
Rapport de stage individuel

5^{ème} année

Étude fluviale et modélisation sur le territoire d'Orléans Métropole

ACTIERRA TOURS
32 Rue Gutenberg, 37300 Joué-lès-Tours



Tuteur entreprise :
Élise FERLAY
Chargée d'études

Tuteur académique :
Pierre PEETERS

Cédric DEBRABANT
Étudiant
IMA
2023-2024

Table des matières

Table des matières	2
Remerciements	3
1. Introduction.....	4
2. Structure d'accueil.....	5
3. Présentation des missions	5
3.1 Mission principale - Étude de faisabilité de l'aménagement EGOUBerge.....	5
3.1.1 Contexte.....	5
3.1.2 Tâches réalisées.....	7
3.2 Autres missions réalisées	7
3.2.1 Modélisation de la Sainte-Eugénie et étude de changement d'un ouvrage de répartition sur la commune de Courcelles	7
3.2.2 Étude de faisabilité d'un projet de réutilisation d'eau pluviale sur le site de la gare de péage de Saint-Arnoult	8
3.2.3 Conduite de la première phase de la révision du PPRI de l'Ornel.	9
4. Méthodologie	9
4.1 Compréhension des documents et études.....	9
4.2 Méthode de modélisation utilisée : le logiciel HEC-Ras	10
4.3 Prise en main du modèle hydraulique de BRL	10
4.4 Modification du modèle hydraulique	12
4.4.1 Fabrication du nouveau modèle numérique de terrain (MNT)	12
4.4.2 Définition des limites de la zone d'étude.....	14
4.4.3 Intégration des nouveaux profils en travers	14
4.4.4 Modification des structures latérales	16
4.4.5 Modification du périmètre du maillage 2D	17
4.4.6 Visualisation du modèle modifié	17
4.5 Modélisation des crues de référence	18
4.6 Calcul des forces tractrices.....	18
4.6.1 Définition et formule	18
4.6.2 Tronçonnage de la zone d'étude	19
4.6.3 Calcul des forces tractrices	20
4.7 Visite de terrain	21
4.7.1 Objectifs et organisation de la visite	21
4.7.2 Observations et impacts sur le projet	21
5. Résultats.....	22
5.1 Résultats des modélisations.....	22
5.2 Calcul des forces tractrices.....	22
6. Analyse et discussion	23
6.1 Comparaison des résultats de modélisation avec les ceux de BRL	23
6.2 Faisabilité de l'aménagement EGOUBerge.....	24
6.3 Proposition d'aménagement.....	26
6.3.1 Choix de techniques d'aménagements.....	26
6.3.2 Préparation de coupes de principe.....	27
6.3.3 Chiffrage de l'aménagement	28
7. Réunion publique de présentation	29
Conclusion.....	30
Bibliographie	31
Annexes.....	32
Annexe 1 - Rapport de l'étude de faisabilité EGOUBerge.....	32
Annexe 2 – Coupe d'ouvrage n°1 – Aménagement mixte d'enrochements et de lit de branche à rejet.....	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 3 – Coupe d'ouvrage n°2 – Aménagement de gabions disposés sur un matelas RENO	36

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier ma tutrice de stage en entreprise Mme Élise Ferlay. Je lui suis très reconnaissant pour toutes les connaissances qu'elle m'a transmises, pour sa pédagogie, le temps qu'elle a consacré à me guider et à répondre à mes questions, ainsi que pour la confiance qu'elle m'a accordé sur la gestion des différents projets qu'elle a pu me confier.

Je souhaiterais également remercier les autres membres de l'équipe hydraulique de l'agence, Mme Lorène Diemer et Mr Gilles Gatimel, qui m'ont conseillé et épaulé et qui m'ont surtout transmis leur expertise dans les domaines de l'hydraulique.

Merci à Mr Sébastien Huard, chef du service hydraulique de Tours mais aussi directeur du pôle EAU d'Actierra, pour m'avoir conseillé et accompagné dans la réalisation des missions qui m'ont été données, et pour m'avoir permis de continuer auprès d'Actierra Tours en CDI à l'issue du stage.

Merci également à Mr Thibaut Cottancin et Mr Guillaume Raccasi, membres du pôle hydraulique de l'agence d'Aix-En-Provence, pour m'avoir partagé leurs connaissances, et pour le temps qu'ils ont consacré à répondre à mes questions, notamment en lien avec les modélisations hydrauliques et la proposition de scénarios d'aménagements.

Merci à l'ensemble de l'agence de Tours, qui m'a accueilli avec bienveillance et intégré au sein de l'équipe.

Merci à mon tuteur académique Mr Pierre Peeters, pour sa présence tout au long de mon stage et pour avoir toujours répondu rapidement à mes questions.

Enfin, merci à mes proches, qui m'ont sans cesse soutenu dans l'élaboration de mon projet professionnel.

1. Introduction

Mon stage au sein d'ACTIERRA Tours constitue la dernière étape de mon cursus d'ingénieur à POLYTECH Tours, et marque l'aboutissement de mon diplôme en ingénierie des milieux aquatiques. Le choix de ce stage découlait d'abord de ma volonté de développer mon projet professionnel en découvrant le fonctionnement d'un bureau d'étude. Intégrer ACTIERRA était donc une véritable opportunité pour moi de découvrir ce secteur au sein d'un groupe de renommée nationale et internationale.

Mes objectifs principaux pour la réalisation de ce stage étaient de développer plusieurs compétences :

- La modélisation hydraulique, avec notamment la prise en main de HEC-Ras, logiciel de modélisation hydraulique largement répandu.
- La rédaction de rapports professionnels, destinés aux clients des études menées.
- La participation à des études de terrain, en apprenant à les préparer pour les optimiser, à les mener de façon professionnelle (notamment si des rencontres avec les clients ou des acteurs de l'étude sont prévues), et apprendre à collecter et utiliser les données récupérées.
- La capacité de gestion de plusieurs études réalisées en simultanée, et de manière plus générale la façon de travailler spécifique des bureaux d'études.
- Le partage des données d'étude avec les autres collaborateurs, notamment par l'organisation précise des données, leur rangement au sein des serveurs collectifs, ou la maîtrise de plateformes de partage.

J'ai donc pu développer ces compétences au travers de plusieurs études sur lesquelles j'ai travaillé, et qui sont détaillées dans le présent rapport. Celles-ci concernent :

- La modélisation de l'Égoutier et l'étude de faisabilité de l'aménagement EGOUBerge (mission principale du stage), à Semoy sur le territoire d'Orléans Métropole (45400) ;
- La modélisation de la Sainte-Eugénie et l'étude de changement d'un ouvrage de répartition sur la commune de Courcelles (58210) ;
- L'étude de faisabilité d'un projet de réutilisation d'eau pluviale sur le site de la gare de péage de Saint-Arnoult (78730) ;
- La conduite de la première phase de la révision du PPRI (Plan de Prévention du Risque Inondation), de la rivière de l'Ornel (dans le 52).

Ce rapport détaillera la mission principale réalisée durant le stage - à savoir la modélisation de l'Égoutier et l'étude de faisabilité de l'aménagement EGOUBerge - ainsi que les compétences acquises et les défis rencontrés. Les trois autres études sur lesquelles j'ai pu travailler seront également présentées brièvement. Enfin, le rapport offrira une réflexion sur les apports de ce stage dans la construction de mon projet professionnel et sur les perspectives dans le domaine de l'ingénierie des milieux aquatiques.

2. Structure d'accueil

Actierra est un bureau d'étude spécialisé en ingénierie conseil pour la transition écologique. Créée au début de l'année 2024, Actierra est une filiale du groupe INGEROP, un acteur majeur dans le domaine de l'ingénierie avec plus de 60 ans d'expérience.

Réunissant plus de 3000 collaborateurs sur plus de 35 sites en France, et plus de 96 implantations dans le monde, le groupe traite de nombreuses problématiques en lien avec le bâtiment, l'énergie, l'industrie, les infrastructures, l'environnement, l'eau ou encore les transports. La création de la filiale Actierra a eu pour but de concentrer les compétences liées à la transition écologique telles que le climat, l'eau, l'aménagement durable, la biodiversité, ou encore la maîtrise des risques environnementaux. Ainsi Actierra propose ainsi une expertise spécialisée et focalisée sur les domaines liés à l'environnement, à l'échelle nationale et internationale. La filiale s'engage à promouvoir des solutions innovantes et durables pour relever les défis environnementaux actuels.

Actierra regroupe plus de 230 collaborateurs répartis sur 15 agences à travers la France. Cette structure en réseau constitue la principale force de la filiale : les agences sont en contact permanent, partageant leurs connaissances et s'entraidant sur les projets. Cette interconnexion permet une collaboration fluide et efficace, même lorsque les membres d'une même étude et leur chef de projet se trouvent dans des agences différentes. Ce fonctionnement garantit une expertise collective qui couvre l'ensemble du territoire français.

Au sein de l'agence de Tours, le bureau d'étude réunit 28 associés. Parmi les différents pôles présents, le pôle hydraulique, que j'ai pu intégrer dans le cadre du stage, est dirigé par Mr Sébastien Huard, travaillant sur le site d'Actierra d'Aix-en-Provence, et se compose de trois membres, spécialisés dans les domaines suivants :

- L'assainissement
- La gestion intégrée des eaux pluviales en milieu urbain
- La modélisation hydraulique des cours d'eau et du ruissellement.

La réalisation de mon stage au sein de l'équipe hydraulique d'Actierra Tours m'a donc permis de développer des compétences dans ces quatre domaines, grâce aux diverses études sur lesquelles j'ai pu travailler.

3. Présentation des missions

3.1 Mission principale - Étude de faisabilité de l'aménagement EGOUBerge

3.1.1 Contexte

Le projet traite de l'étude de la faisabilité d'un aménagement de protection de berge, proposé dans le cadre d'une étude précédente. Cette étude a été réalisée par le bureau d'étude « BRL », pour répondre à des problématiques d'érosion de berge.

La zone d'étude du projet se situe dans la commune de Semoy, au Nord-Est d'Orléans, plus précisément au lieu-dit "Le Coin Tranquille". À cet endroit, le cours d'eau l'Egoutier s'écoule et présente des problématiques d'érosion de berge. En effet, la berge gauche s'érode et devient presque verticale à certains endroits, posant des risques significatifs en raison de la proximité des habitations.

Sur la portion étudiée, la berge en rive gauche atteint trois mètres de haut par rapport au fond du lit, est quasiment verticale, et est constituée d'un matériau très friable.



Figure 1 : Plan de situation du linéaire d'étude de l'Égoutier

L'aménagement proposé à l'issue de l'étude de BRL est nommé "EGOUberge", et consiste en la mise en place d'un aménagement de protection de berge par deux techniques végétales sur le linéaire concerné, d'environ 130m :

- L'installation de fascines de saule au pied du talus sur la rive gauche. Il s'agit d'une solution de protection de berge caractérisée par la mise en place de fagots de branches de saules vivantes, maintenues par des pieux (Lachat, 1994).
- La reprise du talus sur cette même rive avec la pose de lits de branches à rejet de saule. Celles-ci sont fixées par des pieux ou un treillage de fil de fer et sont disposées dans le sens de la pente pour protéger immédiatement contre l'érosion (Lachat, 1994).

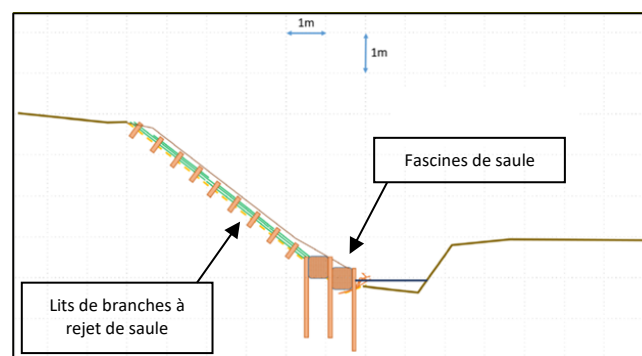


Figure 2: Schéma de principe de l'implantation de la fascine et de la reprise du talus, source : BRL, 2021

Dans le cadre du projet sur lequel j'ai travaillé, Orléans Métropole a mandaté Ingérop pour conduire une étude de faisabilité du projet proposé par BRL en 2021. L'objectif de cette étude est de vérifier les méthodes employées par BRL pour le choix des protections de berge, en intégrant des données plus récentes, et de proposer une analyse de la faisabilité de l'aménagement « EGOUberge » proposé.

3.1.2 Tâches réalisées

La mission s'est déroulée en plusieurs étapes distinctes, et les secteurs que j'ai pu aborder au cours de celles-ci sont multiples. Elles m'ont permis d'acquérir des compétences dans plusieurs domaines :

- **L'analyse et compréhension des données d'entrée** : étude des rapports de BRL, des documents de présentation de l'étude à réaliser, du modèle hydraulique de BRL, ainsi que des compléments topographiques à intégrer.
- **La modification du modèle hydraulique** : intégration des compléments topographiques dans le modèle hydraulique de BRL.
- **La réalisation des modélisations hydrauliques** : exécution des modélisations hydrauliques et compréhension des résultats obtenus.
- **La recherche bibliographique** : recherche d'informations sur les forces de frictions, les forces d'affouillement, et les techniques existantes de protection de berge.
- **L'analyse critique de l'étude** : évaluation de la proposition d'aménagement de BRL, au regard des résultats des modélisations hydrauliques, du calcul des forces de friction, ainsi que de l'analyse des techniques de protection de berge existantes.
- **La proposition d'aménagement** : réflexion sur le type d'aménagement de protection de berge le plus adapté aux contraintes du site.
- **La réalisation de coupes de principe** : élaboration des coupes de principe pour la présentation des aménagements proposés.
- **La rédaction du rapport d'étude** : rédaction et transmission du rapport d'étude à Orléans métropole.
- **La préparation d'une réunion publique** : création d'un diaporama de présentation de l'aménagement proposé, et préparation de la réunion avec les élus et riverains concernés.
- **La présentation publique de l'étude** : participation à la réunion publique pour présenter l'étude de faisabilité.

3.2 Autres missions réalisées

3.2.1 Modélisation de la Sainte-Eugénie et étude de changement d'un ouvrage de répartition sur la commune de Courcelles

Aux abords de Courcelles (58210), les écoulements du cours d'eau de la Sainte-Eugénie se divisent entre le chenal principal et un bief alimentant le Moulin de Bazarnes. L'ouvrage de répartition, constitué d'une vanne de répartition et d'un déversoir, est en mauvais état (la vanne est notamment bloquée en position basse), provoquant une mauvaise répartition des écoulements (80% vers le bief, 20% vers la Sainte-Eugénie).

Objectif de la mission : Proposer des scénarios d'aménagement pour rétablir une répartition 80/20 en faveur du chenal principal de la Sainte-Eugénie.

Compétences développées et méthodologie de réalisation :

- **Le calcul de débits de référence** via des méthodes mathématiques (CRUPEDIX, Gumbel), collecte et utilisation de données pluviométriques.
- **La prise en main du logiciel de modélisation HEC-Ras**, par la création d'un modèle hydraulique 1D intégrant des levés topographiques.
- **La réalisation de modélisations de crue de référence**, en fixant notamment les paramètres de modélisation (coefficients de rugosité notamment).
- **La proposition de scénarios d'aménagement ainsi que leur modélisation**, par l'étude de différentes configurations d'ouvrage pour obtenir une répartition 80/20 en faveur de la Sainte-Eugénie, en conformité avec les réglementations du droit d'eau du Moulin de Bazarnes.
- **L'analyse de l'influence des différents modèles de vannes sur les écoulements** et la comparaison avec la situation initiale.

Résultats : J'ai pu proposer trois scénarios d'aménagement que j'ai pu présenter à la cliente, ainsi que l'étude réalisée, lors d'une réunion.

3.2.2 Étude de faisabilité d'un projet de réutilisation d'eau pluviale sur le site de la gare de péage de Saint-Arnoult

COFIROUTE, filiale de VINCI Autoroute, souhaite expérimenter la réutilisation d'eau pluviale sur ses sites pour une démarche plus durable. Cette mission test, située à l'aire de péage de Saint-Arnoult-En-Yvelines (78730), vise à expérimenter la réutilisation afin de potentiellement étendre ce type de projet sur d'autres de ses sites.

Objectifs de la mission : étudier la mise en place d'un système de récupération, stockage et redistribution d'eau pluviale collectée à l'aval de l'auvent de la gare de péage et d'un bâtiment de stockage de sel à proximité.

Compétences développées et méthodologie de réalisation :

- **La réalisation de cadrage réglementaire**, pour analyser les possibilités règlementaires concernant la collecte, le stockage et la redistribution de l'eau pluviale.
- **L'étude hydrologique de volumes d'eau collectables**, à partir des données pluviométriques et des surfaces de récolte (toit du bâtiment de sel et auvent du péage).
- **L'analyse des besoins du client, et la mise en rapport avec les volumes collectables**, par l'analyse des besoins mensuels et annuels en eau de COFIROUTE pour les usages considérés (lavage des voies de péage, fabrication de saumure, lavage de véhicules).
- **L'établissement de bilans hydrauliques**, mensuels et annuels entre volumes collectables et besoins en eau.
- **La compréhension et analyse de réseaux d'assainissement existants**, par l'étude des plans de réseaux du site, compréhension de ceux-ci et proposition de scénarios d'acheminement et de distribution de l'eau pluviale.
- **La recherche et proposition de différents dispositifs de stockage**, avec analyse des avantages et inconvénients de chacun.

Résultats : L'étude a permis de définir le cadre réglementaire, de présenter les bilans hydrauliques mensuels et annuels, et de proposer quatre scénarios pour l'acheminement, le stockage et la distribution de l'eau pluviale collectée.

3.2.3 Conduite de la première phase de la révision du PPRI de l'Ornel.

L'Ornel, cours d'eau du nord-est de la France, traverse Sommelonne (55170), Chancenay (52100), Bettancourt-la-Ferrée (52100), et Saint-Dizier (52100) avant d'y rejoindre la Marne. Le PPRI (Plan de Prévention du Risque Inondation) de l'Ornel, datant de 2005, nécessite une révision, et Actierra a été mandatée pour la mener. La première phase, correspondant au recueil et à l'analyse des données, a été réalisée durant mon stage.

Objectifs de la mission : Conduire la première phase du projet de révision du PPRI de l'Ornel.

Compétences développées et méthodologie de réalisation :

- **La collecte de données**, auprès des différents acteurs du projet.
- **La lecture et le référencement des documents** (études antérieures, documents règlementaires, éléments topographiques), et la **création d'une base de données structurée**.
- **L'établissement d'un état des lieux** des données disponibles et identification des données manquantes, en analysant notamment précisément les éléments de topographie disponibles, dont les levés nécessaires parmi les 70 ouvrages hydrauliques situés sur l'Ornel.
- **La planification et conduite d'une campagne de terrain**, pour visiter et recenser chaque ouvrage, ainsi que vérifier l'actualité et l'utilisabilité des levés possédés.
- **La production d'un rapport d'état des lieux** des données et études disponibles, et analyse des informations apportées par chacun.

Résultats :

La lecture active des documents a permis la production de fichiers tableurs et de documents classant et regroupant rigoureusement toutes les données à disposition, ainsi que présentant les éléments clés de chacun. J'ai pu également analyser et critiquer la pertinence de chaque donnée collectée. La conduite de la campagne terrain a permis de recenser plusieurs ouvrages qui n'étaient pas présents sur les plans possédés, d'écarter d'autres ouvrages n'existant plus, ainsi que collecter de nombreuses informations utiles à la réalisation du PPRI par la discussion avec des élus et riverains rencontrés sur place.

4. Méthodologie

La présente partie ainsi que les suivantes traiteront uniquement de la mission principale du stage : l'étude de faisabilité de l'aménagement EGOUBerge, présentée dans la partie 3.1 Mission principale - Étude de faisabilité de l'aménagement EGOUBerge.

4.1 Compréhension des documents et études

La première étape du projet a consisté à cadrer l'étude, comprendre ses enjeux, ainsi que les caractéristiques et spécificités de l'Égoutier et de la zone d'étude. Pour cela, la méthode mise en place a été dans un premier temps le regroupement de tous les documents pertinents en rapport avec le projet, notamment :

- Le CCTP émis par Orléans Métropole ;
- La réponse au CCTP émise par Ingérop ;
- Les rapports de l'étude de 2021 faite par le bureau BRL ;

Par la suite, une lecture active des documents a été entreprise en prenant des notes afin de regrouper toutes les informations importantes pour la réalisation de la mission. L'objectif de cette analyse était l'identification des problématiques et enjeux du projet, ainsi que les besoins précis d'Orléans Métropole, afin d'établir une méthodologie de travail appropriée.

4.2 Méthode de modélisation utilisée : le logiciel HEC-Ras

La première partie technique du projet a consisté en la modélisation de crues sur le linéaire de l'Égoutier, dans le but de calculer des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement pour différents débits de crue de référence. Pour cela, le logiciel utilisé a été le logiciel **HEC-Ras**.

HEC-Ras, ou *Hydraulic Engineering Centers River Analysis System*, est un logiciel de modélisation hydraulique gratuit, élaboré par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine. Il permet la simulation des cours d'eau et des canaux pour des études hydrauliques et hydrologiques. Utilisé pour la simulation des crues, la gestion des inondations et la conception d'ouvrages hydrauliques, HEC-Ras permet l'analyse des écoulements pour différents régimes, ainsi que pour le transport des sédiments. On parle de :

- Régime **permanent** : il s'agit de modélisations à débits constants. Les équations de continuité et de quantité de mouvement sont résolues sous l'hypothèse que les variables ne changent pas avec le temps.
- Régime **transitoire** : il s'agit de modélisations dans lesquelles le débit est dépendant du temps. Les équations sont résolues de manière dynamique, en fonction du temps, avec l'utilisation d'hydrogrammes notamment. C'est le type de régime utilisé pour le projet.
- Régime **quasi-transitoire** : il s'agit de modélisations dans lesquelles l'écoulement est considéré comme une série de d'écoulements à régime permanents successifs, avec des variations lentes dans le temps.

Hec-Ras est un outil de choix pour les modélisations de crues nécessaires à l'étude, d'autant que sa large diffusion et utilisation permettent une compréhension et une reprise aisée des modèles créés.

4.3 Prise en main du modèle hydraulique de BRL

La spécificité technique du projet résidait dans l'utilisation d'un modèle hydraulique préexistant, créé par BRL lors de leur étude de 2021. L'objectif était d'y intégrer des données topographiques récentes.

La bonne prise en main du modèle était très importante, car pour l'utiliser et le modifier adéquatement, tout en limitant les impacts sur ses composants, il était essentiel de le comprendre, et d'identifier tous ses éléments intégrés.

Le modèle hydraulique de BRL est une modélisation complète de l'Égoutier, de sa source à la forêt d'Orléans jusqu'à sa confluence avec la Loire, à Orléans. Il s'agit d'une modélisation 1D couplée 2D de l'Égoutier, c'est-à-dire que le lit majeur du cours d'eau est modélisé en 2D, à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), et son lit mineur en 1D, à l'aide de profils en travers. Le lien entre la 1D et la 2D se fait grâce à des **structures latérales**, positionnées le long des lignes de berges, de chaque côté du cours d'eau (voir Figure 3). Ces structures permettent la simulation du débordement du lit mineur, et transfèrent les flux hydrauliques dans le lit majeur en 2D lorsque les hauteurs d'eau du lit mineur leur sont supérieures.

Le modèle est donc complexe et comporte de nombreux éléments :

- Un modèle de terrain complexe, d'une résolution de 1m ;
- Un maillage 2D du lit majeur d'une résolution de 10m, intégrant notamment des éléments de contraintes pour représenter la voirie par exemple ;
- 18 Ouvrages hydrauliques (pont et buses) ;
- 200 Profils en travers (coupe topographique perpendiculaire du lit mineur du cours d'eau), dont 102 ont été interpolés entre des profils levés ;
- 6 fichiers de débits, composés d'hydrographes, dont un de type « Flow » (variation du débit selon le temps), un de type « stage » (variation de la hauteur d'eau selon le temps) et 4 de type « lateral inflow » (variation de débits par apports latéraux au chenal) (HEC-RAS User's Manual, 2024). Chaque fichier de débits correspond à une crue de référence, ainsi, 6 ont été modélisées : les crues de période de retour 5ans (crue ayant une probabilité statistique de se produire tous les 5ans), 10ans, 30ans, 100ans et 200ans, ainsi que la crue historique de 2016.
- De nombreux autres éléments complexes (lignes de contraintes, coefficients de rugosité, etc...)

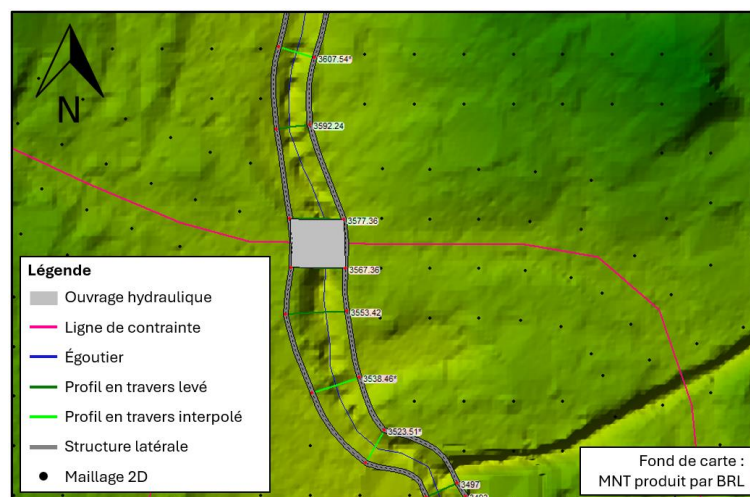


Figure 3: Présentation du modèle hydraulique de BRL

Pour maîtriser tous ces éléments, un travail de recherche a été effectué, incluant la consultation de guides du logiciel, de visionnage de vidéos tutoriels et de la création de fiches guides personnelles, regroupant les informations obtenues. La compréhension et l'identification des composants du modèle étaient essentielles pour limiter les erreurs de modélisation et les impacts indésirables des modifications à apporter.

Une critique du modèle a été réalisée, afin d'identifier les possibles problèmes de celui-ci :

Tableau 1: Critique du modèle hydraulique repris

Avantages	• Exhaustivité du modèle : le modèle présente des profils en travers régulièrement le long de l'Égoutier, et tous les ouvrages hydrauliques y ont été adéquatement intégrés. • Compréhension aisée des données : Les fichiers compris dans le modèle, notamment fichiers de projet, fichiers de débits, géométries, sont tous nommés de manière à comprendre aisément leur but et spécificités, et sont expliqués dans les documents d'études transmis.
Inconvénients	• Faible stabilité du modèle : Le modèle était très instable, le moindre changement dans les géométries par exemple, entraînait des modifications souvent exagérées et non réalistes dans les résultats des modélisations. • Écart de 4cm observé, entre la topographie du terrain le long des berges de l'égoutier, et l'élévation de structures latérales les longeant, censées avoir la même altitude que cette topographie.

4.4 Modification du modèle hydraulique

4.4.1 Fabrication du nouveau modèle numérique de terrain (MNT)

La première étape de la modification du modèle a été d'intégrer les données topographiques récentes dans le MNT du modèle hydraulique. Ces données ont été relevées en août 2021 par la société Axis Conseils, et ont été transmises sous forme de fichier de dessin numérique.

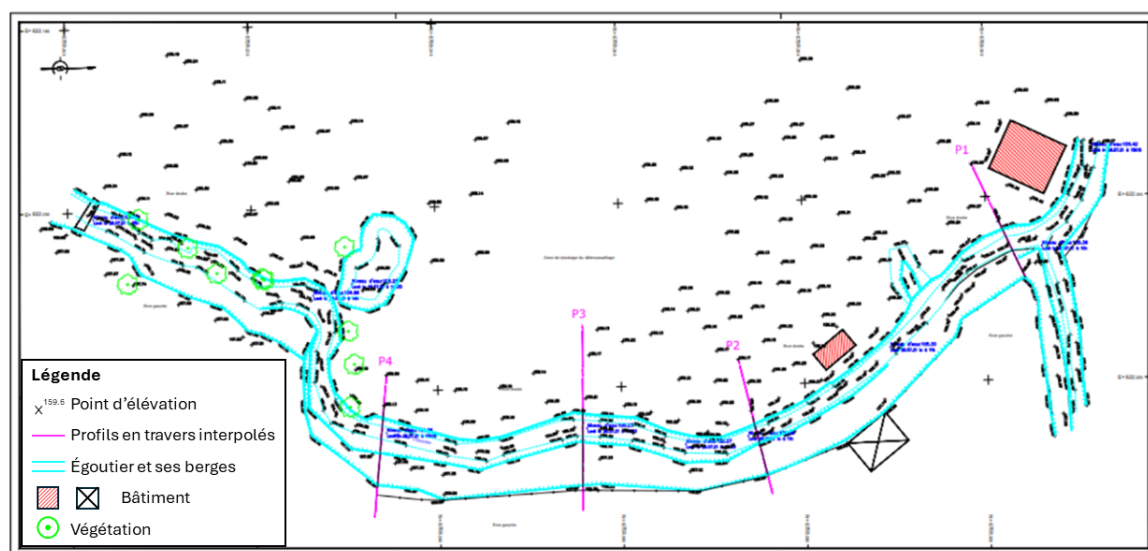
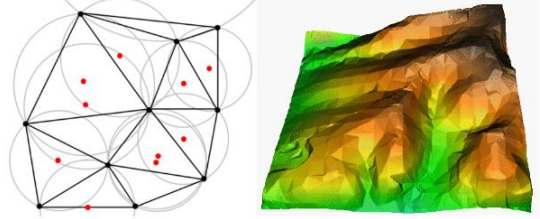
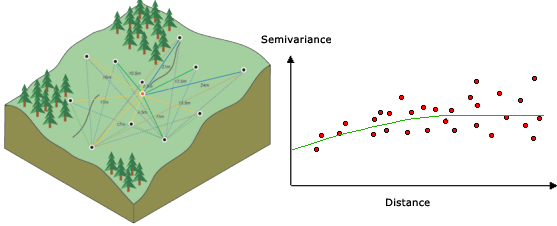
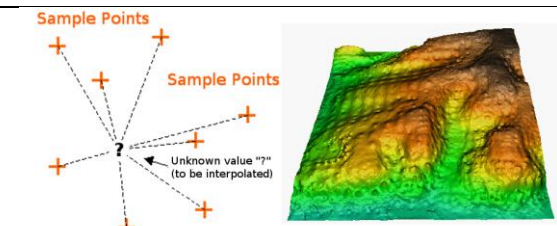


Figure 4 : Données topographiques supplémentaires, relevées par Axis Conseils en août 2021

Les données comprennent donc un nuage de point d'élévation relevé sur le lit mineur et le lit majeur de la zone d'étude, ainsi que 4 profils en travers interpolés du nuage de point. Le nuage a été exporté du dessin numérique sous format shapefile grâce au logiciel AUTOCAD MAP, afin de pouvoir l'utiliser pour la création d'un MNT précis de la zone d'étude. Pour la création de ce MNT, plusieurs méthodes d'interpolation ont été testées, afin d'identifier l'outil permettant la création du MNT le plus pertinent. Ainsi, trois méthodes ont été testées :

Tableau 2: Présentation des trois méthodes d'interpolation comparées

Nom	Description	Illustrations
Interpolation TIN ou Triangulated Irregular Network	Cette méthode utilise un réseau de triangles irréguliers pour représenter les surfaces de terrain. Les cercles circonscrits autour des points d'élévation sont créés, et leurs intersections forment les sommets de triangles non superposés. Cette interpolation s'est effectuée grâce à l'outil « interpolation TIN » du logiciel QGIS.	 Source de l'image : Mitas, L., Mitasova, H. (1999).
Interpolation Kriging	Cette méthode prend en compte la distance entre les points, mais également la structure spatiale des données : un modèle statistique est mis en place pour estimer les valeurs inconnues en fonction de celles connues et de leur distribution spatiale. Un variogramme est également inclut, décrivant la variance des différences entre les points en fonction de la distance. Cette interpolation s'est effectuée grâce à l'extension « Smart-Map » du logiciel Qgis.	 Source des images : Oliver, 1990.
Interpolation IDW ou Inverse Distance Weighting	Cette méthode calcule la valeur d'élévation de chaque point inconnu comme une moyenne pondérée des valeurs connues situées à proximité. Le poids de chaque point connu est inversement proportionnel à la distance qui le sépare du point inconnu. Cette interpolation s'est effectuée grâce à l'outil « interpolation IDW » du logiciel Qgis.	 Source de l'image : Mitas, L., Mitasova, H. (1999).

Pour les trois méthodes, la résolution d'interpolation a été définie à 1m, pour correspondre à la résolution du MNT de BRL.

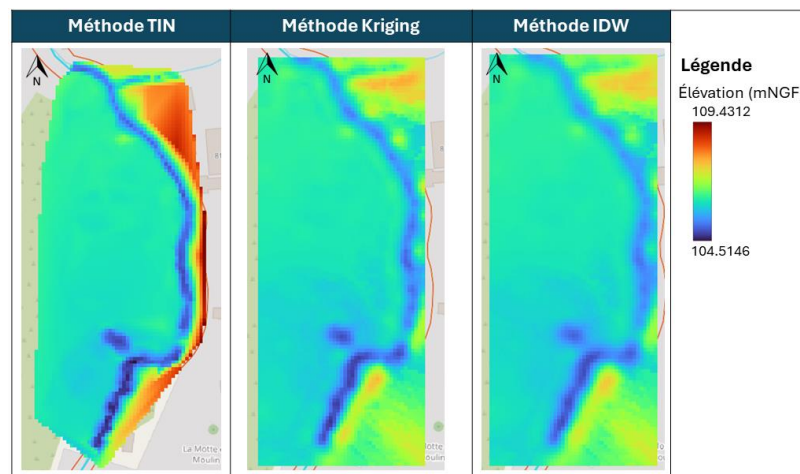


Figure 5 : Visualisation des MNT créés par les trois méthodes d'interpolation testées

Le MNT créé par la méthode **TIN** a été jugée le plus pertinent car plus représentatif du lit majeur, notamment des hauteurs du côté de la berge abrupte. Celui-ci a ensuite été fusionné à celui de BRL directement dans le logiciel HEC-Ras grâce à l'outil RASMAPPET. Ainsi, les données topographiques

levées en 2021 ont été intégrées au MNT du modèle hydraulique de manière à préciser le lit majeur de la zone d'étude.

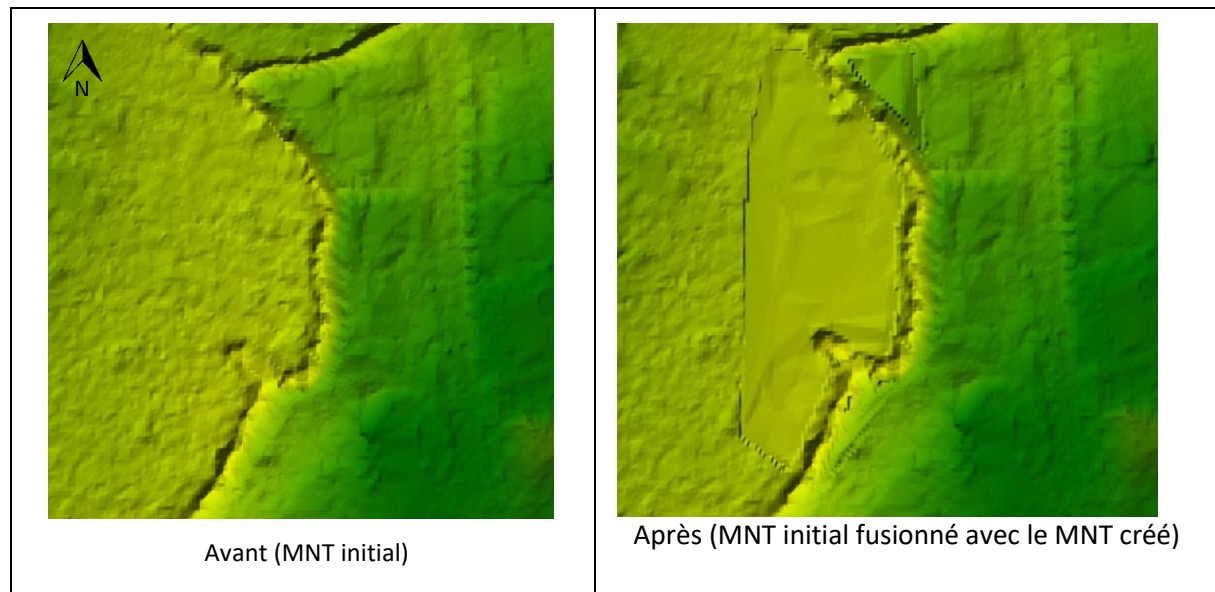


Figure 6 : Intégration du MNT issu de la méthode TIN dans le terrain de BRL, sur HEC-Ras

4.4.2 Définition des limites de la zone d'étude

Pour toutes les modifications nécessaires de la partie 1D (lit mineur) du modèle hydraulique, il a été décidé de définir une section précise du modèle où les modifications seront effectuées. Les limites de cette section ont été définies par deux profils en travers (présent dans le modèle de BRL) : un à l'amont de la zone d'étude, et un à son aval. Ainsi, toutes les modifications à venir du modèle 1D de l'Égoutier seront effectuées entre ces deux profils, de manière à assurer de ne pas impacter le modèle en dehors de la zone d'étude.

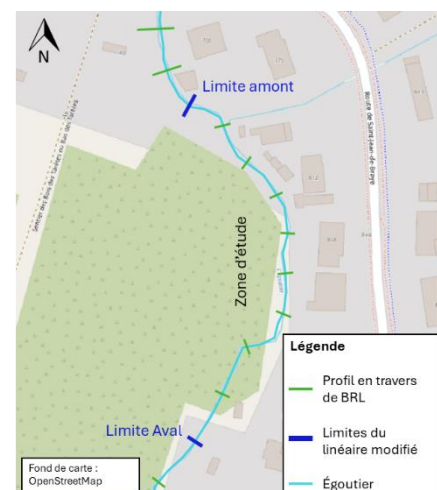


Figure 7 : Limites du linéaire 1D modifié

4.4.3 Intégration des nouveaux profils en travers

Le MNT modifié produit précédemment permet l'intégration des compléments topographiques de 2021 au sein du lit majeur de la zone d'étude (partie 2D du modèle). Afin de les intégrer au lit mineur du modèle (partie 1D), les 4 profils en travers interpolés des points d'élévation par Axis Conseils (P1, P2, P3 et P4, voir Figure 4) ont été intégrés au modèle. De plus, afin d'assurer une représentation précise du lit mineur de l'Égoutier au sein du modèle hydraulique, il a été choisi d'interpoler des profils en travers supplémentaires au droit de chaque changement hydromorphologique. Ainsi, 6 profils en travers supplémentaires ont été interpolés, d'amont à aval :

Tableau 3 : Profils en travers supplémentaires, interpolés du nuage de points d'élévation du supplément topographique

Nom du profil	Changement hydromorphologique
P5	Zone de berge très pentue (proche de la verticale)
P6	Fin de la zone de berge très pentue, début du méandre aval de la zone d'étude
P7	Zone de jonction avec une dépression en rive droite
P8	Fin du méandre aval de la zone d'étude
P9	Élargissement de la section de l'Égoutier
P10	Réduction de la section de l'Égoutier et fin de la zone d'étude

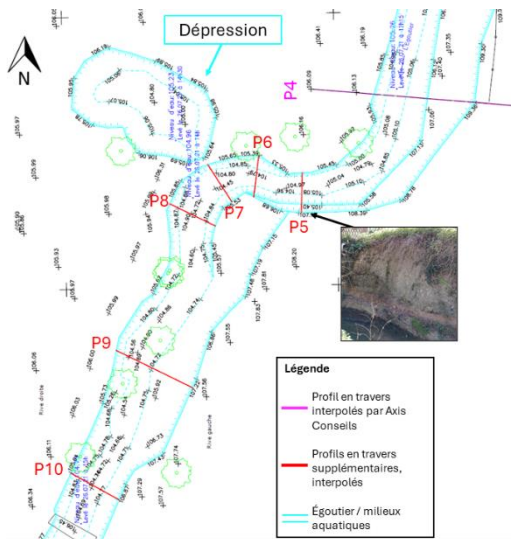


Figure 8 : Visualisation des profils en travers supplémentaires, interpolés du levé topographique de 2021. Source de la photo : C. Debrabant, 2024

Les coordonnées des points des nouveaux profils en travers ont été interpolées du nuage de points de cette façon : après traçage du profil perpendiculairement à l'Égoutier, la coordonnée Z des points le composant est calculée en moyennant les valeurs des points directement à l'amont, et directement à l'aval de ceux-ci (perpendiculairement à l'Égoutier), en pondérant selon leur distance.

Équation 1 : Calcul de l'altitude des points des profils supplémentaires interpolés du levé de 2021

$$Z_{\text{profil}} = Z_{\text{amont}} - ((Z_{\text{amont}} - Z_{\text{aval}}) * D)$$

Avec : Z_{profil} l'altitude d'un point du profil supplémentaire, Z_{amont} l'altitude du point du levé de 2021 directement à l'amont de celui-ci, Z_{aval} l'altitude du point du levé de 2021 directement à son aval, et D la distance entre le point amont et le point aval.

Ainsi, tous les profils en travers du modèle de BRL se trouvant entre les deux profils de limite (voir Figure 7) ont été supprimés. Les 10 profils en travers interpolés du levé de 2021 y ont été intégrés pour les remplacer. Enfin, il a été choisi d'utiliser la fonction « XS interpolation » de HEC-Ras pour interpoler d'autres profils en travers à partir de ceux renseignés au sein de la zone d'étude. Grâce à cet outil, HEC-Ras peut interpoler des profils en travers en moyennant les valeurs des profils directement à l'amont et l'aval, et en pondérant selon la distance qui les sépare. L'interpolation a été effectuée afin d'obtenir un profil en travers tous les 5m sur le linéaire étudié.

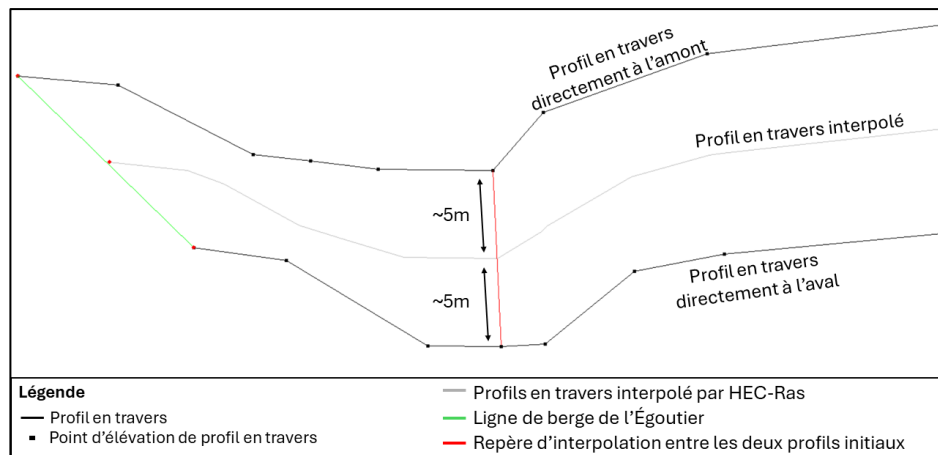


Figure 9 : Interpolation de profils en travers par l'outil "XS Interpolation" de HEC-Ras

Les compléments topographiques de 2021 ont donc été intégrés au lit mineur (partie 1D) du modèle, en ayant mis à jour la représentation de celui-ci par l'intégration de profils en travers précis et réguliers, issus des compléments topographiques, et représentant tous les changements hydromorphologiques au sein de la zone d'étude (voir résultats Figure 13).

4.4.4 Modification des structures latérales

Comme présenté dans la partie 4.3 Prise en main du modèle hydraulique de BRL, les structures latérales permettent le lien entre la partie 1D du lit mineur et la partie 2D du lit majeur. Celles-ci sont positionnées le long des lignes de berges du lit mineur. Cependant, après la modification précédente des profils en travers, il a été nécessaire de corriger le **tracé** ainsi que le profil d'**élévation** des structures latérales.

Concernant leur tracé, les coordonnées X et Y des lignes de berges modifiées ont d'abord été exportées, puis ont remplacé celles des structures latérales au sein de la zone d'étude (plus précisément entre les deux profils en travers limitant la zone d'étude, voir Figure 7). Le tracé modifié est visualisable en Figure 13.

Concernant l'élévation des structures, celles-ci sont initialement définies selon l'élévation du **terrain** le long des lignes de berges. Cependant, il a été jugé que l'élévation des extrémités des profils en travers était **plus précise** que celle du terrain le long des lignes de berges. Le profil d'élévation des structures latérales a ainsi été modifié de trois manières :

1. Sur la berge **gauche** de la zone d'étude, l'élévation des profils en travers a été appliquée. Cela a permis d'obtenir une élévation de structure latérale plus précise, récente et réaliste que le profil initial.

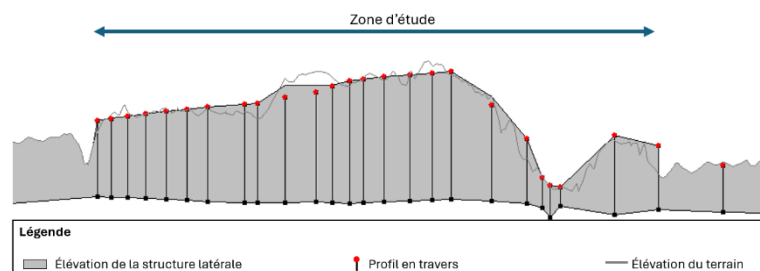


Figure 10 : Modification du profil en long d'élévation de la structure latérale en rive gauche de la zone d'étude

1. Sur la berge **droite** de la zone d'étude, l'élévation du terrain a été appliquée. En effet, après obtention de nombreuses erreurs et instabilités lors des modélisations en essayant d'y appliquer l'élévation des profils en travers, il a été préféré d'appliquer l'élévation du **nouveau MNT** produit précédemment.

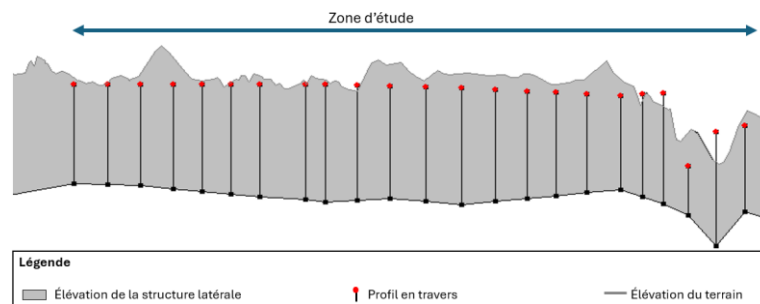


Figure 11 : Application de l'élévation du nouveau terrain pour la structure latérale en berge droite de la zone d'étude

1. En dehors de la zone d'étude, l'élévation du terrain le long des lignes de berge a été **réappliquée** aux structures latérales, pour régler l'erreur de différence de 4cm observée entre l'élévation des structures et le terrain (voir Tableau 1).

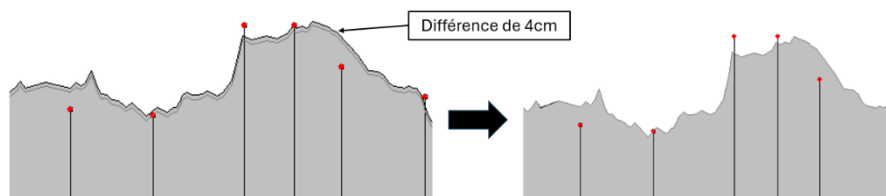


Figure 12 : Réapplication du terrain aux structures latérales en dehors de la zone d'étude

4.4.5 Modification du périmètre du maillage 2D

Le périmètre de limite 1D/2D est un des éléments spécifiques de la modélisation 1D/2D sous HEC-Ras : il encadre le périmètre de la zone 2D du modèle. Ce périmètre suit donc les structures latérales le long de l'égoutier, et s'étend sur une surface jugée suffisante pour encadrer tout débordement possible du cours d'eau. Après la modification du tracé des berges de la zone d'étude et des structures latérales, le tracé de la limite 1D/2D a donc également été modifié en adéquation.

Cette modification a garanti que les débordements dans le lit majeur du cours d'eau (partie 2D du modèle) ont bien été délimités, et qu'aucune partie du maillage 2D ne se trouvait dans le lit mineur de l'égoutier.

4.4.6 Visualisation du modèle modifié

L'intégration des nouveaux profils en travers, la modification des structures latérales et du périmètre du maillage 2D sont visualisables ci-dessous :

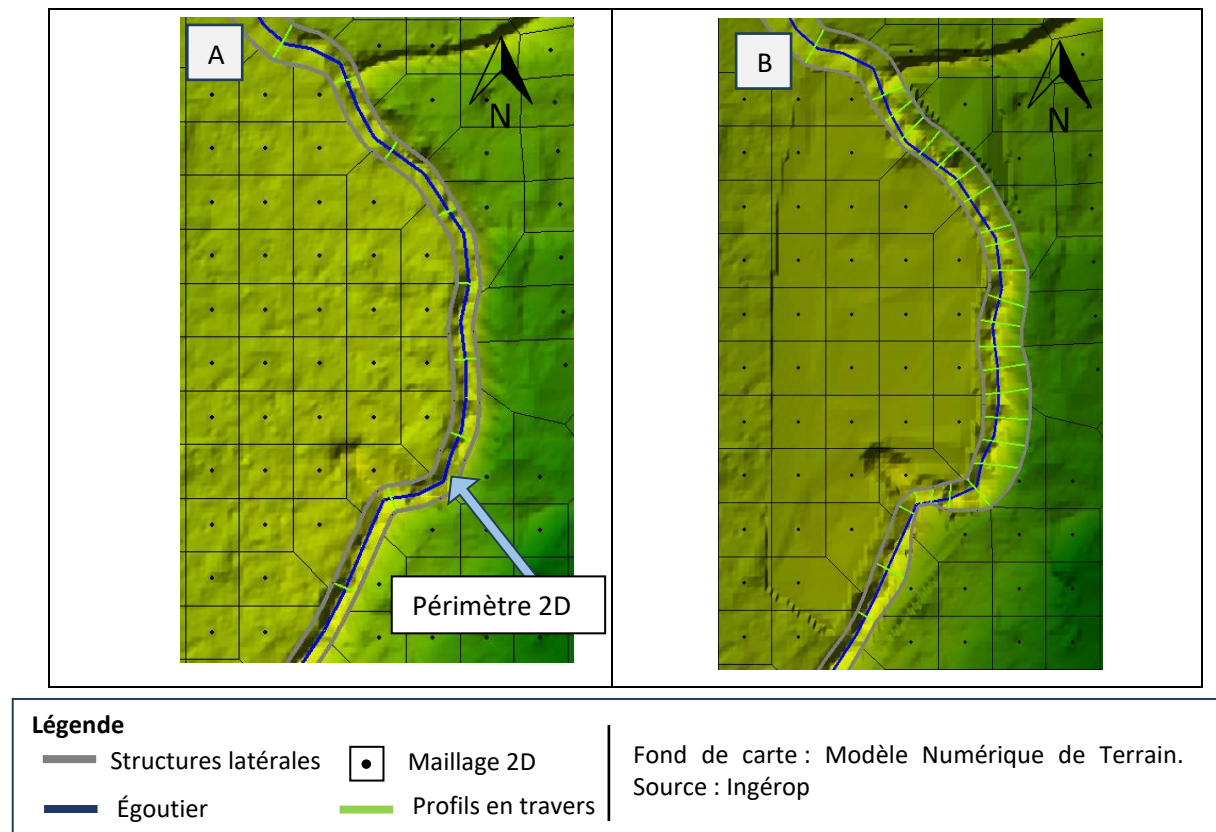


Figure 13 : Périmètre du maillage 2D, structures latérales et profils en travers avant (A) et après (B) modification

4.5 Modélisation des crues de référence

Une fois toutes les modifications intégrées au modèle, les simulations des crues de référence (crues de 5 ans, 10 ans, 30 ans, 100 ans, 200 ans et crue de 2016) ont pu être lancées. Pour garantir des comparaisons pertinentes entre les résultats avant et après modification du modèle, les nouvelles simulations ont été effectuées avec précaution, en utilisant soigneusement les mêmes paramètres que celles de BRL.

A l'issue des modélisations, deux types de cartes ont été exportées, pour chaque crue de référence :

- Des cartes de hauteurs d'eau (en mètres) de la zone d'étude. Ces cartes ont été comparées à celles issues des modélisations de BRL afin d'attester des changements engendrés par les modifications du modèle hydraulique.
- Des cartes de vitesses (en mètres/secondes) de la zone d'étude. Ses cartes ont aussi été comparées à celles issues des modélisations de BRL, mais ont également été utilisées pour extraire des valeurs de vitesse le long du linéaire d'étude afin de calculer les forces tractrices de l'Égoutier (voir partie suivante).

4.6 Calcul des forces tractrices

4.6.1 Définition et formule

Afin d'étudier la faisabilité de l'aménagement EGOUBerge, proposé par BRL, la méthodologie choisie a été celle l'étude de la **force tractrice**, pour juger de la résistance de celui-ci.

La force tractrice correspond à la force tangentielle due à l'eau qui s'exerce par unité de surface du lit. A l'heure actuelle, la contrainte tractrice est le paramètre le plus utilisé pour caractériser la résistance des ouvrages de génie végétal face aux forces hydrauliques. Il s'agit donc d'un outil de choix pour l'étude de faisabilité de l'aménagement EGOUBerge. La formule qui a été utilisée intègre la formule de rugosité de Manning-Strickler et prend en compte la pente, la rugosité et la vitesse :

Équation 2 : Formule de calcul des forces tractrices

$$\tau = \rho \times S^{\frac{1}{4}} \times Ks^{\frac{-3}{2}} \times V^{\frac{3}{2}}$$

Avec :

ρ , le poids volumique de l'eau (N/m^3) ;
 S , la pente (en m/m) ;
 Ks , le coefficient de rugosité de Strickler ;
 V , la vitesse (en m/s).

Parmi les quatre variables qui composent la formule, trois d'entre elles prennent une même valeur pour l'ensemble du linéaire étudié :

- La pente S prend la valeur 0,005. Il s'agit de la valeur de la pente moyenne, calculée sur l'ensemble du cours d'eau grâce à l'exploitation du profil en long fourni par le géomètre.
- Le poids volumique de l'eau prend la valeur admise scientifiquement à 9807 N/m^3 .
- Le coefficient de rugosité de Strickler est défini en convertissant les coefficients de Manning (le coefficient de Strickler est égal à $1 / \text{Coefficient de Manning}$). Sa valeur est de 20 sur l'ensemble du linéaire (valeur établie par BRL et intégrée au modèle HEC-Ras, ayant été vérifiée en analysant l'occupation du lit mineur du site d'étude).

La valeur de la vitesse d'écoulement variait significativement sur le linéaire étudié. Il a alors été choisi de diviser celui-ci en 5 tronçons homogènes, afin d'obtenir la force de traction la plus précise le long de l'Égoutier dans la zone d'étude.

Les valeurs de vitesse utilisées dans la formule ont été extraites des cartes de vitesses issues des modélisations hydrauliques précédentes.

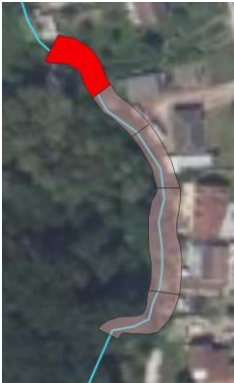
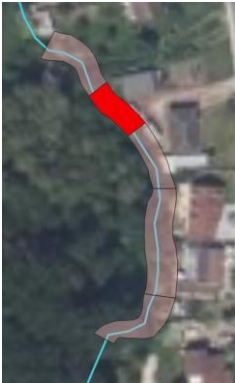
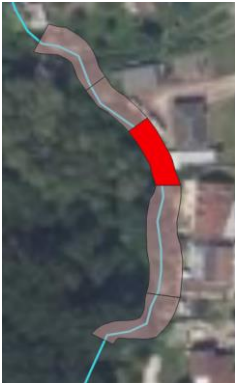
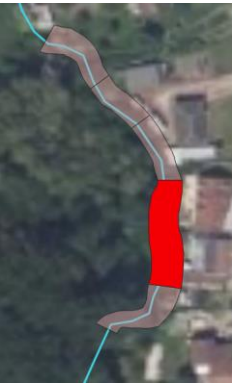
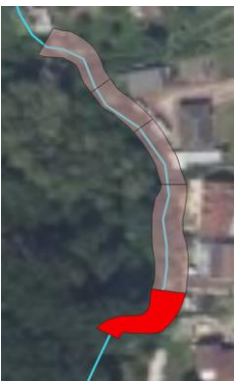
4.6.2 Tronçonnage de la zone d'étude

La division du linéaire en 5 tronçons homogènes a été le fruit d'une analyse multicritères prenant en compte :

- Une homogénéité morphologique (présence de méandre ou linéaire rectiligne).
- Une homogénéité de la berge en rive gauche en observant la pente et la hauteur du talus.
- Une homogénéité des vitesses d'écoulements.

Une synthèse des tronçons définis ainsi que leurs caractéristiques moyennes est présenté ci-dessous :

Tableau 4 : Récapitulatif des tronçons choisis

	Tronçon 1	Tronçon 2	Tronçon 3	Tronçon 4	Tronçon 5
Photo					
Pente moyenne du talus	0,50 m/m	0,61 m/m	0,70 m/m	0,74 m/m	1,23 m/m
Hauteur moyenne du talus	1,40 m	1,85 m	2,50 m	3,37 m	1,7 m
Hydromorphologie	Méandre	Linéaire	Méandre	Linéaire	Méandre

4.6.3 Calcul des forces tractrices

La variation des forces tractrices au sein de la zone d'étude est donc dépendante de la variation des vitesses d'écoulement dans les différents tronçons. Pour chaque tronçon, une vitesse maximale a été retenue **pour chaque crue modélisée**, par analyse des résultats des modélisations hydrauliques. En effet, la crue la plus importante en termes de débit n'a pas forcément présenté les vitesses d'écoulement les plus élevées.

Pour cela, pour chaque tronçon, les vitesses **maximales** obtenues au droit de chaque profil en travers compris dans celui-ci ont été exportées grâce à l'option « Summary output table », permettant la visualisation et exportation des valeurs de nombreuses variables, telles que la vitesse, et ce au droit de chaque élément du modèle (ici les profils en travers), et pour chaque modélisation. Pour chaque tronçon, c'est donc la vitesse la plus élevée relevée qui a été retenue, afin de calculer les forces tractrices avec la valeur les **plus élevées**.

Un coefficient de 1,4 a ensuite été appliqué aux tronçons étant situés en méandre prononcé du côté de la berge à risque (tronçons n°1, n°3 et n°5). Ce coefficient correspond à l'augmentation des vitesses d'écoulement en extrados de méandre (Epteau, 1998).

Ces vitesses ont permis de calculer une valeur de force tractrice pour chaque tronçon, pour chaque crue. Les valeurs conservées pour le projet sont donc les valeurs les plus sécuritaires, c'est à dire les plus élevées, pour chaque tronçon.

4.7 Visite de terrain

4.7.1 Objectifs et organisation de la visite

Une visite de terrain a été planifiée au cours de la construction du modèle hydraulique. Les objectifs de celle-ci étaient multiples :

- Visualiser personnellement le site d'étude, afin d'être plus apte à analyser les données topographiques à disposition, et à prendre des décisions concernant la construction du modèle.
- Vérifier certaines dimensions de berges sur lesquelles un doute subsistait sur la cohérence entre les photographies à disposition et les relevés topographiques de 2021.
- Analyser la présence ou non d'éléments à prendre en compte dans les modélisations hydrauliques.

La visite s'est donc déroulée sur une journée, durant laquelle j'ai pu apprendre à planifier et mener une visite de terrain, grâce aux précieux conseil et guidages de Mme Ferlay, ma tutrice de stage.

4.7.2 Observations et impacts sur le projet

Lors de la visite de terrain, j'ai pu observer la zone d'étude, prendre de nombreuses photos et mesures, et mieux appréhender les éléments de topographie disponibles. Parmi les observations faites sur le terrain, voici celles qui ont eu un impact significatif sur les divers aspects du projet :

- **Dépression en rive droite** : L'observation de la dépression située en rive droite du méandre aval de la zone d'étude a révélé son importance. En conséquence, elle a été davantage mise en avant dans la construction du modèle hydraulique. Cette observation terrain a conduit à l'interpolation d'un profil en travers au niveau de la connexion entre le lit mineur et cette dépression (profil P7, voir Figure 8).
- **Proximité des habitations** : La visualisation directe de la proximité des habitations par rapport aux berges abruptes a permis une meilleure évaluation de la faisabilité de l'aménagement de BRL, notamment en soulignant la dangerosité de cette proximité.
- **Validation des données topographiques** : Différentes mesures de profondeur du lit mineur et de la hauteur des berges ont confirmé la validité des données topographiques des profils en travers, dissipant certains doutes initiaux.
- **Hauteur de la berge abrupte** : La mesure de la hauteur de la berge la plus abrupte, au niveau du méandre aval, a révélé une hauteur supérieure à celle du profil en travers du modèle hydraulique le plus proche (environ 3 m mesurés contre 2,15 m sur le profil le plus proche). Cela a conduit à une représentation plus réaliste de la hauteur de la berge notamment lors de la création des coupes de principe pour la proposition d'aménagement (voir 6.3.2 Préparation de coupes de principe)



Figure 14 : Exemple de mesure prise lors de la visite terrain : hauteur de la berge la plus abrupte de la zone d'étude

5. Résultats

5.1 Résultats des modélisations

Les modélisations hydrauliques ont conduit à la création de cartes des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement, et ce pour chaque crue de référence. Un exemple de comparaison entre les résultats obtenus et les cartes initiales de BRL est présenté ci-dessous. Toutes les autres cartes sont présentées en Annexe 1 de ce rapport.

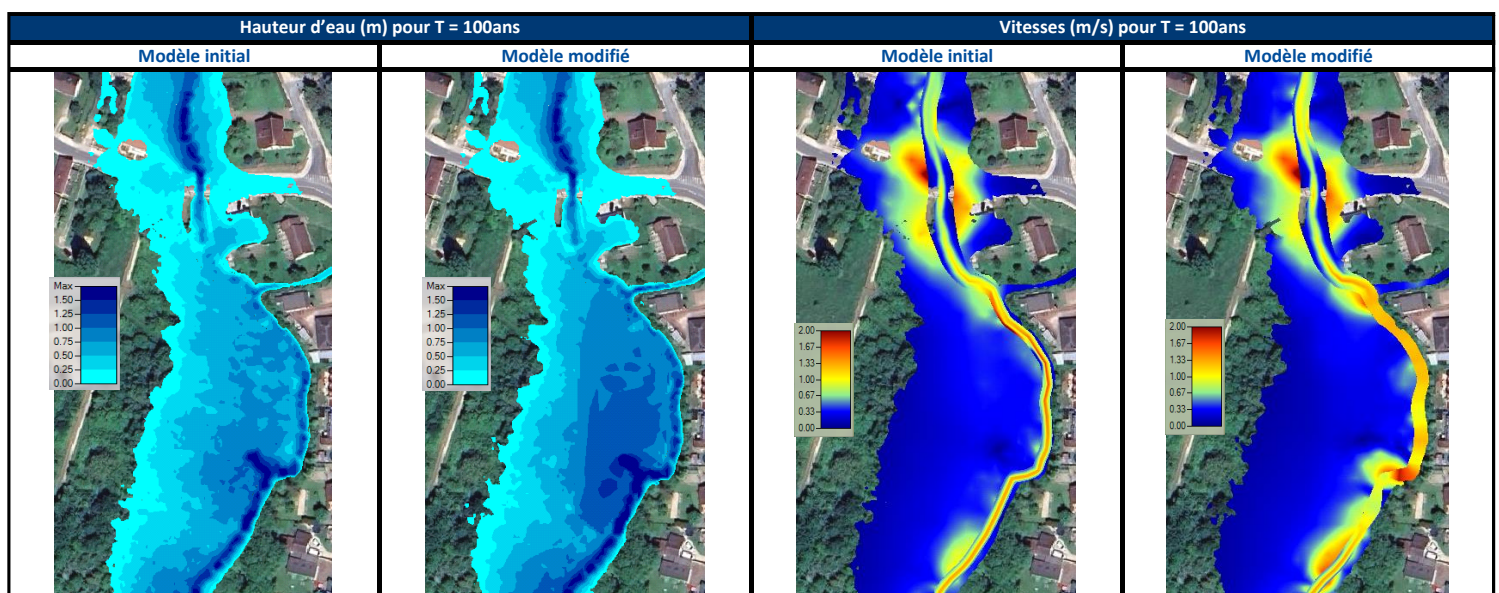


Figure 15 : Exemple de cartes de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement (ici pour une période de retour 100ans) au droit de la zone d'étude, issues des modélisations hydrauliques, et visualisation des cartes initialement produites par BRL

5.2 Calcul des forces tractrices

Les résultats de calcul des forces tractrices est présenté ci-dessous. Pour rappel, les vitesses d'écoulement des tronçon n°1, 3 et 5 ont été multipliées par 1,4 en accord avec le principe d'augmentation des vitesses d'écoulement en extrados de méandre (Epteau, 1998).

Tableau 5 : Calcul de forces tractrices pour chaque tronçon, et chaque crue de référence modélisée

		Tronçon 1	Tronçon 2	Tronçon 3	Tronçon 4	Tronçon 5
Q5	Vmax (m/s)	1.22	1.29	1.34	1.29	1.85
	V * 1.4	1.708		1.876		2.59
	Force tractrice	65.08	42.72	74.92	42.72	121.53
Q10	Vmax (m/s)	1.27	1.28	1.30	1.27	1.81
	V * 1.4	1.778		1.82		2.53
	Force tractrice	69.12	42.22	71.59	41.73	117.61
Q30	Vmax (m/s)	1.39	1.28	1.27	1.27	1.83
	V * 1.4	1.946		1.778		2.562
	Force tractrice	79.15	42.22	69.12	41.73	119.56
Q100	Vmax (m/s)	1.43	1.30	1.28	1.28	1.87
	V * 1.4	2.002		1.79		2.62
	Force tractrice	82.59	43.22	69.94	42.22	123.51
Q200	Vmax (m/s)	1.44	1.30	1.28	1.28	1.87
	V * 1.4	2.016		1.79		2.62
	Force tractrice	83.46	43.22	69.94	42.22	123.51
Q2016	Vmax (m/s)	1.22	1.29	1.32	1.29	1.84
	V * 1.4	1.71		1.85		2.58
	Force tractrice	65.08	42.72	73.25	42.72	120.55
Force de traction retenue		83	43	75	43	124

6. Analyse et discussion

6.1 Comparaison des résultats de modélisation avec les ceux de BRL

Les résultats obtenus avec les modèles de BRL et INGEROP ont révélé des variations significatives des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement suite aux modifications du terrain. Le modèle INGEROP a montré des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement plus uniformes en lit majeur, avec des augmentations ponctuelles notables des hauteurs d'eau et des zones inondées par rapport au modèle BRL. De manière générale, les vitesses d'écoulement ont diminué, sauf dans certaines zones spécifiques comme les méandres amont et aval où elles ont augmenté. On peut donc observer une meilleure représentation des méandres, car ceux-ci entraînent une augmentation des vitesses similaire à celle observée dans les résultats.

Les simulations de crues sur les périodes de retour allant de 5 ans à 200 ans, ainsi que la crue 2016, ont montré des augmentations des largeurs des zones inondables et des vitesses d'écoulement dans

la zone d'étude, et des diminutions des largeurs des surfaces inondées dans l'amont de celle-ci, un meilleur écoulement entre l'amont de la zone d'étude et celle-ci dans le modèle modifié.

De manière générale, les différences observées étaient ponctuelles et ont permis de valider les résultats obtenus, justifiant ainsi les valeurs de vitesse utilisées pour le calcul des forces tractrices. Cependant, les résultats obtenus au cours des modifications du modèle ont révélé une certaine instabilité (souvent, des modifications mineures entraînaient des non réalistes dans les résultats de modélisation). Ces instabilités sont typiques de la modélisation 1D/2D sous HEC-RAS, une méthode souvent évitée par les bureaux d'études spécialisés en modélisation hydraulique. À plusieurs reprises, nous avons même envisagé d'abandonner le système 1D/2D pour recommencer la modélisation de la zone d'étude avec une autre méthode (par exemple, en full 2D). Dans d'autres contextes d'études, la modélisation 1D/2D n'aurait pas été choisie pour ce type de projet. Toutefois, la reprise du modèle de BRL a limité nos possibilités.

6.2 Faisabilité de l'aménagement EGOUBerge

Afin d'analyser la résistance de l'aménagement EGOUBerge proposé par BRL par rapport aux forces tractrices calculées, une recherche bibliographique a permis d'obtenir les valeurs de résistance de nombreux types d'aménagement de protection de berge en techniques végétale. Les deux techniques proposées par BRL pour l'aménagement EGOUBerge sont surlignées en jaune.

Tableau 6 : Contraintes tractrices calculées pour diverses techniques de génie végétal

Technique		Contrainte tractrice [N/m ²]		
		À la réalisation	1 à 2 ans après	3 ou 4 ans après
Enherbement		4 ⁽³⁾ -20 ⁽³⁾	25-30 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾ -100 ⁽²⁾
Boutures		10 ⁽³⁾	60 ⁽³⁾ -150 ⁽¹⁾	60 ⁽³⁾ -165 ⁽¹⁾
Boudin d'hélophytes		10 ⁽³⁾ -30 ⁽²⁾	20-30 ⁽³⁾	50 ⁽³⁾ -60 ⁽¹⁾
Clayonnages		10 ^(2,3)	10-15 ⁽³⁾	10 ⁽³⁾ -120 ⁽¹⁾
Fascines		20 ⁽³⁾ -60 ⁽²⁾	50 ⁽³⁾ -60 ⁽³⁾	80 ⁽²⁾ -250 ⁽⁴⁾
Saules			50-70 ⁽⁴⁾	100-140 ⁽⁴⁾
Plantation d'arbre		20 ⁽²⁾		120 ⁽²⁾
Lit de plants et plançons		20 ^(2,3)	120 ⁽³⁾	140 ^(2,3)
Couche de branches à rejet		50 ^(2,3) -150 ⁽³⁾	150 ⁽³⁾ -300 ⁽³⁾	300 ^(2,3) -450 ⁽³⁾
Caissons végétalisés		500 ⁽³⁾	600 ⁽³⁾	600 ⁽³⁾
Enrochements	Végétalisés	100 ⁽³⁾ -200 ⁽²⁾	100 ⁽³⁾ -300 ⁽³⁾	300 ⁽²⁾ -350 ⁽³⁾
	Nus	250 ⁽²⁾	250 ⁽²⁾	250 ⁽²⁾

1 : Faber 2004 ; 2 : Schiechl et Stern 1996 ; 3 : Venti *et al.* 2003 ; 4 : Lachat 1994.

Ces valeurs ont ensuite été analysées et mises en perspective par rapport à la situation actuelle et aux dangers présents aux abords de la zone d'étude. Cette analyse a été enrichie par les contributions de plusieurs experts des agences ACTIERRA Tours et ACTIERRA Aix-en-Provence. En combinant leurs avis,

en recoupant leurs opinions et en intégrant mes propres connaissances et analyses, nous avons pu aboutir à l'analyse présentée ci-dessous.

Il a été défini que les aménagements proposés par BRL, incluant des fascines en pied de berges et des couches de branches à rejet sur le talus, offraient une protection suffisante sur les cinq tronçons face aux forces tractrices calculées. Cependant, leur efficacité dépend du développement des végétaux : il faut compter 1 à 2 ans pour les couches de branches à rejet et 3 à 4 ans pour les fascines afin d'avoir une protection suffisante. Ce délai était à considérer pour choisir une technique de protection de berge, car les fascines pouvaient poser un risque de stabilité en cas de forte crue durant les trois premières années suivant leur installation.

De manière plus générale, il a été observé que le renforcement de berge uniquement par technique végétale repose entièrement sur la capacité des végétaux à s'implanter et se développer dans le talus. Or, les enjeux humains à proximité ont été jugés très importants et ont présenté un risque imminent : sur certaines parties du linéaire, le haut de berge abrupte en rive gauche se situait à une distance dangereusement proche des habitations.

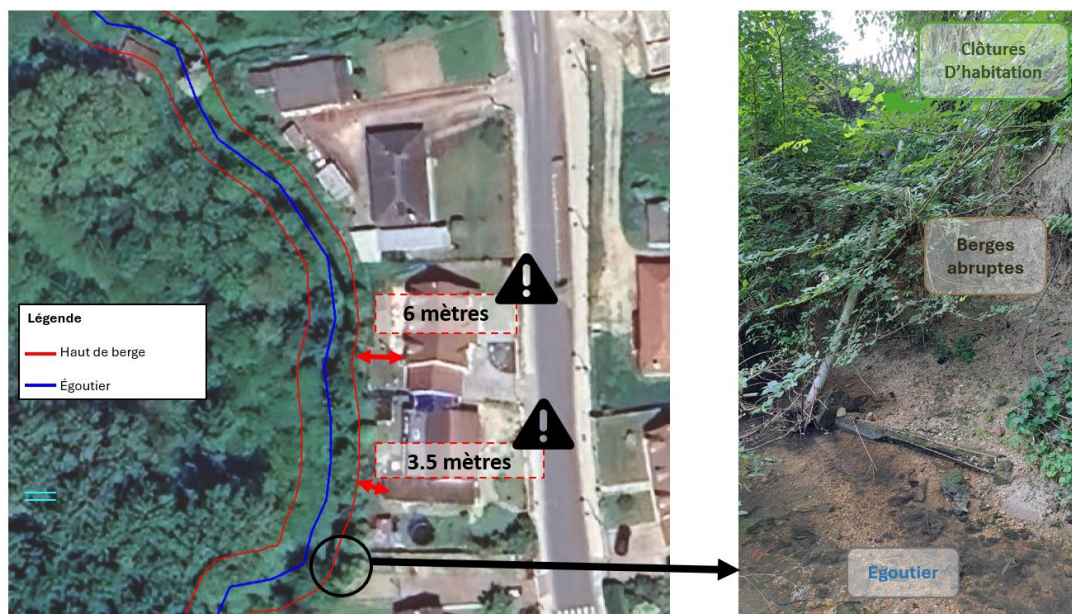


Figure 16 : Visualisation de la proximité des habitations par rapport aux berges à risque de la zone d'étude

Au regard de l'érosion qui menaçait la stabilité des habitations proches, et au temps nécessaire à la bonne fonctionnalité des aménagements, **il a été jugé que la proposition de stabilisation des berges par technique végétale n'est pas adaptée au site d'étude et à ses enjeux.**

Une protection de berge efficace dès sa mise en place et pérenne dans le temps a été jugée nécessaire pour garantir la sécurité des biens et des personnes.

Personnellement, j'ai été quelque peu perturbé par la décision de l'entreprise BRL de proposer un aménagement incertain pour répondre à des problématiques urgentes liées à la sécurité des habitants et de leurs biens. Il me semblait crucial de prioriser des solutions sûres et pérennes, surtout lorsque la sécurité des personnes est en jeu.

6.3 Proposition d'aménagement

Étant donné que l'aménagement EGOUBerge, proposé par BRL en 2021, a été jugé **inadapté à la situation actuelle**, un autre aménagement a été proposé à la place.

6.3.1 Choix de techniques d'aménagements

Afin de définir les techniques d'aménagement les plus pertinentes, plusieurs méthodologies ont été adoptées :

- Une recherche bibliographique sur les types d'aménagements de protection de berge en technique minérale existants.
- La consultation d'experts des agences ACTIERRA de Tours et Aix-en-Provence pour recueillir leurs avis.
- Une analyse par tronçons, en utilisant les valeurs de force tractrice de chaque tronçon pour évaluer la pertinence d'un aménagement uniforme sur l'ensemble de la zone d'étude.
- La prise en compte des contraintes budgétaires et logistiques liées à chaque option d'aménagement.

Après application de ces méthodologies, il a été décidé de mettre en place deux systèmes de protection de berge le long de la zone d'étude :

- ▶ Sur l'entièreté du linéaire d'étude, sauf au droit du méandre aval (80 m), un aménagement mixte minéral / végétal a été proposé. Celui-ci comprenait des enrochements en pied de talus et des lits de branches à rejet de saule en haut de talus.
- ▶ Au droit du méandre aval (linéaire de 17 m), un aménagement minéral a été proposé. Celui-ci comprenait la mise en place de Gabions sur le talus (casiers en fer remplis de pierres), reposants sur un matelas RENO (structure métallique **flexible** remplie de pierres).



Figure 17 : Linéaire des solutions proposées

Le premier aménagement choisi s'est avéré le plus pertinent, car il combine technique minérale et végétale. En pied de berge, l'utilisation d'enrochements assure une solution pérenne et procure une sécurité immédiate. Parmi les techniques minérales analysées, celle-ci s'est démarquée par sa facilité de mise en place et son faible coût. En haut de talus, l'aménagement végétal est le même que celui proposé par BRL car suffisamment efficace sur le long terme. De plus, il apporte une dimension

écologique, favorisant la protection de l'environnement, de la biodiversité et la préservation de la ripisylve.

Initialement, nous avions prévu d'implanter cet aménagement sur l'ensemble du linéaire, mais cela nécessitait une pente suffisamment douce pour permettre l'installation de la technique végétale notamment. Cependant, il était impossible d'obtenir une pente assez douce dans le méandre aval de la zone d'étude, car la berge y était trop abrupte. Nous avons envisagé des idées de retalutage de la berge, mais cela impliquait soit de prendre du terrain derrière la berge, entraînant une perte de foncier pour le propriétaire, soit de déplacer le lit mineur pour gagner de la place du côté du cours d'eau. Ces options ont été jugées impraticables : la première à cause des coûts excessifs et la perte de terrain pour les propriétaires, et la seconde en raison de l'impossibilité de modifier le tracé du cours d'eau selon le client du projet. En conséquence, nous avons proposé cet aménagement pour tout le linéaire, sauf au droit du méandre aval.

Le second aménagement a été choisi pour sa capacité à optimiser l'espace, les gabions pouvant s'empiler et ainsi réduire l'emprise au sol. Cette solution permettait également d'éviter le retalutage de la berge, évitant ainsi les contraintes liées à l'espace disponible. Les gabions offraient aussi une protection efficace et durable sur toute la hauteur de la berge. Leur stabilité a été renforcée par la proposition d'utilisation d'un matelas RENO, placé sous les gabions pour assurer leur ancrage et protéger la berge contre les forces d'affouillement (érosion en bas de berge provoquée par l'arrachement des particules par le courant). Au niveau du méandre aval, où la berge était particulièrement exposée à l'érosion et à l'effondrement, cette technique s'est révélée la plus pertinente en raison de sa faible emprise au sol et de son efficacité immédiate.

Personnellement, j'ai trouvé très intéressante la démarche de choix d'un aménagement. Les problématiques rencontrées ont démontré l'importance de prendre en compte tous les aspects lors de la réflexion sur la mise en place d'un aménagement, notamment les aspects fonciers, c'est-à-dire l'impact sur les terrains des habitants et les conséquences pour les propriétaires. Il faut également considérer les aspects financiers, car proposer une solution trop coûteuse ne sera jamais acceptée par les clients. De plus, les aspects écologiques et environnementaux sont cruciaux, car un projet répondant à des critères environnementaux peut bénéficier de subventions. Il est essentiel de penser à tous ces éléments pour garantir l'acceptabilité et la viabilité d'un aménagement.

6.3.2 Préparation de coupes de principe

Afin de présenter correctement les aménagements proposés, il a été décidé de préparer des coupes de principe. Ces coupes ont pour but de représenter et de visualiser les différentes parties d'un ouvrage. Les dimensions ne sont pas finales et la coupe ne constitue pas un plan, il s'agit simplement de montrer le principe de l'aménagement.

Ces coupes ont été réalisées sur le logiciel Autocad et ont été présentées à plusieurs reprises à d'autres experts d'ACTIERRA pour vérifications et avis. Ainsi, elles ont pu être correctement représentées et il a pu être certifié qu'elles étaient complètes et cohérentes. Elles sont présentées en **Erreur ! Source du r envoi introuvable.** et Annexe 3.

En effet, c'était la première fois que je produisais ce type de coupe, et elles étaient d'une grande importance : ces coupes allaient être présentées au client, mais aussi aux élus de la commune de Semoy, ainsi qu'aux riverains et propriétaires des berges concernées. Ce type de présentation est toujours très délicate. Il faut donc s'assurer que les coupes produites soient les plus compréhensibles, complètes et pédagogiques possible.

Les coupes produites sont complètes : tous les éléments des aménagements y sont représentés. Bien qu'il s'agisse de coupes de principe, les dimensions indiquées sont réalistes. Les dimensions finales seront calculées dans les phases ultérieures du projet, si celui-ci est accepté. En effet, pour ce projet, il s'agissait de la phase initiale, à savoir la phase de faisabilité. Les coupes et plans issus de cette phase ne sont pas définitifs. Pour une phase de faisabilité, les coupes de principe produites sont pertinentes et suffisantes.

6.3.3 Chiffrage de l'aménagement

Pour terminer la proposition d'un nouvel aménagement, le chiffrage de celui-ci était essentiel. Il consiste à estimer le coût de chaque aspect et étape de la mise en place de l'aménagement, qu'il s'agisse du prix estimatif pour la production de documents réglementaires, du transport des matériaux, de l'installation des différentes parties de l'aménagement, ou encore du suivi post-installation. Ce chiffrage doit être à la fois clair et pédagogique, afin de permettre au client de rapidement comprendre les coûts finaux ainsi que ceux de chaque élément spécifique.

Il était également essentiel de présenter des montants cohérents, car le chiffrage est souvent l'un des critères décisifs pour l'acceptation ou le rejet d'un projet. De plus, les maîtres d'ouvrage s'appuient fréquemment sur ces estimations pour formuler des demandes de subventions dans les phases préliminaires du projet, comme la phase de faisabilité. Ces subventions étant basées sur les estimations initiales, tout dépassement du budget chiffré peut compromettre la réalisation des travaux, et/ou nécessiter une justification rigoureuse de l'augmentation des coûts.

Tableau 7 : Chiffrage de l'aménagement proposé

Poste	Coût
Etudes	
Etudes MOE	25 000.00 €
Etude géotechnique PRO	7 000.00 €
Réglementaire	
DLE Déclaration	7 500.00 €
Dossier cas par cas	5 000.00 €
Déclaration d'Intérêt général	5 000.00 €
Demande d'autorisation de défrichement	3 500.00 €
Travaux	
Travaux préparatoires (défrichement accès chantier...)	15 000.00 €
Installation de chantier	25 000.00 €
Mesure d'exploitation sous chantier	15 000.00 €
Déblai & évacuation en décharge	7 500.00 €
Stockage temporaire de terre végétale (transport)	6 000.00 €
Pose d'un géotextile sous les enrochements	3 500.00 €
Pose d'une couche de transition sous les enrochements	13 500.00 €
Pose d'enrochements	36 000.00 €
Pose de matelas RENO	600.00 €
Pose d'un géotextile sous les gabions	400.00 €
Pose des gabions	9 500.00 €
Remblaiement à l'arrière des aménagements	6 000.00 €
Pose d'un géotextile biodégradable sous les lits de branches à rejet	6 000.00 €
Pose de lits de branches à rejet	54 000.00 €
Sous-total travaux	198 000.00 €
Aléa travaux (20%)	39 600.00 €
Total	287 100.00 €

Pour élaborer le chiffrage du projet proposé, des informations tarifaires ont été recueillies auprès d'experts d'Actierra des agences de Tours, Aix-en-Provence, et Rueil-Malmaison. L'objectif était de bénéficier des avis de personnes ayant déjà mené à bien des projets similaires ou étant expérimentées dans ce type de chiffrage.

Parmi les données collectées, certaines étaient exprimées en prix unitaires (pour les études, les dossiers réglementaires, les mesures d'exploitation sous chantier), tandis que d'autres étaient calculées au prorata du coût total (par exemple, le coût d'installation du chantier représente environ 16 % du coût total). Le chiffrage des différents éléments de l'aménagement était à calculer selon les quantités de ceux-ci. Il a donc fallu estimer les surfaces de tous les éléments **à poser** : Par exemple, la surface nécessaire pour la pose des enrochements a été calculée en multipliant la largeur estimée de ces derniers par la longueur du linéaire de l'aménagement. De même, le volume de terre à déblayer a été déterminé en additionnant les volumes des gabions, des enrochements et du matelas RENO, puisque ces éléments seront intégrés dans le sol.

Le chiffrage proposé est cohérent, et chaque tarif a été validé par un expert ayant déjà réalisé un ou plusieurs projets similaires. Toutefois, certains montants restent incertains, en particulier ceux liés au calcul des surfaces et volumes d'installation des aménagements, qui devront être affinés dans les phases ultérieures du projet, si celui-ci est accepté. Néanmoins, la précision du chiffrage est tout à fait cohérente pour une phase de faisabilité.

Enfin, il est évident que le montant total est élevé, ce qui a soulevé des préoccupations lors de la présentation au client. À titre de comparaison, le chiffrage proposé par BRL pour l'aménagement EGOUBerge est environ 100 000 euros moins cher. Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs : l'inflation entre 2021 et 2024, et le fait que plusieurs éléments n'ont pas été pris en compte dans l'estimation de BRL (coûts des études préliminaires, coûts des documents réglementaires...) Ainsi, notre chiffrage est plus complet et reflète un coût total plus réaliste.

7. Réunion publique de présentation

La dernière phase du projet a été la conduite d'une réunion publique de présentation de celui-ci. Celle-ci a eu lieu lundi 13 mai à Semoy, et a réuni :

- Le client du projet, maître d'ouvrage à Orléans Métropole ;
- Le maire de la commune de Semoy ;
- Un élu d'Orléans Métropole ;
- Les riverains, propriétaires des berges concernées par le projet.

Au cours de cette réunion, j'ai eu l'opportunité, aux côtés de ma tutrice de stage, Mme Ferlay, de présenter aux personnes présentes l'étude réalisée ainsi que les aménagements proposés. Cette expérience m'a permis de me familiariser avec la conduite de réunions publiques, en particulier en présence d'élus et d'autres parties prenantes du projet.

J'ai pu exposer directement aux intéressés le travail que j'avais fourni, ce qui m'a permis d'apprendre à animer ce type de réunion avec la sensibilité nécessaire. Il était en effet important de présenter l'aménagement de manière pédagogique, sachant que les participants, en particulier les riverains, ne sont pas nécessairement familiers avec les domaines de l'aménagement ou de l'hydraulique. Il a donc fallu veiller à ce que chacun comprenne bien les enjeux de l'aménagement sur sa propriété. De plus, beaucoup de tact était requis, car proposer des aménagements impactant les propriétés des riverains est une tâche délicate.

La réunion s'est très bien déroulée et a constitué pour moi une excellente opportunité de présenter mon travail en public et de participer à un type de réunion qui joue un rôle essentiel dans le domaine de l'ingénierie.

Conclusion

La mission principale que j'ai effectuée au sein d'ACTIERRA Tours a permis de conclure à la non-faisabilité de l'aménagement EGOUBerge, proposé par BRL en 2021. Cette conclusion a été établie à partir de l'analyse des forces de traction exercées sur l'aménagement envisagé, une analyse rendue possible grâce aux résultats obtenus par modélisation hydraulique. Pour ce faire, nous avons modifié le modèle initial de BRL en y intégrant des éléments topographiques récents. Face à l'impossibilité de mettre en œuvre l'aménagement initial, un nouvel aménagement a été proposé, incluant notamment des techniques minérales. Ce choix garantit une sécurité immédiate, d'autant plus nécessaire que les enjeux humains sont importants, avec des habitations situées à proximité des berges de l'Égoutier.

À la suite de la présentation publique du projet, celui-ci est désormais en attente d'acceptation par le client. Si ce projet est validé, les phases suivantes pourront débuter, ouvrant la voie à un appel d'offres pour la maîtrise d'œuvre et la réalisation des travaux.

Ce projet m'a permis de développer de nombreuses compétences. La phase d'étude de faisabilité m'a notamment permis de maîtriser les modèles 1D/2D sur HEC-RAS, un logiciel de modélisation largement utilisé. J'ai appris à calculer les forces tractrices, à exploiter les résultats de modélisation pour ces calculs, et à produire une analyse critique de l'aménagement proposé en tenant compte des contraintes spécifiques du site d'étude. Par la suite, j'ai également appris à concevoir et proposer un aménagement pertinent, en prenant en compte divers critères tels que les contraintes du site, le coût, la pérennité de l'aménagement, et la possibilité d'accès à des subventions. Enfin, j'ai pu produire des supports de présentation des ouvrages, et présenter publiquement le travail effectué ainsi que l'aménagement proposé, en présence d'élus et des propriétaires concernés.

Les méthodes utilisées dans ce projet peuvent être sujettes à critique. L'utilisation de la modélisation 1D/2D est souvent évitée dans ce type d'étude en raison des erreurs possibles et de la complexité de stabiliser un tel modèle. Les instabilités du modèle ont d'ailleurs nécessité des modifications qui ont pris beaucoup de temps. Néanmoins, l'analyse des forces tractrices s'est révélée très pertinente pour ce projet, qui traite de problématiques d'érosion. Initialement, il a été voulu d'inclure les forces d'affouillement pour mieux dimensionner les aménagements, mais les calculs ont été abandonnés faute d'informations sédimentologiques suffisantes. Une étude sédimentaire future pourrait permettre de dimensionner plus précisément les aménagements de gabions et d'enrochement proposés.

De manière générale, ce stage au sein d'ACTIERRA Tours a été une expérience très enrichissante. Il m'a permis de me familiariser avec le travail d'ingénieur en bureau d'études, en développant non seulement des compétences techniques (maîtrise de logiciels, production de rapports...), mais aussi une compréhension de la méthodologie propre aux bureaux d'études, notamment en ce qui concerne les réponses aux appels d'offres et la gestion simultanée de plusieurs projets. Les missions annexes que j'ai réalisées m'ont également permis d'acquérir des compétences supplémentaires, telles que la modélisation 1D et la création de documents réglementaires PPRI. J'ai également pu découvrir d'autres domaines, comme l'assainissement dans le cadre du projet de réutilisation d'eau pluviale.

Aujourd'hui, cette expérience confirme que j'ai fait le bon choix d'orientation professionnelle et m'aide à affiner mon projet de carrière. À l'issue de ce stage, ACTIERRA Tours m'a proposé un poste en CDI, que j'ai accepté en juillet. Je vais ainsi pouvoir continuer à découvrir le monde des bureaux d'études au sein de cette entreprise, en poursuivant notamment le dernier projet sur lequel j'ai travaillé, à savoir la révision du PPRI de l'Ornel.

Bibliographie

BRL Ingénierie. (2021). Étude de confortement de berge sur l'égoutier, commune de Semoy. *Phase 1 – Étude de faisabilité*.

Epteau (J. R. Malavoi). (1998). *Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau, N°2*.
<https://side.developpement-durable.gouv.fr/ACCRDD/doc/SYRACUSE/153787/determination-de-l-espace-de-liberte-des-cours-d-eau-n-2>

Lachat, B. (1994). *Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales*.

Mitasova, H., Mitas, L. (1999). Modeling Soil Detachment with RUSLE 3D Using GIS. University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, Urbana.

Oliver, M. A. (1990). Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems*, n°4. p313-332.

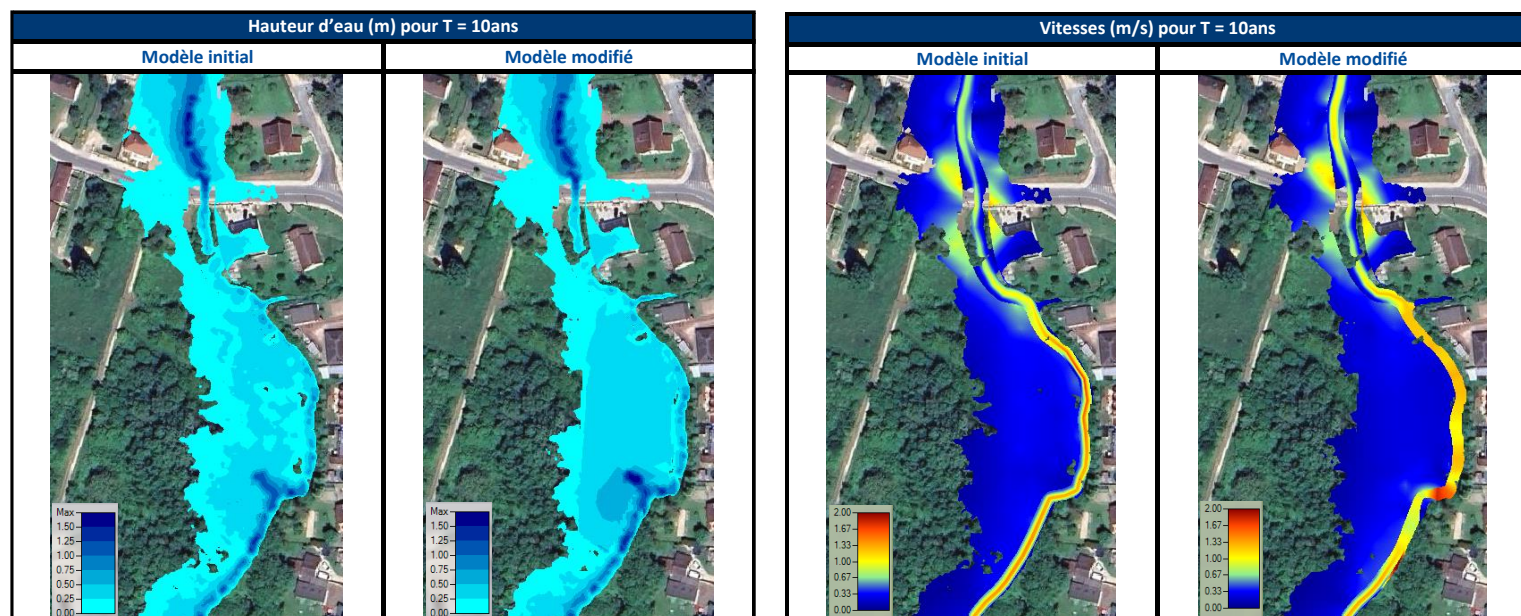
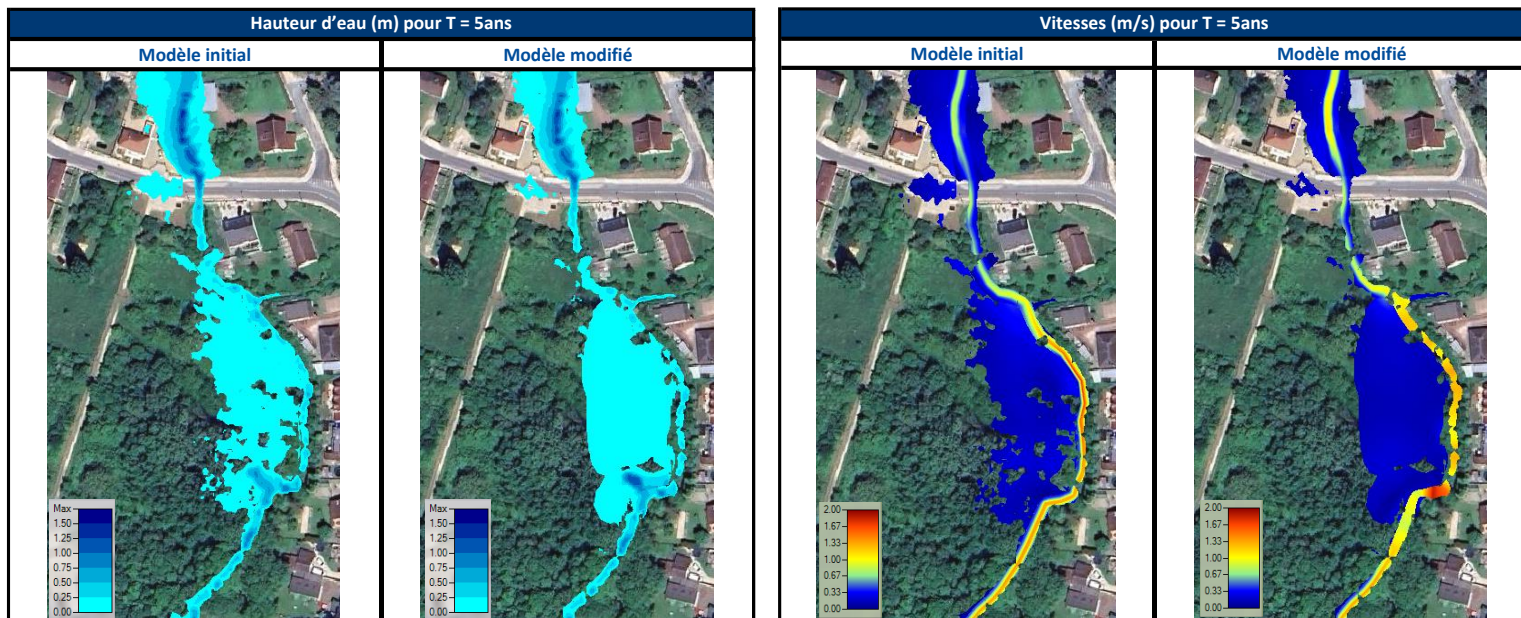
QGIS Documentation. Chapitre 11 : Analyse Spatiale (Interpolation). Consulté 20 juillet 2024, à l'adresse
https://docs.qgis.org/3.34/fr/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html

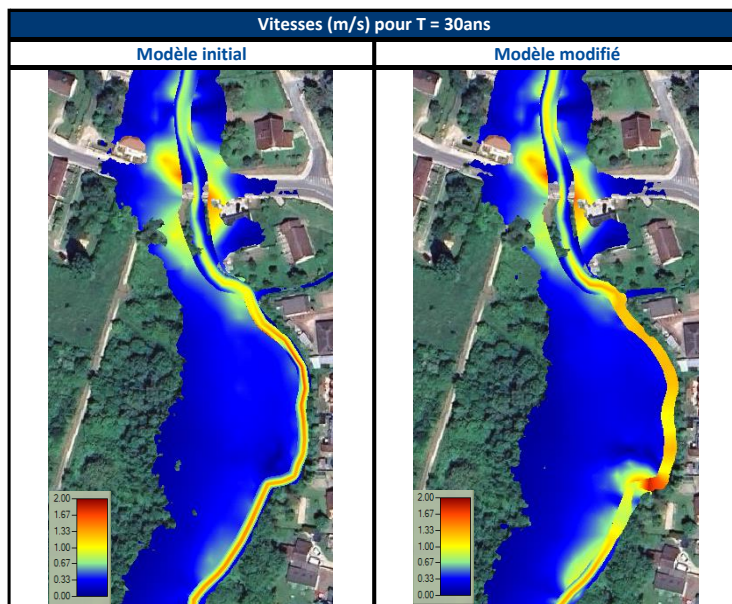
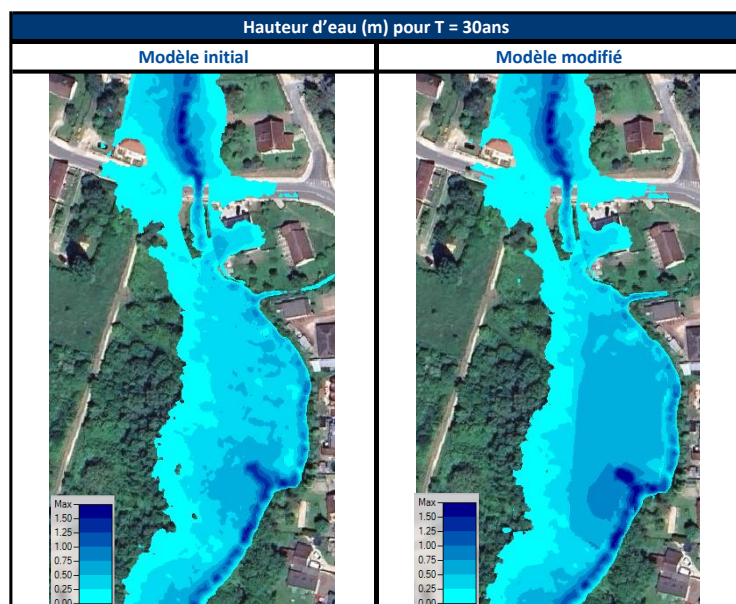
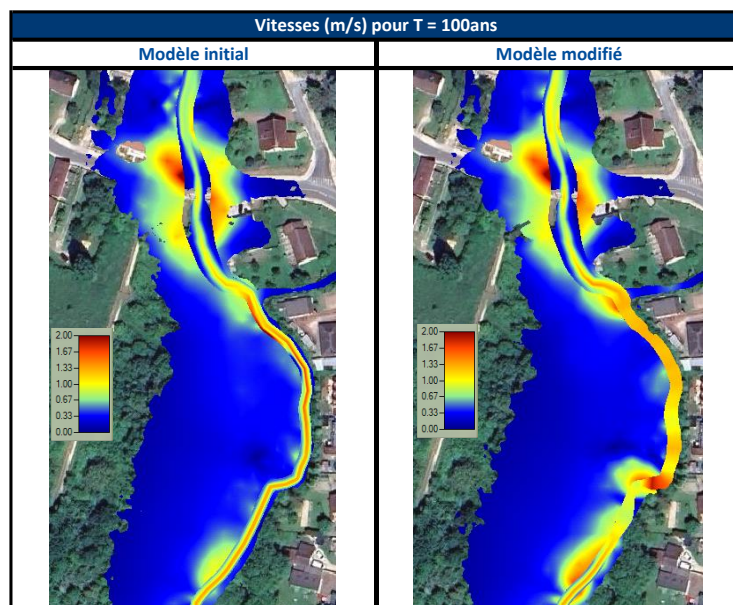
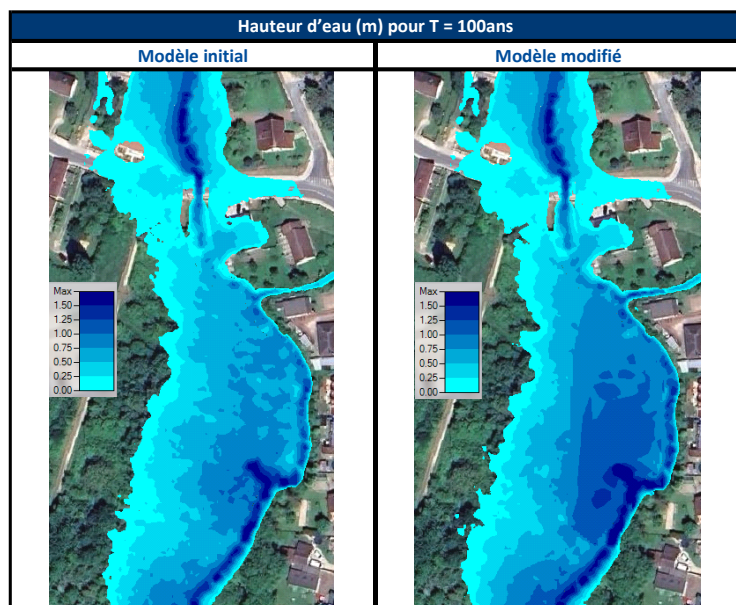
USACE Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS Mapper User's Manual. *Lateral Structures*. (s. d.). Consulté 19 juillet 2024, à l'adresse
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rmum/latest/geometry-data/lateral-structures>

USACE Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS Mapper User's Manual. *Stage and Flow Hydrographs*. (s. d.). Consulté 18 juillet 2024, à l'adresse
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest/viewing-results/stage-and-flow-hydrographs>

Annexes

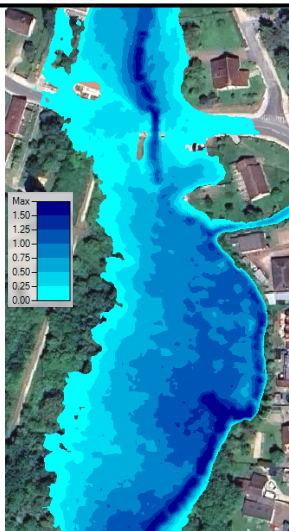
Annexe 1 – Atlas cartographique des résultats de modélisation et comparaison avec ceux de BRL



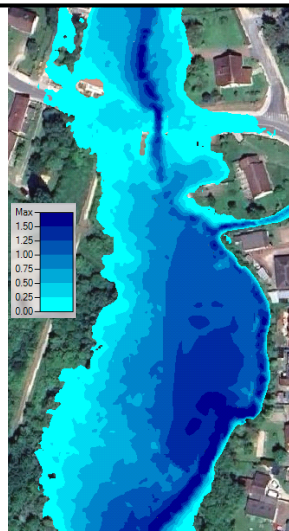


Hauteur d'eau (m) pour T = 200ans

Modèle initial

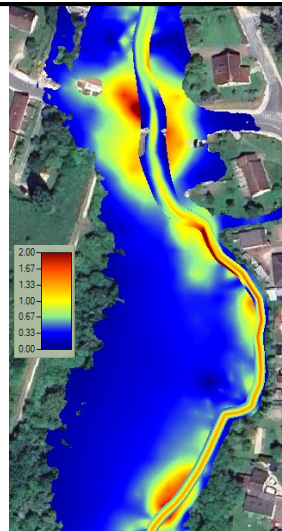


Modèle modifié

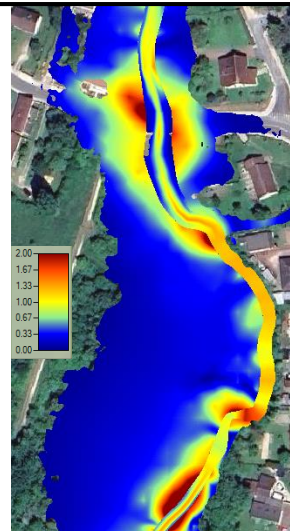


Vitesses (m/s) pour T = 200ans

Modèle initial

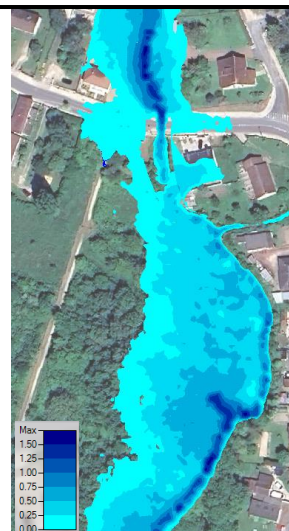


Modèle modifié

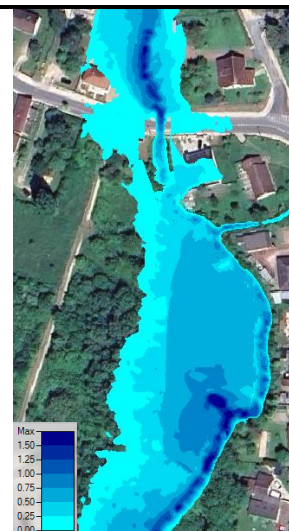


Hauteur d'eau (m) pour la crue de 2016

Modèle initial

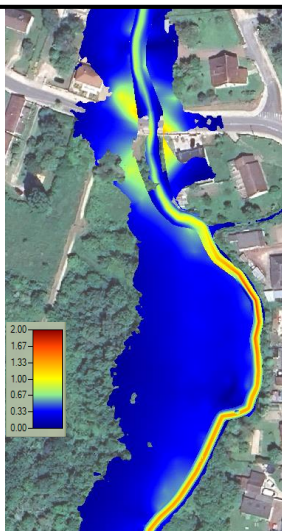


Modèle modifié

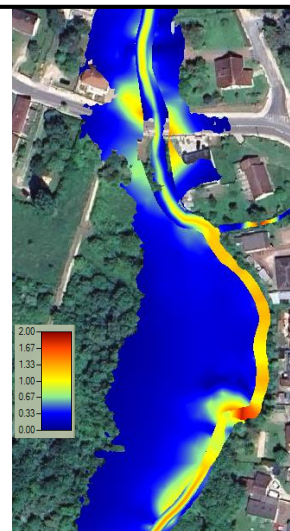


Vitesses (m/s) pour la crue de 2016

Modèle initial



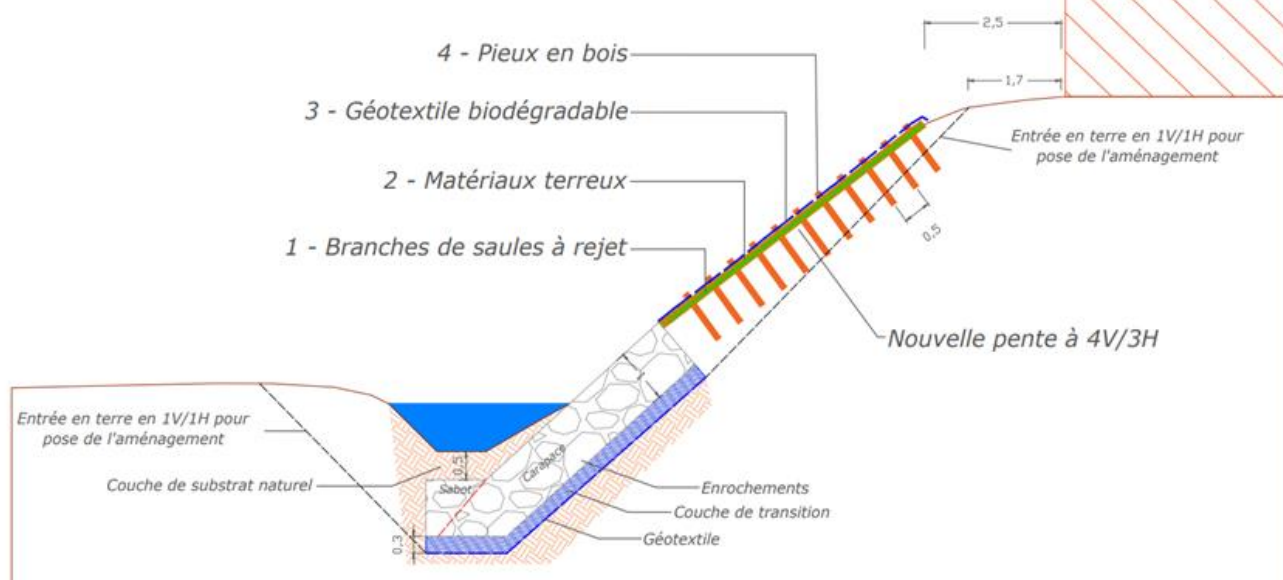
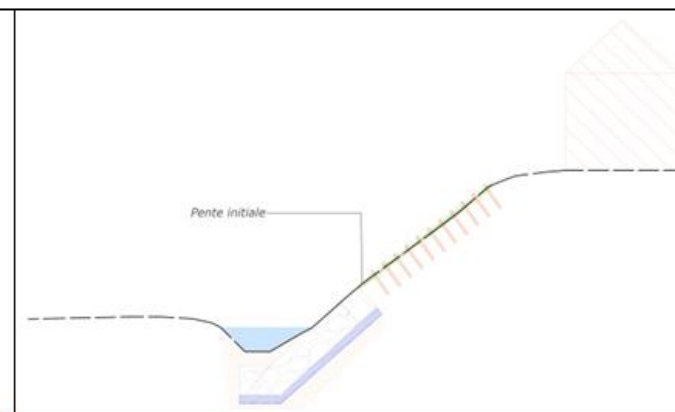
Modèle modifié



Annexe 2 – Coupe d'ouvrage n°1 – Aménagement mixte d'enrochements et de lit de branche à rejet

Solution proposée | INGEROP

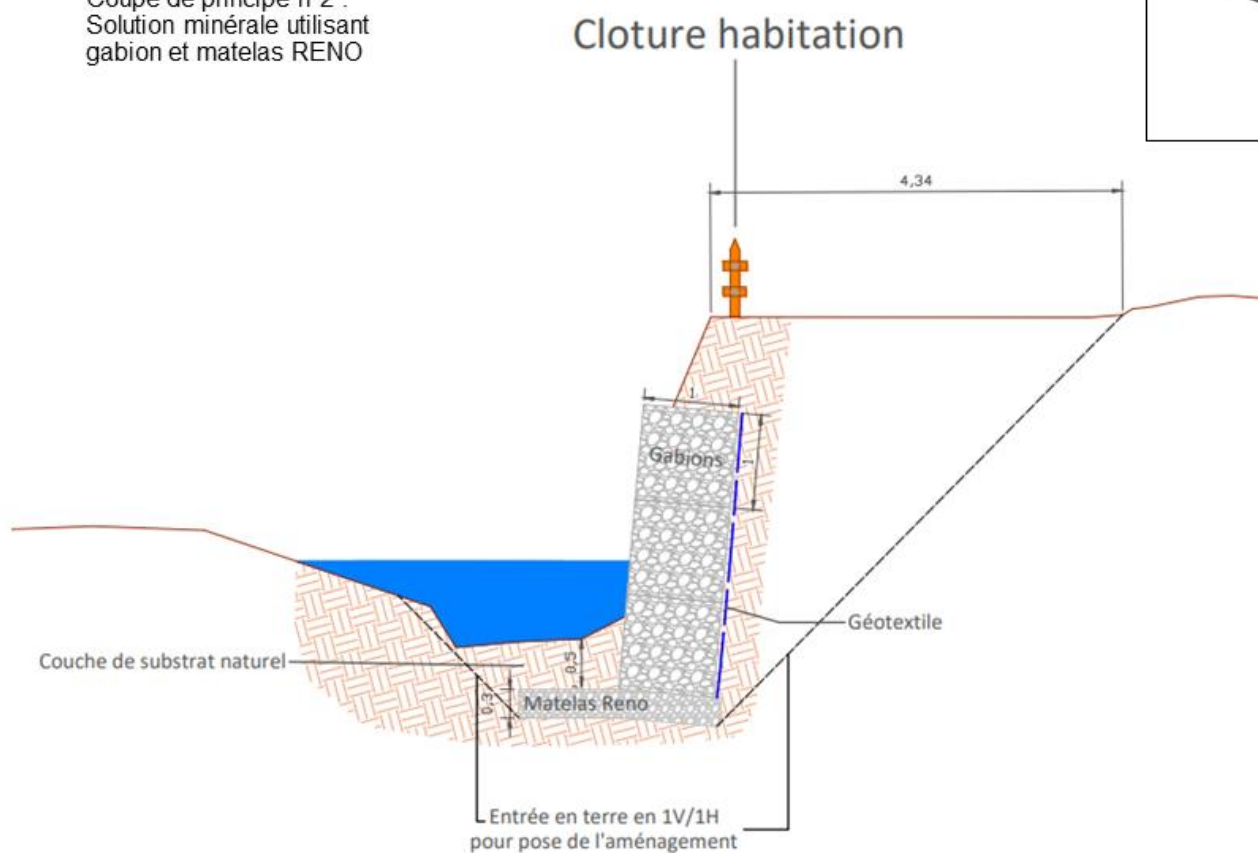
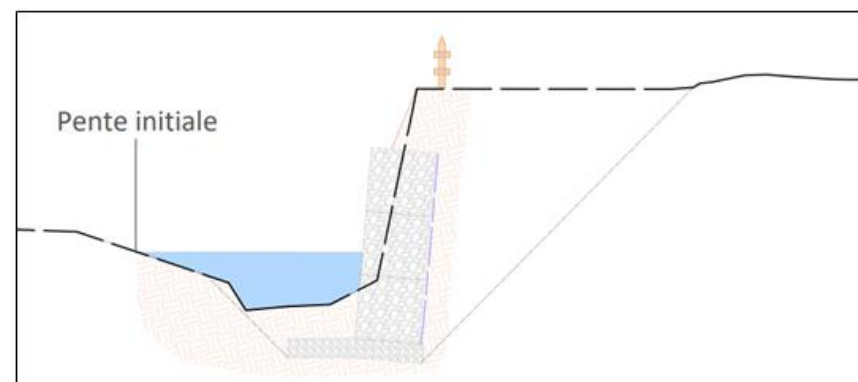
Coupe de principe n°1 :
Solution mixte d'enrochements
et de lits de branches de saule à rejet



Annexe 3 – Coupe d'ouvrage n°2 – Aménagement de gabions disposés sur un matelas RENO

Solution proposée | INGEROP

Coupe de principe n°2 :
Solution minérale utilisant
gabion et matelas RENO





POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Étude de faisabilité d'un aménagement de protection de berge
sur le territoire d'Orléans Métropole.

Cédric Debrabant
[Étudiant]
2023-2024

Résumé :

La mission principale réalisée a porté sur l'étude de faisabilité d'un aménagement de protection de berge proposé par le bureau d'études BRL en 2021, en réponse aux problèmes d'érosion de la rivière de l'Égoutier, dans une zone d'étude située dans la commune de Semoy (45400). L'étude de faisabilité a consisté à calculer les forces tractrices s'exerçant sur les berges de la zone d'étude, en utilisant les vitesses d'écoulement issues de modélisation d'un modèle créé par BRL en 2021, que nous avons modifié en y intégrant des données topographiques récentes. Il a été conclu que l'aménagement n'était pas adapté aux contraintes du site, en particulier en raison de la proximité des habitations, et de la protection non sûre et non immédiate de l'aménagement proposé. Un aménagement plus approprié a donc été proposé, combinant des techniques végétales et minérales pour assurer une protection à la fois immédiate et durable. Enfin, l'étude et la nouvelle proposition d'aménagement ont été présentées lors d'une réunion publique.

Mots Clés : faisabilité, modélisation, hydraulique, aménagement, érosion, forces tractrices.

Abstract:

The main mission carried out was to study the feasibility of a riverbank protection arrangement proposed by the BRL research department in 2021, in response to the erosion problems of the Égoutier river, in an area of study located in the municipality of Semoy (45400). The feasibility study consisted of calculating the tractive forces on the banks of the study area, using flow velocities from a hydraulic model created by BRL in 2021, which we modified by incorporating recent topographic data. It was concluded that the arrangement was not appropriate to the site constraints, particularly due to the proximity of nearby houses and the non-immediate and unsafe protection of the proposed arrangement. A more appropriate arrangement has therefore been proposed, combining plant and mineral techniques to ensure both immediate and lasting protection. Finally, the study and the new development proposal were presented at a public meeting.

Keywords: feasibility, modelling, hydraulic, arrangement, erosion, traction forces.

ACTIERRA TOURS
32 Rue Gutenberg
37300 Joué-lès-Tours

Tuteur entreprise
Élise FERLAY
Chargée d'études

Tuteur académique
Pierre PEETERS