complétées par une mesure Wolman.

Matériels

- Un téléphone portable
- Un objet dont la taille est connue

Protocole

Sur le terrain, le protocole consiste simplement à prendre des photos de la granulométrie. Une seule personne est donc nécessaire à cette opération. L'opérateur·trice choisit d'abord un banc de sédiment dépourvu de végétation, situé hors d'eau et assez grand pour pouvoir y effectuer plusieurs photos. Il est également préférable que le terrain ne présente pas des alternances de zones ombragées/zones ensoleillées, pour limiter l'effet de contraste sur les photos. L'opérateur·trice place ensuite sur le banc de sédiment l'objet dont la taille est connue et qui servira d'échelle lors du traitement des données. Cet objet doit donc apparaître sur la première photo mais pas sur les photos suivantes. L'opérateur·trice prend au total 4 à 5 photos, sur lesquelles ne doivent pas apparaître deux fois les mêmes particules. Pour cela, il·elle effectue un grand pas entre chaque prise. Afin de ne pas fausser la taille des particules, le téléphone portable doit être positionné parallèlement au sol et sa hauteur ne doit pas varier entre les différentes photos. Le terrain ne doit pas non plus présenter de trop grandes variations de hauteur.

Saisie des données

Les photos des sédiments sont importées dans l'outil Granulo Toolbox. Au préalable la photo contenant l'objet faisant office d'échelle doit être renommée « échelle ». La taille de l'objet de référence doit ensuite être indiquée en millimètres. L'application ouvre une première interface (Figure 11) sur laquelle apparaissent un extrait des photos, la localisation du cours d'eau et une première analyse des particules de l'échantillon.

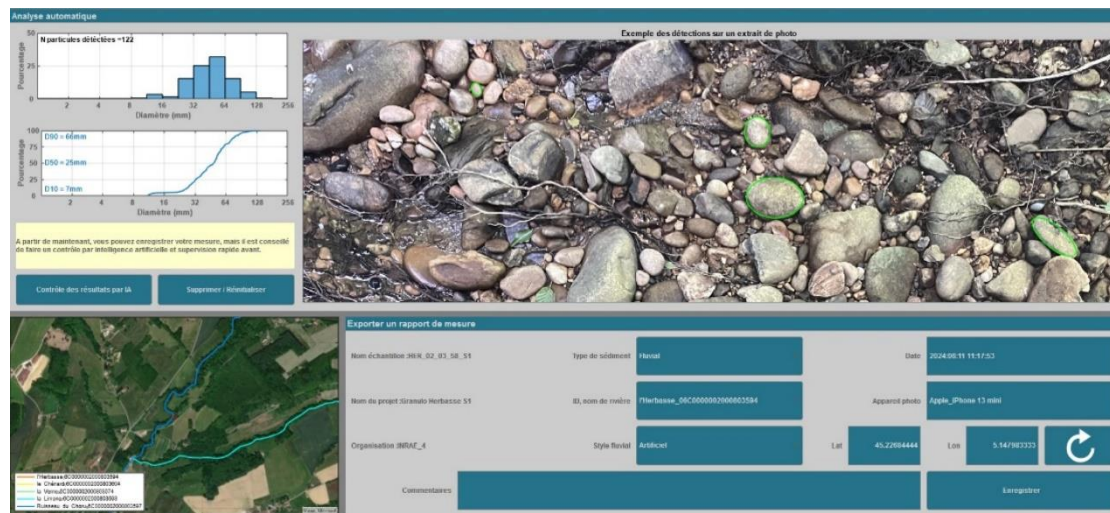


Figure 11: Interface « Analyse automatique » de l'outil Granulo Toolbox

Il est ensuite nécessaire de réaliser une vérification des résultats par intelligence artificielle. Une seconde interface s'ouvre alors (Figure 12) présentant les particules retenues dans l'analyse, dont l'axe b est défini par le cercle bleu. Les particules en vertes sont celles retenues pour les mesures granulométriques, celles en rouges n'étant pas prise en compte. Une correction de la détection par l'IA est effectuée par l'utilisateur·trice, qui vérifie que l'axe b des particules prises en compte a bien été détecté. Dans le cas contraire l'utilisateur·trice supprime la particule de l'échantillon en la passant en rouge. Il est également possible d'indiquer manuellement l'axe b des particules. A la fin de cette phase de supervision, le nombre de particules doit être minimum égale à 100. Il est alors possible d'obtenir une fiche récapitulative des calculs et résultats obtenus sur l'échantillon (Annexe 4).

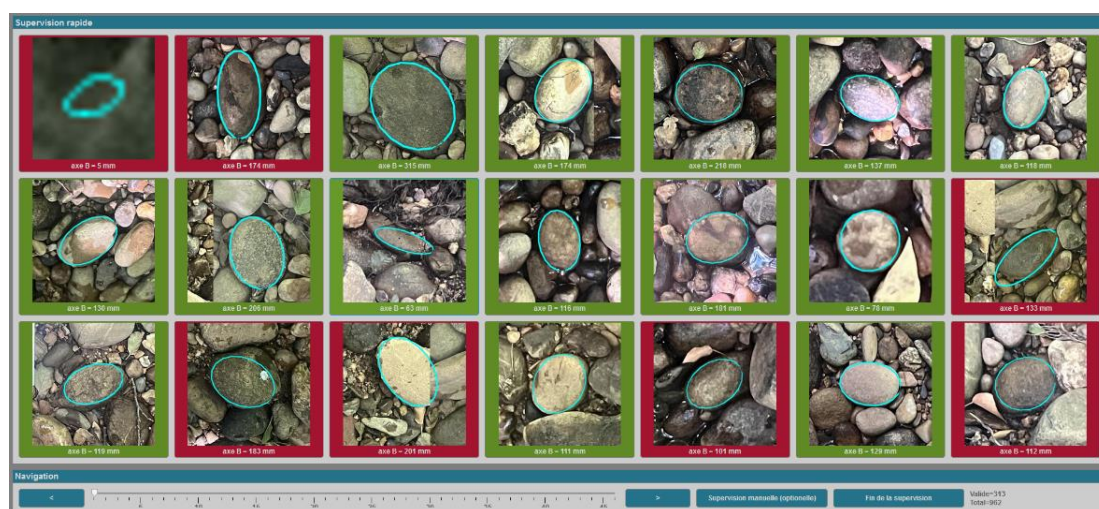


Figure 12 : Interface « Supervision rapide » de l'outil Granulo Toolbox

3.5.3. Analyse granulométrique par tamisage

La technique de tamisage a été utilisée pour déterminer la granulométrie des trois cours d'eau sableux.

Matériels

- 9 tamis d'une taille respective de 0.2mm ; 0.5mm ; 1 mm ; 2 mm ; 4 mm ; 6.3mm ; 8 mm ; 10mm et 12.5mm
- Récipient de récupération des sédiments

- Balance précise à 1g

Protocole

Les mesures peuvent être effectuées par une seule personne et sont faites sur un échantillon de taille équivalente à deux pelletés (prélevées avec une petite pelle de jardinage). La taille d'un échantillon doit être suffisante pour être représentative de la granulométrie du milieu. Cependant l'échantillon ne doit pas excéder un certain volume, au risque de saturer les tamis et d'empêcher les particules de passer au travers des mailles.

Tout d'abord il convient de peser à vide les tamis et le récipient de récupération des sédiments. Le récipient de récupération est placé sur la balance, son poids est mesuré et noté. Le plus petit tamis (0.2mm) est ensuite empilé dessus et la masse des deux éléments cumulés est mesurée. L'action est répétée en empilant les tamis les uns sur les autres par ordre de taille croissant. A chaque ajout de tamis, la masse cumulée des éléments est relevée. A la fin de cette mesure les tamis sont donc tous empilés (Figure 13).



Figure 13 : Pesée des tamis

La mesure de l'échantillon peut alors commencer. Les sédiments sont placés dans le tamis le plus haut de la pile. Il convient ensuite de secouer doucement la pile de tamis pour que les sédiments les plus fins tombent dans les tamis situés au-dessous de la pile. La masse totale (tamis + sédiments) est relevée. Le tamis ayant la plus grande taille est ensuite retiré de la pile et la masse totale de ce qu'il reste est de nouveau mesurée. Les tamis et les sédiments bloqués dedans sont retirés un par un de la structure, par ordre de taille décroissant. A chaque suppression d'un tamis, la masse est relevée. Afin que les sédiments ayant une petite taille parviennent aux tamis les plus bas, il convient de secouer la pile avant chaque nouvelle mesure.

Saisie des données

Les données sont saisies de la même manière que celles obtenues avec la méthode Wolman. Une courbe granulométrique et les valeurs de D50 et D84 sont également déterminées.

3.6. Limites des protocoles de mesure

Profils en travers

- L'utilisation de la mire télescopique pour mesurer les fosses d'affouillement supérieure à 1.40m n'a pas été adoptée dès le début de la phase de terrain. Les profondeurs de certaines fosses supérieures à 1.40m ont donc été approximées.
- Certaines fosses trop profondes n'étaient pas accessibles sans risquer de submerger les Weders. Elles n'ont donc pas été prises en compte dans cette étude.

Détermination de la texture de berge

- Cette mesure est très dépendante de la personne la réalisant. En effet, la terre nécessite d'être humidifiée avant la formation du boudin. Or le taux d'humidification influence de manière importante le résultat final.

Granulométrie

- Commun aux 3 méthodes : il est difficile de prélever un échantillon de sédiments représentatif de manière précise de la répartition granulométrique du lit du cours d'eau.
- Wolman : lors du prélèvement, le choix des particules reste subjectif.
Méthode par tamisage : secouer la pile de tamis à la main reste limité et certains sédiments de petites tailles ne parviennent pas à passer dans les mailles. Pour améliorer la méthode, il aurait été possible d'utiliser le tamisage par vibration. Cette technique reprend exactement les mêmes étapes que le tamisage manuel mais les tamis sont secoués par vibration grâce à une machine, pendant un temps déterminé.
Utilisation de l'outil Granulo Toolbox : les conditions de prise de photos sont contraignantes car le terrain nécessite d'être assez plat, de ne pas présenter des zones de contraste lumineux trop importantes. Les sédiments ne doivent donc pas être mouillés.

4. Traitement des données

Les mesures sur le terrain et la saisie des données ont occupé une place très majoritaire pendant les 3 mois de stage. Le traitement des données a pu être abordé mais il ne représente que quelques jours de travail. Cette partie du rapport ne rentrera donc pas dans les détails des calculs mathématiques nécessaires au traitement des données. Elle s'attachera plutôt à essayer de prendre du recul sur les missions réalisées pendant le stage, en donnant une vision de l'utilisation future des données collectées sur le terrain.

4.1. Définition de la hauteur d'affouillement

Ce travail se concentre sur la comparaison des hauteurs d'affouillement en méandre, calculées sur le terrain, avec celles calculées via les formules théoriques. Dans un premier temps, il est donc important d'introduire la notion de hauteur d'affouillement (h_{aff}). Cette dernière correspond à la hauteur de sédiments érodés, par rapport à une hauteur moyenne de référence du lit (h_{moy}). La hauteur d'affouillement est déterminée en méandre et la hauteur moyenne est obtenue sur une section trapézoïdale homogène, située à l'amont de la zone en méandre (Figure 14).

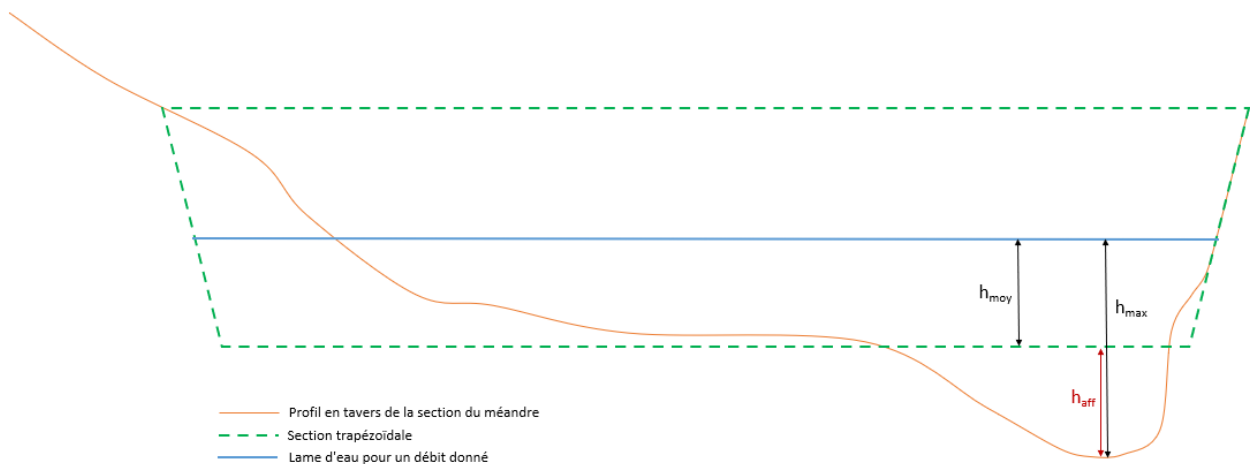


Figure 14 : Illustration schématique des grandeurs h_{aff} , h_{moy} et h_{max}

La hauteur d'affouillement est obtenue à partir la formule suivante :

$$h_{aff} = h_{max} - h_{moy}$$

avec : h_{aff} : hauteur d'affouillement en méandre (m)
 h_{max} : hauteur maximale, correspondant au point le plus profond en méandre (m)
 h_{moy} : hauteur moyenne de la lame d'eau pour un débit donné

La valeur de h_{moy} est calculée grâce au profil en travers de la section amont. Une interpolation linéaire est d'abord réalisée entre les points de mesures relevés sur le terrain. Cette étape permet d'obtenir les hauteurs d'eau tous les 1cm sur l'ensemble du profil. Une moyenne de ces hauteurs d'eau est ensuite faite pour obtenir h_{moy} .

4.2. Formules mathématiques du calcul de l'affouillement

Il existe actuellement 12 formules traitant spécifiquement de l'érosion en méandre dans la revue de littérature scientifiques. Dans le cadre du travail de thèse de Natacha, l'ensemble de ces formules est étudié. Un tableau de synthèse des formules, présentant leurs conditions de détermination, leurs limites et leur domaine de validité est disponible en Annexe 5. Il a été réalisé par Natacha Fructus pendant son stage de fin d'études.

Ces formules ont toutes été pensées pour le dimensionnement d'ouvrage en génie civil. C'est pourquoi leur application aux ouvrages en génie végétal pose question. De plus l'application de chaque formule est restreinte à un champ précis et à des conditions données. En effet, ces formules ont été construites à partir d'expérimentations faites sur des cours d'eau présentant des caractéristiques spécifiques. Le domaine d'application des formules est donc restreint aux cours

d'eau présentant globalement les mêmes caractéristiques hydromorphologiques que ceux ayant été choisi pour les tests expérimentaux.

4.3. Application des formules et premiers résultats

Une première application des formules a été faite sur 6 méandres mesurés sur l'Herbasse. Ce travail s'est appuyé sur les fichiers de calculs produits par Natacha Fructus, lors de son stage de fin d'études.

4.3.1. Calcul de l'affouillement mesuré sur le terrain

La hauteur d'affouillement relevée sur le terrain ($h_{\text{aff},T}$) et la hauteur moyenne de fond du lit ($h_{\text{moy},T}$) sont déterminées à partir d'un code python. $h_{\text{moy},T}$ est obtenue en interpolant les hauteurs d'eau par rapport à la ligne d'eau observée sur le terrain le jour des mesures.

4.3.2. Calcul de l'affouillement à partir des formules mathématiques

L'affouillement mesuré par formules mathématiques est calculé pour une crue biennale (de période de retour égale à deux ans) de débit Q_2 , car il s'agit des premières crues morphogènes.

Récupération des données sur BedloadWeb

Les informations récupérées via l'outil en ligne BedloadWeb sont nécessaires à l'application des formules mathématiques. Elles sont déterminées pour un débit Q_2 et concernent la section mesurée en amont de la zone d'affouillement. Les débits de crue Q_2 sont récupérés sur la base de données « SHYREG-débit ».

Après saisie des données, les caractéristiques suivantes sont calculées automatiquement (Figure 15) et peuvent être récupérées :

- $H_{\text{max,amont}}$ (m) : hauteur maximale du fond du lit sur la section amont, pour une crue biennale
- A (m^2) : aire de la section mouillée
- P (m) : périmètre mouillé
- W (m) : largeur au miroir

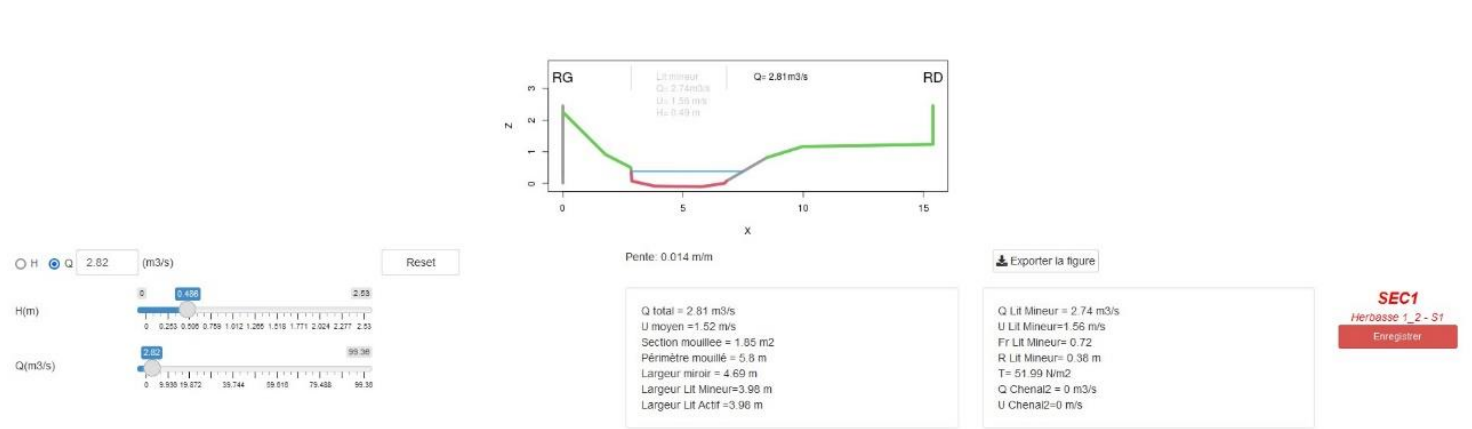


Figure 15 : Interface Hydraulique BedloadWeb, après saisie du profil topographique amont, de la granulométrie et de la caractérisation des berges – Herbasse (section amont des méandres 1 et 2)

Détermination de $h_{moy,Q2}$

La détermination de la hauteur moyenne de fond pour une crue Q_2 ($h_{moy,Q2}$) est générée avec le même code python que pour la détermination de $h_{moy,T}$. Il est nécessaire de fixer le niveau de la ligne d'eau observable pour une crue Q_2 , afin de réaliser l'interpolation. Cette hauteur étant inconnue, elle est déterminée via BedloadWeb et correspond à la valeur de $H_{max, amont}$.

4.3.3. Résultats obtenus

Le tableau 3 présente, pour chaque méandre, les valeurs de $h_{aff,T}$ ainsi que l'écart relatif entre $h_{aff,T}$ et $h_{aff,Q2}$ pour chaque formule. Les cellules sont colorées en fonction de la valeur de l'écart relatif :

- Vert : écart relatif $\leq 10\%$
- Jaune : $10\% < \text{écart relatif} \leq 20\%$
- Rouge : écart relatif $> 20\%$
- / : la formule n'est pas valide pour le méandre concerné

Tableau 3 : Synthèse des profondeurs d'affouillement $h_{aff,T}$ et de l'écart relatif entre $h_{aff,T}$ et $h_{aff,Q2}$ pour les méandres 1, 2, 3, 5, 6 et 7 de l'Herbasse

N° Méandre	N° Secteur	$h_{aff,T}$ (m)	Ecart relatif entre $h_{aff,Q2}$ et $h_{aff,T}$ pour chaque formule						
			SOGREAH	Blanchet&Morin	Degoutte	Thorne 2.07	Thorne 1.07	Safe Design-Soar&Thorne	Blodgett
1	1	1,03	3%	28%	82%	53%	52%	12%	47%
2	1	0,66	70%	12%	74%	23%	6%	64%	17%
3	1	0,54	50%	6%	0%	26%	44%	19%	2%
5	2	0,47	217%	30%	11%	/	/	123%	17%
6	2	0,28	443%	93%	196%	/	/	275%	96%
7	2	0,50	194%	8%	72%	/	/	110%	10%

Il est difficile de faire ressortir une tendance au vu de la taille très réduite de l'échantillon. Il est tout de même possible de remarquer que, pour cet échantillon, la formule donnée par Blodgett semble être la plus valide. En effet, sur les 6 hauteurs d'affouillement calculées avec cette formule, 4 présentent un écart relatif strictement inférieur à 20 %. Au contraire, celles de SOGREAH et de Soar&Thorne semblent surestimer de manière importante les profondeurs d'affouillement.

4.4. Limites du protocole

La détermination de $h_{aff,T}$ présente certaines limites. En effet, cette étude se concentre sur les fosses d'affouillement engendrées par des crues Q_2 . Or, lors d'une crue, la profondeur d'affouillement maximale est observable au moment du pic de crue. Lors de la décrue, les vitesses de courant diminuent et les particules les plus lourdes en suspension dans l'eau se déposent sur le fond du lit. Une partie de la fosse est ainsi rebouchée. De plus, plus le temps passe entre le moment de la crue et le moment des mesures, plus la fausse d'affouillement risque d'avoir été en partie comblée. Les profondeurs des fausses d'affouillement relevées sur le terrain ne sont donc pas entièrement fidèles aux réelles profondeurs, atteintes pour un débit Q_2 .

L'utilisation d'une chaîne d'érosion permettrait d'améliorer la précision des mesures. Ce système consiste à mettre en place une chaîne métallique, descendant sur plusieurs mètres de profondeurs dans le plancher alluvial. Cet outil permet de rendre compte des phénomènes d'érosion et de dépôt. La couche de sédiments ayant été redéposée dans la fosse lors de la décrue serait ainsi mesurable. Ce système reste cependant compliqué à mettre en place dans cette étude étant donné le nombre important de sites de mesures.

5. Apports et réflexions personnelles liées à la réalisation de ce stage

Au cours des nombreuses sorties sur le terrain, j'ai eu la chance d'observer différents travaux de restauration de milieux aquatiques et d'échanger avec des acteurs·trices territoriaux·ales, travaillant notamment en syndicat de rivière. J'ai également eu l'occasion de beaucoup discuter avec ma tutrice de stage, Natacha Fructus, ainsi qu'avec toutes les personnes nous ayant accompagnées sur le terrain. Ces rencontres ont éveillé en moi un questionnement quant à la manière dont nous intervenons sur les cours d'eau.

5.1. Adoucir les techniques de restauration des cours d'eau

Restauration/réhabilitation hydromorphologique de l'Herbasse à Valherbasse

Le projet de restauration/réhabilitation de l'Herbasse, affluent de l'Isère a été porté par le Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Bassin de l'Herbasse (SIABH). Ce projet, datant de 2021, a conduit à l'arasement de deux seuils, présentant un obstacle à la continuité écologique. Il a également permis le remodelage du lit mineur pour retrouver une partie de son tracé d'origine et la reconstitution d'un matelas alluvial pour le cours d'eau. En effet, les multiples travaux de recalibrage menés sur l'Herbasse ont entraîné son incision sur plusieurs mètres par endroits (Figure 16). Lors des mesures prises sur l'Herbasse, il a effectivement été remarqué une nette différence d'incision entre la partie non restaurée, à l'amont, et la partie sur laquelle les travaux ont été effectués (Figure 17), située plus à l'aval. Ces travaux ont donc permis au linéaire restauré de retrouver des caractéristiques physiques favorables au développement des espèces animales et végétales. Ils ont également participé à stopper le phénomène d'incision du lit dans ce secteur.

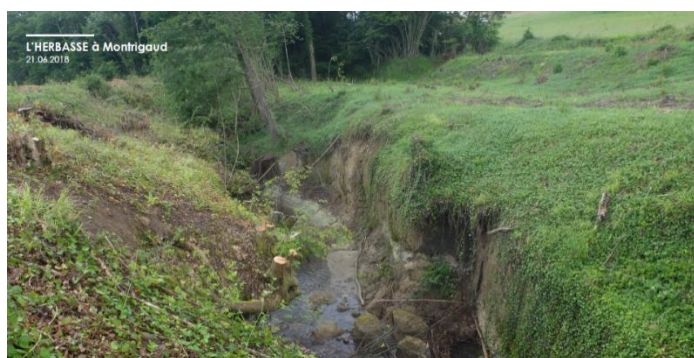


Figure 16 : Incision du lit sur l'Herbasse avant travaux (BIOTEC, 2024)



Figure 17 : Une partie du linéaire de l'Herbasse restaurée, après travaux (BIOTEC, 2024)

Cependant, je pense que certains points peuvent être questionnés quant à la réalisation de ces travaux. En effet, il a été nécessaire, notamment pour le remodelage du profil en long, d'importer sur le site plusieurs milliers de mètres cubes de matériaux et de réaliser un terrassement en déblai/remblai du terrain. Ce projet a donc exigé l'intervention de machines et d'engins fonctionnant grâce au pétrole et pouvant directement impacter le milieu lors des travaux. Bien que le projet, à posteriori, ait une réelle plus-value environnementale pour le site, il me semble important de se demander si cela justifie l'utilisation massive de ces engins polluants. La réalisation de certains travaux ne va-t-elle pas à l'encontre du but final des projets de restauration ? Les objectifs principaux étant de retrouver des écosystèmes fonctionnels, dépollués et pérennes.

Les barrages castor : une technique low-tech pour la restauration des cours d'eau

Cette réflexion sur la manière dont sont réalisés les travaux de restauration de cours d'eau a été encouragée par une intervention à laquelle j'ai eu l'opportunité de participer. Durant ma première semaine de stage, j'ai réalisé une visite de terrain organisée par l'Association Rivière Rhône-Alpes Auvergne (ARRA). Cette visite portait sur les techniques low-tech de régénération douce des cours d'eau, basées sur les techniques « castor ». L'intervention a eu lieu sur la Lierne, dans la Drôme, site pilote sur lequel plusieurs ouvrages « castor » ont été mis en place. La visite a été animée par Cédric Cadet et Baptiste Morizot, tous deux à l'origine de ce projet. Cédric Cadet est chef de projet GEMAPI chez Valence Romans Agglo et Baptiste Morizot est philosophe et maître de conférences à l'université d'Aix-Marseille. Ces travaux portent notamment sur les relations et interactions entre les humains et la nature et s'intéressent particulièrement au rôle des castors dans la dynamique des cours d'eau. Il s'est formé sur ce sujet aux Etats-Unis, où les ouvrages de type « castor » ont vu le jour, notamment avec les travaux du chercheur Joe Wheaton. Ces ouvrages permettent une diversification et une redynamisation des cours d'eau. Sur la Lierne, la mise en place de plusieurs ouvrages (Figure 18) a permis de diversifier les écoulements et de redonner de la place au cours d'eau. En effet, l'ouvrage induit un ralentissement des écoulements en amont. La rivière a alors tendance à s'étaler latéralement. Ce ralentissement induit à lui seule une diversification des écoulements, il permet une réactivation des processions d'érosion latérale et permet également la reconnexion du cours d'eau avec ses bras secondaires (Figure 19 et 20). Une diversité d'habitats est donc également recréée. De plus, le cours d'eau de la Lierne étant également très incisé, les ouvrages visent à rehausser le fond du lit en favorisant le dépôt de sédiments par ralentissement des vitesses d'écoulement. Enfin l'un des objectifs de ces travaux est de favoriser la réintroduction des castors, présents depuis des milliers d'année en Europe mais dont la population a fortement déclinée notamment à cause de la chasse.



Figure 18 : Ouvrage castor situé le plus en aval sur la Lierne



Figure 19 : Bras secondaire reconnecté au chenal principal grâce à l'ouvrage castor



Figure 20 : Second ouvrage, situé plus en amont sur la Lierne

L'utilisation de ces techniques low-tech fait face à différents enjeux. Tout d'abord, cette technique de restauration est décarbonée. Les ouvrages sont construits à la main, en utilisant des matériaux exclusivement naturels et locaux. Ils sont façonnés en reproduisant les techniques de construction naturelles des castors (Figure 21). De plus, ces ouvrages ont un caractère réversible et éphémère. Ils sont voués à se transformer voire à disparaître en fonction des processus à l'œuvre dans le cours d'eau. Ce sont donc des constructions mises en place pour accompagner la rivière dans un processus de restauration. Il ne s'agit pas de contraindre le cours d'eau. J'ai trouvé cette vision philosophique, portée par Baptiste Morizot et partagé par Cédric Cadet, très intéressante et novatrice.



Figure 21: Ouvrage castor naturel sur la Drôme amont

Bien entendu, les ouvrages de type « castor » ne peuvent pas être mis en place sur tous les cours d'eau. Le premier enjeu étant de redonner de la place au cours d'eau, ces ouvrages ne peuvent être installés qu'à des endroits où aucun enjeu foncier ni de terres agricoles n'est présent en bordure de rivière. De plus il est préférable que le cours d'eau présente d'anciens bras secondaires qui pourront ainsi être réempruntés suite à la mise en place de l'ouvrage. Ces ouvrages ne sont donc pas une solution à tous les problèmes causés par les activités anthropiques sur les rivières. Comme avant chaque intervention sur un écosystème, il est important de dresser un diagnostic précis des dysfonctionnements et enjeux du terrain afin d'y répondre convenablement. De plus la réintroduction du castor n'est pas une entreprise simple puisqu'elle oblige les humains à réapprendre à cohabiter avec lui. La mise en place des ouvrages soulève aussi un questionnement sur la possible entrave à la continuité écologique et sédimentaire qu'ils peuvent entraîner.

Je trouve néanmoins l'intégration des techniques douces dans la restauration des cours d'eau très intéressante et essentielle. Ces techniques low-tech permettent de corriger certains dysfonctionnements liés à d'anciennes interventions humaines, en mettant en place des ouvrages décarbonés et peu coûteux. Les travaux n'entraînent aucune pollution et la phase de construction des ouvrages induit une très faible perturbation sur le milieu. De plus, je pense vraiment qu'il est intéressant d'intégrer une dimension philosophique à la réflexion scientifique. En tant que future ingénieure dans le domaine de l'environnement, je pense que cela permet d'observer le vivant sous un angle différent.

5.2. Projection pour le stage de fin d'étude et dans un futur métier

Ce stage de 13 semaines m'a permis de m'ouvrir au domaine de la recherche dont je connaissais très peu de choses et dans lequel je ne m'étais jamais projetée. Il m'a également permis de découvrir la structure INRAE, plus particulièrement l'unité de recherche du LESSEM dans laquelle j'ai pu évoluer dans un environnement très chaleureux et bienveillant. Lors de ce stage, j'ai eu la chance de rencontrer des doctorants-es, des chercheurs-euses mais également des ingénieurs-es de recherche. Le caractère très libre et indépendant de la recherche m'a beaucoup plu. Cependant, à travers mes échanges, il m'est apparu que la recherche est un domaine professionnel dans lequel obtenir un contrat en CDI semble assez compliqué, les postes de chercheurs-euses étant très peu nombreux. Me projeter dans la réalisation d'une thèse sachant que je n'obtiendrai probablement pas de poste fixe avant plusieurs années n'est donc

pas quelque chose que j'envisage. De plus, bien que l'apport de nouvelles connaissances à la communauté scientifiques me semble essentiel, je trouve le métier de chercheur-euse un peu trop éloigné des travaux réalisés concrètement sur le terrain.

En effet, lors de visites de terrain, j'ai également eu l'occasion de rencontrer des acteurs-trices du territoire, appartenant à des syndicats de rivières. J'ai alors pris conscience que travailler en collectivité offre la possibilité de réaliser de vrais changements et améliorations dans la gestion des cours d'eau et zones humides sur un territoire. Pour cela, il est nécessaire de travailler en concertation avec les acteurs-trices locaux-ales ainsi qu'avec les élus-es et de leur faire accepter les projets de restauration/renaturation. Cela implique donc un engagement politique très important. J'ai donc également réalisé que le travail en collectivité semble nécessiter beaucoup d'énergie et d'investissement personnel. De plus, être impliqué-e dans les politiques locales oblige également de faire des compromis, en acceptant parfois de faire certaines choses qui semblent contraire à notre morale et à ce qui serait le mieux pour le milieu naturel. Je souhaite faire un métier qui ait du sens pour moi, c'est pourquoi j'ai choisi de m'orienter vers le domaine environnemental. Je pense que travailler en syndicat de rivière est une chance de pouvoir insuffler de réels changements au sein d'un territoire. Cependant il m'apparaît également que c'est un métier très prenant, dans lequel il n'est peut-être pas toujours simple de trouver un équilibre entre épanouissement professionnel et personnel. Bien que je souhaite être investie dans mon futur métier, je souhaite également pouvoir m'épanouir dans des projets personnels en dehors de mon secteur d'activité. Afin de répondre à tous ces questionnements concernant le travail en collectivité, je souhaite donc m'orienter vers un syndicat de rivière pour réaliser mon stage de fin d'études à venir.

Conclusion

Le travail réalisé sur ces 13 semaines de stage a permis de collecter, trier et saisir les données de 94 sites en méandre. Ces données sont nécessaires à la détermination des facteurs influençant les phénomènes d'affouillement en méandre et à la comparaison des profondeurs d'affouillement obtenues par formules mathématiques, avec celles observées sur le terrain. La saisie des données a ainsi permis d'obtenir les valeurs des grandeurs (D_{50} , pente, etc.) indispensables pour l'application des formules. Un premier traitement des données sur une partie de l'échantillon a permis de débiter la comparaison de l'affouillement mesuré sur le terrain avec celui calculé par les formules. Cette comparaison n'a donné lieu à aucune conclusion pour le moment. Le traitement des données sera continué pendant les 2 semaines de stage restantes et pendant la suite du projet de thèse de Natacha.

Ce stage a été très enrichissant d'un point de vue professionnel et personnel. Etant incertaine quant au métier que je souhaite exercer plus tard, les rencontres que j'ai pu faire durant ces 3 mois m'ont en partie éclairée. Trouver un équilibre dans un monde enclin à de constantes contradictions me paraît être une mission terriblement dure à remplir. Mais je crois que nous avons tous-tes besoin de gens acceptant de relever ce défi. Et si nous, humains-es sensibilisés-ées sur ces sujets et désireux-euses de changer les choses, ne le faisons pas, qui le fera ?

Bibliographie

Adam, P. (2008). *Le génie végétal : un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques*. La Documentation Française.

Bernard, J. M., Fripp, J., Robinson, K. (2007). *Stream restoration design : Part 654, National Engineering Handbook. Technical Supplement 14B – Scour Calculations* <https://irrigationtoolbox.com/NEH/Part%20654/TECHNICAL-SUPPLEMENTS/TS14B.pdf>

BIOTEC. (2024) *Restauration morpho-écologique des cours d'eau et milieux humides au moyen de pratiques issues du génie végétal/génie écologique*

Cavaillé, P., Ducasse, L., Breton, V., Dommange, F., Tabacchi, E., & Evette, A. (2015). Functional and taxonomic plant diversity for riverbank protection works : Bioengineering techniques close to natural banks and beyond hard engineering. *Journal Of Environmental Management*, 151, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.028>

Evette, A., Labonne, S., Rey, F., Liebault, F., Jancke, O., & Girel, J. (2009). History of Bioengineering Techniques for Erosion Control in Rivers in Western Europe. *Environmental Management*, 43(6), 972-984. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9275-y>

Florsheim, J. L., Mount, J. F., & Chin, A. (2008). Bank Erosion as a Desirable Attribute of Rivers. *BioScience*, 58(6), 519-529. <https://doi.org/10.1641/b580608>

Frossard, P., Evette, A. (2009). Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : une tradition millénaire en constante évolution. *Sciences Eaux & Territoires*, (Spécial Ingénieries-EAT-29), 99–109. <https://revue-set.fr/article/view/6322>

ISARA Lyon. (2016). *Test Bêche Guide d'utilisation* https://orgprints.org/id/eprint/32099/1/peigne-et-al-2016-GuideTestBeche-ISARA_Lyon.pdf

Leblois, S., Evette, A., Jaymond, D., Piton, G., Recking, A. (2022). Processus et causes de défaillance du génie végétal pour la stabilisation des berges de rivière : retour d'expérience sur un large jeu de données issues de la BD GeniVeg. *Géomorphologie Relief Processus Environnement*, vol.28 – n° 2. <http://dx.doi.org/10.4000/geomorphologie.16954>

Leblois, S., Evette, A., Recking, A., & Recking, A. (2016). Amélioration des méthodes de dimensionnement des ouvrages de génie végétal en berges de cours d'eau par une approche empirique. *DOAJ (DOAJ : Directory Of Open Access Journals)*. <https://doaj.org/article/a1ae4747773946ac853046afb8a1661f>

Lefort, P. (2018). *Morphodynamique fluviale : Approches théorique et expérimentale*.

Peeters, A., Verniers, G., Houbrechts, G., Hallot, E., & Petit, F. (2020). Protections de berges en génie végétal : Conception, application, suivi et recommandations. *ResearchGate*. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/248736>

Recking, A. (2017) *ELEMENTS DE GEOMORPHOLOGIE FLUVIALE. Cahier 2: La granulométrie des cours d'eau (et sa mesure)* <https://www.bedloadweb.com/Granulometrie.pdf>

Annexes

Annexe 1 : Fiche terrain – Recto pour le relevé de la section en méandre et son dessin – Verso pour le relevé de la section amont, de la pente et pour d'éventuelles remarques

Profil en travers

Date : / /

Section du méandre

Extrados en RD ou RG ?

Point n°	Distance (HD)	Hauteur (VD)	Notes
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

Méandre n° :

Secteur n° :

Nom du cours d'eau :

Dessin de la section du méandre :

Section régulière en amont

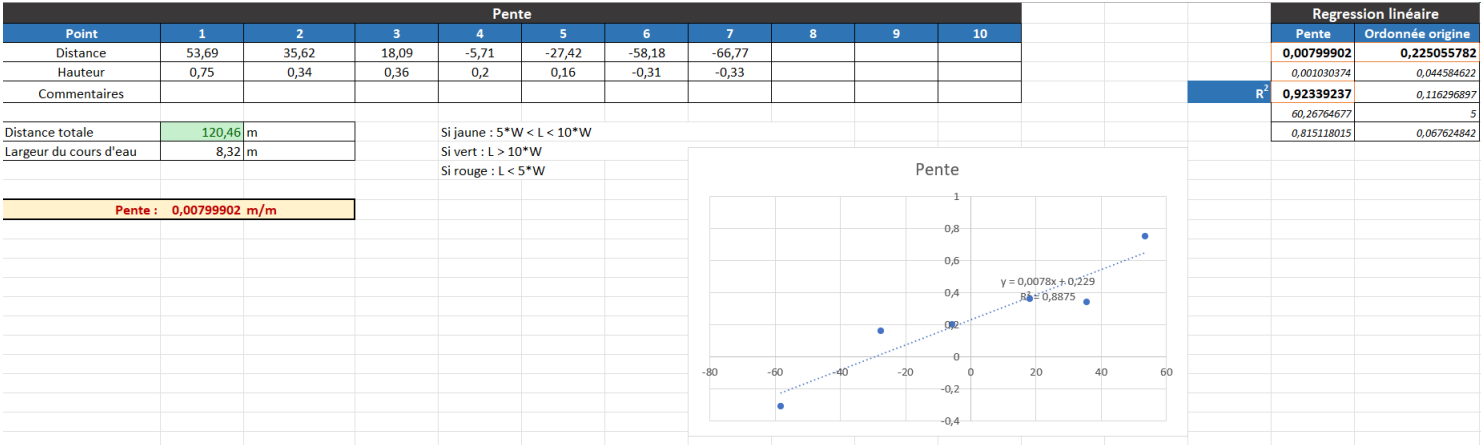
(RG à privilégier)

Point n°	Distance (HD)	Hauteur (VD)	Notes
1			RG ou RD ?
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

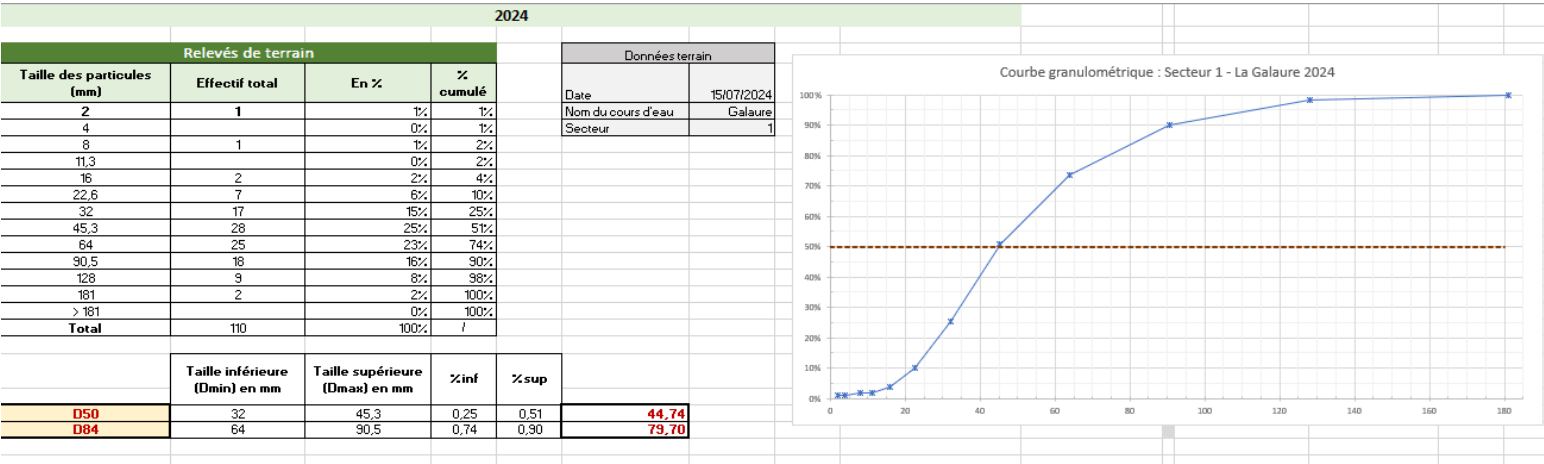
Autres remarques :

Point n° ↓	Distance (HD)	Hauteur (VD)	Notes
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Annexe 2 : Capture d'écran de la feuille Excel pour le calcul de la pente – La Varèze Méandre 25



Annexe 3 : Capture d'écran de la feuille Excel pour le calcul du D50 et D84 –La Galaure Secteur 1





Rapport de mesure – Granulo Toolbox



ID d'échantillonnage

Code échantillon: VAR_53_S2

Nom du projet : Granulo Varèze S2

ID cours d'eau : la Varèze_06C0000002000803553

Date : 2024:06:06 10:56:45

Carte

Module carto en cours de développement,
insérer ici votre carte

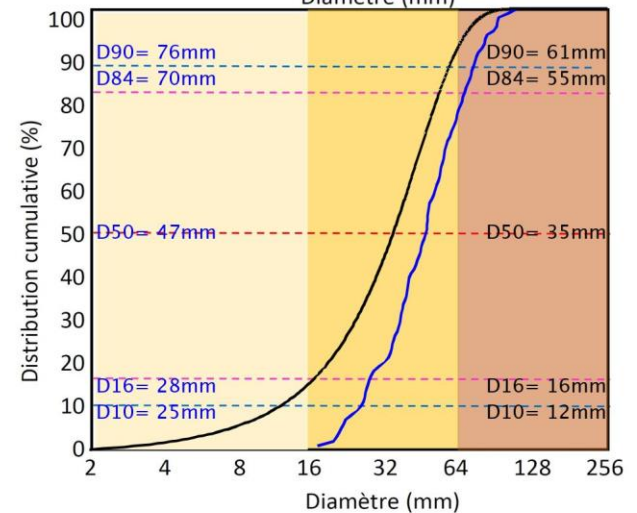
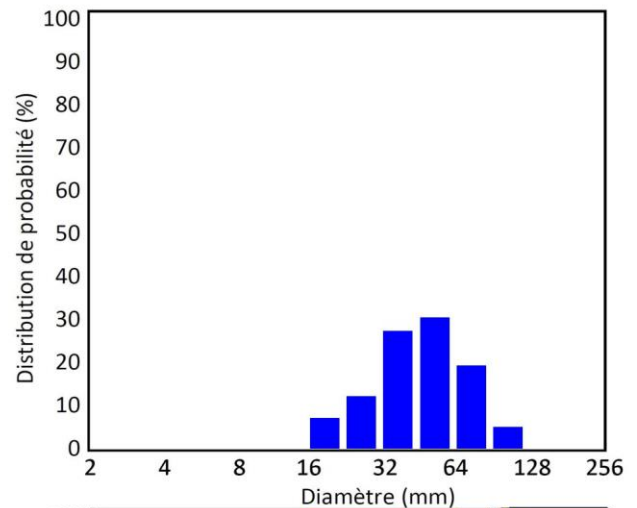
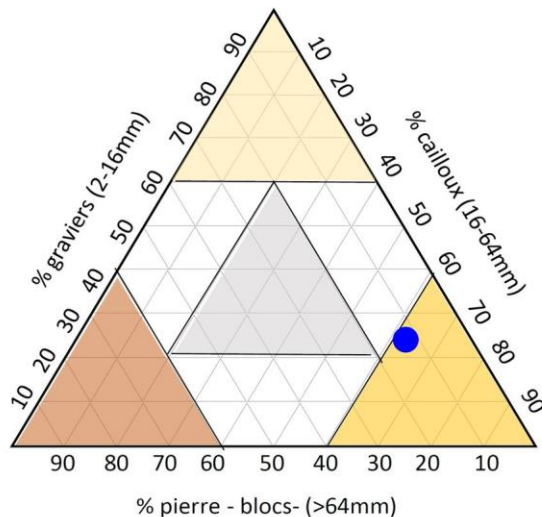
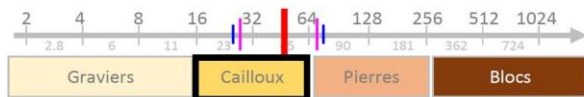
Résultats

N = 129

Valeurs caractéristiques :

 $D_{50} = 47\text{mm}$ $D_{\max} = 123\text{mm}$ $D_{90} = 76\text{mm}$ $D_{84} = 70\text{mm}$ $D_{16} = 28\text{mm}$ $D_{10} = 25\text{mm}$

Folk & Ward = -1



Métadonnées

Organisme :	Style fluvial :	Appareil photo :	Longitude :	4.8866
INRAE_4	Artificiel	Apple iPhone 13 mini	Latitude :	45.4179
Commentaires :				

Annexe 5 : Tableau de synthèse des formules d'affouillement

Synthèse des limites et des spécificités des formules d'affouillements en méandre						
Nom (Date)	Type d'expérimentation	Type de lit et/ou D ₅₀	Type de pente	Condition sur R _c /W et W/h _{mean}	Commentaires et autres informations utiles	Sources
Lacey (1930)¹	Théorie du régime établie pour définir les caractéristiques de canaux d'irrigation Indiens et basée sur des centaines d'observations de terrain sur des canaux stables (sans élargissement, rétrécissement, singularité ni sinuosité) et plutôt rectilignes.	Limon et sables fins : 0,1mm < d50 < 0,6mm	Faibles pentes : "fond plat"	/	- S'applique aux lits stables et morphologiquement "normaux" c'est à dire des lits où la pente et les dimensions des sédiments sont dépendants l'un de l'autre. - Hypothèse de régime permanent - L'équation prédit la même profondeur d'affouillement quel que soit la largeur du lit.	(NRCS 654 - Technical Supplement 14B 2007) (Ramette & Roult, 1989) (Richards, 2018)
Blench (1969)¹	Retravaillée à partir de Lacey (1930)				- S'applique aux lits stables et morphologiquement "normaux" c'est à dire des lits où la pente et les dimensions des sédiments sont dépendants l'un de l'autre. - Hypothèse de régime permanent	(NRCS 654 - Technical Supplement 14B 2007) (Ramette & Roult, 1989) (Richards, 2018)
Ramette (1989)²	Inspirée de 2 formules : - Lacey (1930 et 1947) et sa théorie du régime. - Izzard et Bradley, établie à partir d'essais sur modèle réduit et vérifiée pour quelques points dans la nature.	Limon, sables fins et grossiers (<5mm)	Faibles pentes : "fond plat"		- Formules réductrices qui sous-entendent beaucoup de simplifications : outil de vérification qui permet d'obtenir des ordres de grandeurs mais ne doit pas servir directement au dimensionnement. - Relation d'Izzard et Bradley : bons résultats pour sédiments > 1,5 mm (si < il faudrait majorer les profondeurs de 15 à 20%). La formule de Ramette semble mieux décrire les résultats pour les sédiments fins. - Relation de Lacey : mêmes limites qu'au-dessus.	(Ramette & Roult, 1989) (Adam et al., 2008) (Bonin et al., 2013) (Nicollet, 1982)
SOGREAH (1969)	Objectif : généralisation des résultats d'études locales effectuées sur l'Arc suite à la crue de 1957.	Entre 0,75 et 4mm (sur modèle réduit)	Rivières torrentielles : pentes fortes entre 0,25 et 2% (Domaine de validité : 0,1 à 2,5%)	/	- Pas de tests pour faibles pentes et lit limons/sables - Berges modélisées : équidistantes et de même nature - Formule établie pour des pentes verticales. Si pente à 2/3 (V/H), alors la profondeur doit être multipliée par 2/3. - Les graphiques de Blanchet & Morin ne sont pas facile à interpoler, d'où l'établissement de cette équation commune à tous les coudes. Les coudes sont caractérisés par l'angle d'incidence $\beta = 1 - W/R_c$.	(Morin & Favant, 1975) (Lefort, 2018)
Blanchet & Morin (1971)		Galets et graviers			- Pas de tests pour faibles pentes et lit limons/sables - Berges modélisées : équidistantes et de même nature - Les essais sur berges verticales sont suffisamment nombreux pour déterminer les profondeurs d'affouillements correspondant à une sécurité totale ou moyenne. Ceux sur perrés inclinés permettent de déterminer les profondeurs pour une sécurité moyenne.	(Morin & Favant, 1975) (Blanchet & Morin, 1990)
Degoutte (2006)		Sables ³ et graviers			- Pas de tests pour faibles pentes et lit limons/sables - Berges modélisées : équidistantes et de même nature - Formule établie pour une pente de berge de 2/3 et hypothèse : $h_{mean} < 6'h_e$. Si la pente de berge vaut 1/2 (V/H), les valeurs d'affouillement sont à multiplier par 0,9. Si 1/1 à multiplier par 1,1. - Interpolation comme Blanchet & Morin mais avec une autre méthode : équations et critères sur les angles et le rayons de courbure plutôt que méthode graphique.	(Morin & Favant, 1975) (Degoutte, 2006)

Nom (Date)	Type d'expérimentation	Type de lit et/ou D ₅₀	Type de pente	Condition sur R _c /W et W/h _{mean}	Commentaires et autres informations utiles	Sources
Thorne 2.07 (1993)	Déterminée à partir de plusieurs bases de données : - De 1989 à 1992 : série de mesures effectuée sur la "Red river" (US). - Vérification d'une bonne corrélation sur un échantillon de 256 méandres provenant de relevés de plusieurs chercheurs sur différents types de rivières ou canaux en laboratoire.	Sables et graviers	/4	R _c /W > 2	- Comparaison relation empirique et modèles analytiques « bend-flow » de Bridge (1982) et Odgaard (1989) : la relation empirique est plus fiable. La majeure partie des valeurs empiriques correspondent à +30% des valeurs observées réellement. - L'équation empirique tend à surestimer la profondeur d'affouillement ce qui apporte une sécurité au dimensionnement.	(Thorne et al., 1997) (Soar & Thorne, 2001) (Martin, 2015) (Lefort, 2018)
Maynard (1996)	Développée à partir de mesures sur 215 méandres à lits sableux. La base de données correspond à celle de Thorne en ajoutant 39 observations de la "Lower Mississippi river" (US) et en enlevant les mesures de laboratoire.	Sables (Peut aussi servir en comparaison avec d'autres méthodes pour les lits plus grossiers)		1,5 > R _c /W > 10 (utiliser R _c /W = 1,5 si > 1,5) 20 > W/h _{mean} > 125 (utiliser W/h _{mean} = 20 si < 20)	- Utilisation non recommandée pour des événements de crues trop importants : vérifier que h _{max} ≤ 1,2 h _{mean} (non applicable à des événements de période de retour supérieure à 5ans). - Tendance à sous-estimer les profondeurs d'affouillements pour les grands rayons de courbure. - Un facteur de sécurité de 1,08 est conseillé	(Soar & Thorne, 2001) (Washington State Aquatic Habitat Guidelines Program & NRCS, 2002) (NRCS 654 - Technical Supplement 14B 2007) (Martin, 2015) (Lefort, 2018)
Thorne 1.07 (1997?)	Développée à partir d'expériences sur canaux et rivières larges	Sables et graviers (entre 0,3 et 63 mm)		2 < R _c /W < 22	- Relation empirique très proche de Thorne 2.07. Peu d'informations sur la façon dont elle a été établie. - Les profondeurs obtenues donnent des valeurs fiables à 25% près.	(Washington State Aquatic Habitat Guidelines Program & NRCS, 2002) (CRESS, n.l., s. d.)
Safe design: Soar & Thorne (2001)	Développée à partir des bases de données précédentes. Formule dite "safe design", établie pour dimensionner l'affouillement maximal en extrados de méandre avec une enveloppe de sécurité.	Sables et graviers		Si W/R _c > 0,56 alors h _{max} est indépendant de la courbure du méandre : utiliser h _{max} /h _{mean} = 4	- Cette relation établie pour des berges inclinées donne des profondeurs à peu près égales à celles mesurées en moyenne par SOGREAH pour les berges verticales. Or, plus la berge est verticale, plus les profondeurs sont importantes. Cela montre que cette formule donne une bonne enveloppe de sécurité.	(Soar & Thorne, 2001) (NRCS 654 - Technical Supplement 14B 2007) (Lefort, 2018)

Zeller (1981)	Volonté de développer une formule théorique qui serait valable sur des lits de sables pour une large gamme de géométrie et de courbure.	Sables	/	/	- Basée sur l'hypothèse d'un débit constant à travers le méandre.	(Simons, Li et al., 1985) (Martin, 2015)
Blodgett (1986)⁵	Permettent de calculer un affouillement moyen et un affouillement maximal qui donne une enveloppe de sécurité. Ces 2 formules ont été développées grâce à des mesures régulières de suivi sur 21 sites (US) présentant des caractéristiques granulométriques différentes.	Sables, galets et graviers	/	/	- Caractérise l'évolution de l'affouillement en fonction de la granulométrie du lit. Limite : ne prend que ce paramètre en compte. - A priori : seule formule établie grâce à des prises de mesures régulières sur une période donnée (plusieurs mois à plusieurs années) qui permettent de suivre l'évolution de la profondeur du lit et ainsi d'estimer l'affouillement grâce à ce suivi.	(Blodgett, 1986) (NRCS 654 - Technical Supplement 14B 2007)