



HAL
open science

Modélisation bidimensionnelle d'un projet de restauration hydromorphologique sur la Fecht

Anne Watteaux

► **To cite this version:**

Anne Watteaux. Modélisation bidimensionnelle d'un projet de restauration hydromorphologique sur la Fecht. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. dumas-01583056

HAL Id: dumas-01583056

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01583056>

Submitted on 6 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Modélisation bidimensionnelle d'un projet de renaturation hydromorphologique sur la Fecht

Anne Watteaux

2015



**Travail de fin d'études pour l'obtention du titre :
Ingénieur diplômé de l'ENGEES**

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Nicolas KREIS, mon maître de stage, pour m'avoir permis de faire ce stage avec lui, et surtout pour son suivi, la relecture de mon mémoire et ses précieux conseils.

Je tiens également à remercier tout particulièrement Olivia GUAZARIAN, adjointe au chef de Service Rivières et Barrages, pour sa gentillesse, sa patience et le temps qu'elle a consacré pour m'aider dans mes multiples problèmes, et ce malgré son emploi du temps très chargé.

Mes remerciements vont également à Pascal FINAUD-GUYOT, maître de conférence en hydraulique et modélisation numérique au Laboratoire ICUBE et à l'ENGEES, qui m'a très gentiment apporté son aide et donné de précieux conseils dans un moment où je ne pensais plus m'en sortir, à Guillaume CHATTON, technicien sécurité routière, pour m'avoir aidée à réaliser une partie de la topographie, ainsi qu'à Thibaut MAZARD, informaticien au Département, pour avoir résolu avec patience mes problèmes informatiques très réguliers.

Merci également à Michel-André BRICE, chef de service de l'Unité d'exploitation des ouvrages hydrauliques, pour nous avoir gentiment proposé de visiter le barrage de Kruth et avoir partagé son expérience avec nous, ainsi qu'à Virginie CONRAD, technicienne rivières, pour avoir pris le temps de m'accompagner sur la Fecht.

Je souhaite également remercier particulièrement Delphine LACUISSE, chargée d'études globales DCE, notamment pour son aide et ses conseils, ainsi que Léa SIMERAY et Guillaume NUTI, stagiaires au Conseil départemental dans la même période, Hervé NOMA, chargé de missions assainissement non collectif, et Lydia RAZAFINDALAY, technicienne milieux naturels, pour leur soutien, leur aide technique aux moments critiques et pour avoir rendu ce stage plus qu'agréable.

Je tiens finalement à remercier chaleureusement l'ensemble de la Direction de l'Environnement et du Cadre de Vie pour leur accueil, leur prévenance et leur bonne humeur, et particulièrement Florise GSELL et Marie ZIMMERMANN, secrétaires du Service Rivières et Barrages pour leur gentillesse et l'attention qu'elles m'ont porté.

Enfin merci à mon compagnon pour son soutien, sa patience et son aide pendant ces longues heures de travail.

RÉSUMÉ

Le Conseil départemental du Haut-Rhin a en charge la gestion et l'entretien des cours d'eau sur son territoire et doit conformément à la Directive Cadre sur l'Eau mettre en œuvre des projets de renaturation afin de rétablir un bon état écologique sur ces masses d'eau. Ainsi ont été développées des études globales visant notamment à restaurer les fonctions hydromorphologiques en vue de rétablir la qualité physique des cours d'eau. Cette étude s'inscrit dans ce contexte et se base sur le projet de restauration en cours sur la Fecht. Cette rivière est classée en état « pas bon » du fait des nombreux aménagements qui contraignent sa dynamique.

L'hydromorphologie étant une science complexe, il est souvent difficile de prévoir clairement les effets à long terme d'interventions de renaturation, surtout lorsqu'il existe des enjeux d'inondation. Il s'agit dans cette étude de tester les possibilités de la modélisation hydraulique bidimensionnelle pour prévoir à court et à long terme les impacts d'une intervention sur la morphologie du cours d'eau.

Une méthodologie a été développée pour répondre à cet objectif, en se basant sur le calcul des forces tractrices en tout point du secteur à partir des variables calculées par un modèle hydraulique bidimensionnel. La situation actuelle, puis deux scénarii de restauration ont été testés.

Le modèle a montré une bonne propension à décrire le fonctionnement hydromorphologique de la situation, malgré qu'un calage se soit révélé impossible. Il a de plus permis de donner des indications cohérentes et relativement précises des modifications des paramètres morphologiques à court terme, et montré des possibilités intéressantes sur le long terme, bien que les résultats doivent être nuancés au regard de la précision de l'outil et de sa sensibilité aux éléments inhérents à sa construction.

ABSTRACT

The Conseil départemental du Haut Rhin is in charge of the waterway maintenance in its territory and has, according to the Water Framework Directive, to implement restoration programs, in order to restore the good ecological state of the waterway system. Therefore global studies have been developed with the aim to restore the hydro-morphological functions in order to recreate the physical quality of the waterway. This study has been developed in that particular context and is based on the current restoration program on the Fecht. This river is categorised in a “not good” state because of the huge number of installations that restrain its dynamic.

As hydromorphology is a very complex science, it's often very difficult to clearly predict the long term effects of restoration; moreover when flood risks are present. The aim of this study is to test the possibilities of hydraulic bi-dimensional modelling in order to foresee in both short and long terms the effects of an intervention on the waterway morphology.

A methodology has been developed to respond to that objective; it's based on the calculation of tractor forces at every point of the sector considering variables calculated by an hydraulic bi-dimensional model. The current situation and the two restoration scenarios have been tested.

The model has shown a great ability to describe the hydro-morphological functioning of the situation, even if a calibration was impossible. Moreover it was possible to give coherent and relatively precise indications of the short-term morphological parameters modifications. It was also possible to see long-term interesting possibilities even if the results have to be shaded because of the precision of the tool and because of its sensitivity to the construction parameters.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	3
RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	6
SOMMAIRE	7
LISTE DES FIGURES.....	9
LISTE DES TABLEAUX	10
SIGLES ET ABBREVIATIONS.....	10
GLOSSAIRE	10
INTRODUCTION.....	11
1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET PROBLEMATIQUE.....	13
1.1. La restauration hydromorphologique des cours d'eau, une problématique en fort développement	13
1.1.1. Une nécessité pour le bon état physique et plus largement pour la biodiversité aquatique	13
1.1.2. Une alternative aux protections usuelles contre les inondations ?	16
1.1.3. Les politiques actuelles et les textes réglementaires : des objectifs de qualité forts... ..	17
1.1.4. Les préconisations du SDAGE Rhin-Meuse.....	19
1.1.5. Le rôle du Conseil départemental du Haut-Rhin	21
1.2. Présentation de la zone d'étude - données disponibles.....	21
1.2.1. Présentation géographique de la Fecht	21
1.2.2. Diagnostic morphologique et bilan sur l'état physique actuel de la Fecht	23
1.2.3. Etudes antérieures, travaux récents et en projet	24
1.2.4. Données disponibles	26
1.3. Problématique et objectifs.....	26
2. OUTILS ET METHODES DE TRAVAIL.....	29
2.1. Outils existants.....	29
2.1.1. La modélisation hydraulique numérique	29
2.1.2. Evolution morphologique du lit - Quantification du transport sédimentaire	30
2.2. Démarche pour évaluer l'impact d'aménagements.....	34
2.2.1. Choix des situations tests	34
2.2.2. Hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement et risques liés aux inondations	35
2.2.3. Forces tractrices et évolution prévisible de la morphologie du lit.....	35
2.3. Méthode de travail pour la construction d'un modèle 2D	36
2.3.1. Présentation du logiciel TELEMAC 2D	36
2.3.2. Délimitation du secteur modélisé	37
2.3.3. Topologie et maillage du modèle - Représentation de la topographie du site.....	38
2.3.4. Prétraitement du modèle.....	43
2.3.5. Tests de sensibilité et vérification du modèle.....	44

3.RESULTATS ET DISCUSSIONS	49
3.1. Situation actuelle : fonctionnement hydrodynamique de la rivière	49
3.1.1. Fonctionnement actuel de la zone.....	49
3.1.2. Evolution morphologique prévisible sans intervention	52
3.1.3. Discussion quant à l'indépendance des zones de travail	52
3.2. Connexion d'anciens chenaux au niveau de la confluence avec la Weiss par ouverture locale des digues	55
3.2.1. Mise en place du modèle associé.....	55
3.2.2. Résultats et discussion	55
3.3. Création d'un deuxième bras par réouverture complète des anciens chenaux	59
3.3.1. Mise en place du modèle associé.....	59
3.3.2. Résultats et discussion	61
3.4. Discussion et perspectives	66
3.4.1. Possibilités et limites du modèle en termes purement hydrauliques.....	66
3.4.2. Possibilités et limites de la modélisation 2D en tant qu'outil d'aide à la décision en matière de restauration	67
3.4.3. Adéquation de la démarche utilisée.....	67
3.4.4. Perspectives.....	68
CONCLUSION.....	71
 BIBLIOGRAPHIE	 73

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Description du système fluvial (Source : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse)	13
Figure 2 : Balance de Lane d'après Recking, 2006 (Source : De Linares, 2007)	14
Figure 3 : Styles fluviaux (Source : Malavoi et Bravard, 2010). a) Méandrage b) Tressage c) Anastomose	15
Figure 4 : Zonation transversale des habitats en rivière d'après Lachat, 1991 (Source : Adam, Debiais, Gerber, Lachat, 2008)	15
Figure 5 : Localisation de la Fecht dans le Département du Haut Rhin	22
Figure 6 : Localisation de la zone d'étude sur la Fecht	22
Figure 7 : Etat des lieux, mobilité historique et enveloppes de mobilité au niveau de la confluence avec la Weiss	24
Figure 8 : Exemples d'aménagements en génie végétal a) Tenue de berge par la végétation sur fibre de coco b) Fascines de saules (Source : Frossard, 2009)	25
Figure 9 : Formes de transport solide (Source : Degoutte, 2006)	30
Figure 10 : Diagramme de Hjulström (Source : Malavoi et Bravard, 2010)	31
Figure 11 : Equilibre d'un grain au fond d'un chenal (Source : Degoutte, 2006)	31
Figure 12 : Localisation des deux secteurs d'intérêt pour les situations tests	35
Figure 13 : Représentation des profils en travers pour le traitement sous HEC-RAS	39
Figure 14 : Eléments du maillage (en turquoise le lit mineur, en rouge les lignes de rupture)	40
Figure 15 : Répartition des nœuds de maillage et des coefficients de Strickler au niveau de la confluence	41
Figure 16 : Comparaison entre la topographie réelle et la topographie du maillage	42
Figure 17 : Résultats des tests de sensibilité au regard de l'expansion de la crue. a) Simulation avec Ks-10 b) Simulation avec le modèle final c) Simulation avec Ks+10	46
Figure 18 : Résultats des tests de sensibilité au regard de la répartition de la dynamique morphologique. a) Simulation avec Ks-10 b) Simulation avec le modèle final c) Simulation avec Ks+10	47
Figure 20 : Résultats des variables de calcul hydraulique pour la situation actuelle. a) Hauteurs d'eau b) Vitesses moyennes	50
Figure 21 : Résultats de dynamique sédimentaire de la simulation pour la situation actuelle. a) Contraintes tractrices b) Ecart entre les contraintes tractrices et critiques	51
Figure 22 : Zone de dynamique sédimentaire avec mise en évidence d'écoulements privilégiés	52
Figure 23 : Comparaison du fonctionnement morphologique de la zone d'étude (a) sans et (b) avec vannes, au travers des hauteurs d'eau maximales asynchrones	53
Figure 24 : Justification par l'analyse des vitesses de l'indépendance des zones de travail	54
Figure 25 : Délimitation du modèle réduit par rapport au modèle de base	54
Figure 27 : Topographie pour la reconnexion par ouverture de digues et emplacement des ouvertures	55
Figure 28 : Résultats pour l'expansion de l'inondation pour la reconnexion par ouverture de digues	56
Figure 29 : Vecteurs vitesses et hauteurs d'eau au niveau des digues ouvertes. A) Rive gauche b) Rive droite	57
Figure 30 : Résultats concernant les paramètres morphologiques pour la reconnexion par ouverture de digues	58
Figure 31 : Vue du haut de la topographie avec visualisation du tracé et de la construction du nouveau chenal sous AutoCAD	60
Figure 32 : a) Topographie finale de la situation test avec ouverture d'un second bras b) Exemple d'un profil en travers pour la création de la topographie incluant le nouveau chenal (en jaune la découpe, en vert la topographie actuelle)	61
Figure 33 : Résultats pour l'expansion de l'inondation pour la création d'un chenal secondaire	62
Figure 34 : Résultats en termes de vitesses dans le cas de la création d'un nouveau bras	63
Figure 35 : Vecteurs vitesses et dissipation de l'énergie dans le chenal secondaire	64
Figure 36 : Comparaison des résultats concernant les paramètres morphologiques pour la création d'un chenal secondaire (b) avec la situation actuelle (a)	65
Figure 37 : Justification de l'utilisation des maxima des variables de calcul dans la démarche	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs du coefficient de Strickler _____	43
Tableau 2 : Valeurs du coefficient de Strickler utilisées pour les tests de sensibilité _____	45
Tableau 3 : Variation obtenue pour les valeurs de Tau_0 - Tau critique obtenues pour les différents tests de sensibilité _____	46

SIGLES ET ABREVIATIONS

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

MNT : Modèle numérique de terrain

Modélisation 1D : Modélisation bidimensionnelle

Modélisation 2D : Modélisation bidimensionnelle

PPRI : Plan de Prévention des Risques Inondation

SIG : Système d'Information Géographique

GLOSSAIRE

Annexe hydraulique : Partie abandonnée par le lit suite à un recoupement de méandres ou à un déplacement du lit, qui évolue en zone humide et se comble petit à petit. Il existe plusieurs types d'annexes selon leur degré de connexion au lit principal.

Enveloppe théorique : Zone de mobilité dont la surface est calculée sur dix fois la largeur du lit.

Enveloppe minimale : Zone de mobilité correspondant à l'enveloppe théorique mais prenant en compte les contraintes types protections de berges ou murs de rives.

Mobilité fonctionnelle : Il s'agit de la combinaison entre l'enveloppe théorique et les tracés historiques, en prenant en compte les contraintes d'urbanisation (villages, ponts...).

Morphodynamique : Etude des forces existantes et des formes qui en résultent.

Potentiel de restauration naturel : Capacité d'un cours d'eau à s'auto-ajuster sans intervention de l'Homme.

Transport solide : Transport de sédiments (argiles, sables, graviers...) par la force du courant pouvant s'effectuer soit par suspension dans l'eau soit par trainée sur le fond du lit (charriage).

Zone d'expansion de crue : Surface en eau lors d'une crue de rivière.

INTRODUCTION

Les cours d'eau apparaissent depuis des décennies comme des éléments qu'il faut maîtriser à la fois parce qu'ils paraissent dangereux et qu'ils contraignent l'expansion des activités humaines. En France la quasi-totalité a été aménagée par des ouvrages transversaux ou des protections contre leur déplacement ou les inondations, rectifiée ou encore recalibrée. Toutes ces modifications ont perturbé l'équilibre morphodynamique, ont abouti à un appauvrissement écologique de ces milieux, et même souvent ont fait naître à long terme des effets secondaires contraires aux objectifs de départ, comme une augmentation de la ligne d'eau ou du potentiel érosif du cours d'eau.

Ces dernières années un nouvel élan a vu le jour en matière d'aménagement des cours d'eau, avec pour ligne directrice une politique de protection à impulsion européenne qui vise le bon état de l'ensemble des masses d'eau. Les cours d'eau sont à présent considérés comme un patrimoine à la fois en termes de paysage et de biodiversité, qu'il est nécessaire de protéger et de valoriser, et les études de restauration hydromorphologique des cours d'eau se multiplient. Mais le retour en arrière n'est pas aisé. La rivière s'est adaptée aux divers aménagements qu'elle a subis, et les répercussions d'un retour en arrière non réfléchi peuvent s'avérer inattendues et disproportionnées. C'est pourquoi il est primordial de comprendre le fonctionnement du système fluvial et de s'enquérir des conséquences à court et à long terme, tant sur l'aspect hydraulique que sur l'aspect sédimentaire, de toute opération de restauration.

Des outils d'aide à la décision se développent de plus en plus pour les aménagements en général, des formules empiriques d'hydrodynamique ou de transport solide aux logiciels de simulation numérique en plusieurs dimensions. Ils modélisent les phénomènes complexes qui régissent la morphologie fluviale avec pour objectif de permettre à l'ingénieur de comprendre le fonctionnement des systèmes fluviaux, de retranscrire le plus justement la réalité et enfin de prévoir le plus précisément possible le comportement du cours d'eau en réaction à un aménagement.

Le Conseil départemental du Haut Rhin cherche depuis quelques années à mener des études globales en termes de restauration de ses cours d'eau, en prenant en compte le fonctionnement fluvial à grande échelle pour instaurer des mesures efficaces. Mais il a également la responsabilité de la sécurité des biens et des personnes et c'est pourquoi il lui est nécessaire de pouvoir s'appuyer sur des outils performants afin de faire les bons choix et mener à bien de grands projets sans remettre en cause la sécurité. Ce risque existant sur la zone sur laquelle se base cette étude, il s'agit d'en créer un modèle hydraulique bidimensionnel pour différents aménagements et d'analyser les résultats pour dire si oui ou non ceux-ci sont envisageables.

Cette étude a pour but de montrer en quoi la modélisation bidimensionnelle peut être un outil d'aide à la décision dans les questions de restauration hydromorphologique des cours d'eau au travers d'un projet de restauration sur la Fecht.

1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET PROBLEMATIQUE

1.1. La restauration hydromorphologique des cours d'eau, une problématique en fort développement

L'hydromorphologie, ou à la base géomorphologie, est une science qui étudie les phénomènes physiques qui gouvernent le fonctionnement dynamique des cours d'eau, et la morphologie qui en résulte. Elle est la base de la réflexion sur la restauration des cours d'eau, pour le repérage des dysfonctionnements, la détermination des causes et enfin le choix des actions à mener pour rétablir un bon fonctionnement.

1.1.1. Une nécessité pour le bon état physique et plus largement pour la biodiversité aquatique

1.1.1.1. Description du système fluvial

Un hydrosystème fluvial est composé de trois compartiments interconnectés (Malavoi et Bravard, 2010) :

- Le lit mineur qui contient des débits jusqu'au module.
- Le lit moyen qui contient des débits jusqu'au débit de pleins bords. Il comprend des bancs alluviaux entre lesquels sinue le lit mineur.
- Le lit majeur constituant le champ d'expansion des inondations, inondé lors des épisodes de crues dépassant le débit de pleins bords. Celui-ci est constitué des alluvions déposées au fil des périodes de crues et est ainsi nommé « plaine alluviale ». On y trouve pour les cours d'eau dits de rang supérieur, des marques de l'activité dynamique passée du cours d'eau, sous forme d'anciens bras, comblés ou non, ou d'annexes hydrauliques.

Remarque : Dans la conception hydraulique d'un cours d'eau, le lit moyen est confondu avec le lit mineur. On emploiera donc dans les parties suivantes seulement les termes de lit mineur et lit majeur.

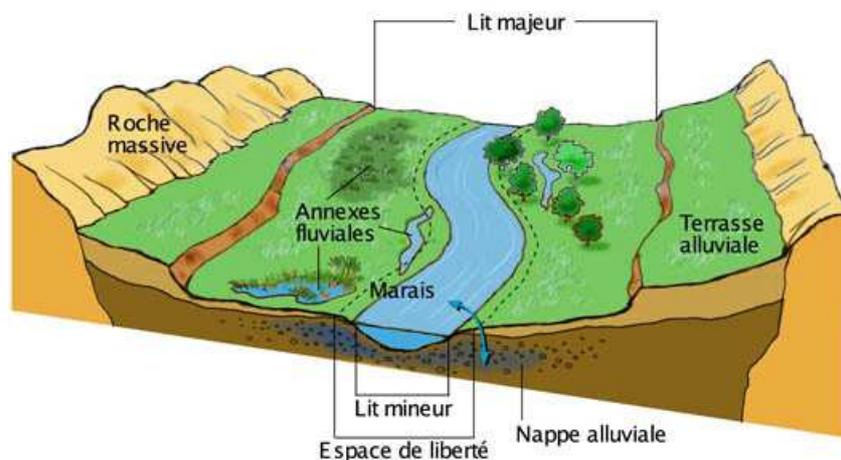


Figure 1 : Description du système fluvial (Source : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse)

Une rivière tend constamment vers un équilibre dynamique (Malavoi et Bravard, 2010). Ce phénomène correspond à un équilibre entre :

Partie 1 : Contexte de l'étude et problématique

- des variables de contrôle qui régissent l'évolution physique. On compte le débit liquide qui, associé à la pente, confère sa puissance au cours d'eau, le débit solide, mais aussi des variables comme la géométrie de la vallée, la pente, la granulométrie du fond du lit et des berges ou encore la ripisylve qui tient plus ou moins les berges.
- des variables de réponse qui gouvernent l'ajustement permanent du lit en réaction aux modifications des variables de contrôle. Il s'agit de la largeur du lit et la profondeur moyenne à pleins bords, la pente ou encore la sinuosité du tracé. Il est important de noter que cet ajustement a aussi lieu lors de modifications des variables de réponse elles-mêmes, naturelles (recoupement de méandres) ou anthropiques (recalibrage).

Lane a proposé un schéma expliquant l'ajustement de la rivière en fonction de l'équilibre qui réside entre la charge alluviale représentée par le débit solide et la granulométrie des sédiments, et l'énergie capable de l'évacuer représentée par le débit liquide et la pente.

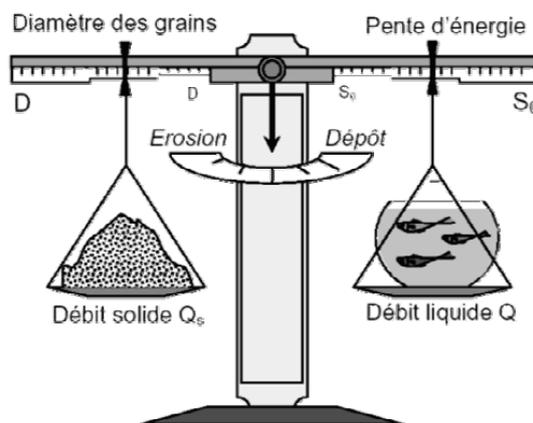


Figure 2 : Balance de Lane d'après Recking, 2006 (Source : De Linares, 2007)

Il en résulte un processus d'érosion-dépôt qui régit la forme du profil en long et la géométrie du lit. Le profil en long tend vers une pente dite « d'équilibre » au gré de l'érodabilité des différents substrats géologiques qu'il rencontre. Il est également marqué par une alternance de seuils et de mouilles, respectivement des zones où la hauteur d'eau est peu importante et des zones plus profondes.

Dans le profil en travers, cela se traduit par une asymétrie des berges, la rive concave étant érodée de manière abrupte du fait des lignes de courants plus rapides, et la rive convexe formant une pente douce. Cela explique également la répartition transversale des bancs alluviaux et du chenal d'étiage, axe d'écoulement privilégié. Un tri granulométrique est visible autant transversalement que longitudinalement.

Le tracé du cours d'eau est dû à son adaptation aux éléments qu'il rencontre : bien qu'il suive le thalweg, la ligne la plus basse au creux de la vallée, un point dur, géologique ou de type embâcle par exemple, qu'il contourne, ou une pente plus faible de la vallée vont favoriser l'apparition de styles fluviaux particuliers. Parmi les plus courants on compte le méandrage, le tressage ou encore l'anastomose.



Figure 3 : Styles fluviaux (Source : Malavoi et Bravard, 2010). a) Méandrage b) Tressage c) Anastomose

1.1.1.2. Fonctionnement hydromorphologique et état écologique

Il découle de tous ces éléments une diversité du profil en long et des profils en travers favorable à la biodiversité. En effet la diversité des formes du lit moyen crée une diversité d'habitats. Certaines espèces animales préfèrent des zones à fort courant tandis que d'autres préfèrent un courant calme. Il en est de même pour la profondeur d'eau, le temps en eau ou encore la taille du grain qui peut par exemple servir de cache pour les œufs.

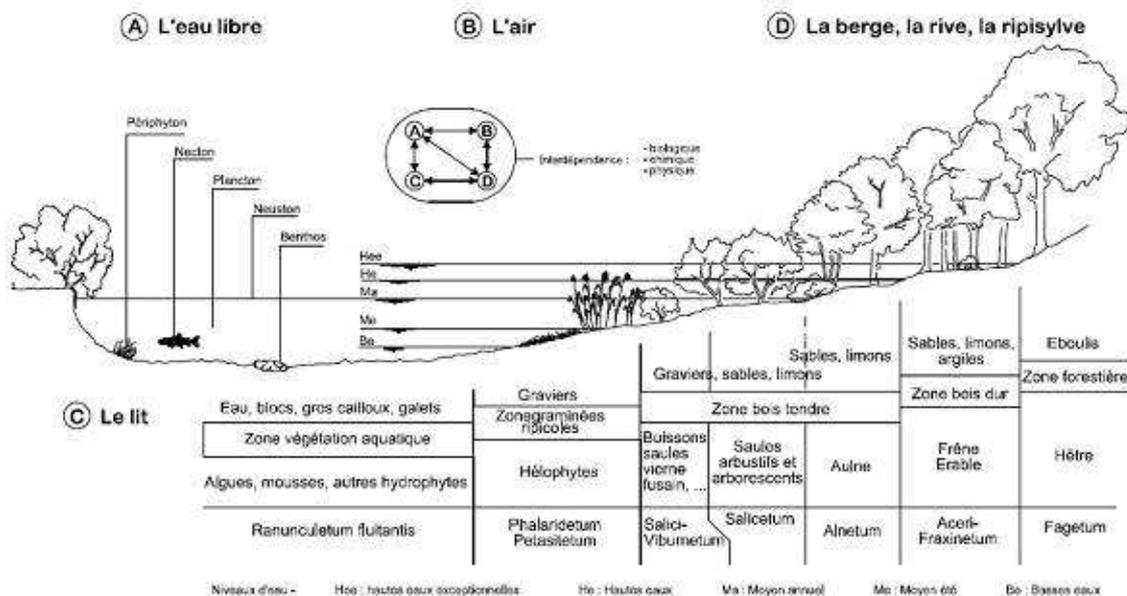


Figure 4 : Zonation transversale des habitats en rivière d'après Lachat, 1991 (Source : Adam, Debiais, Gerber, Lachat, 2008)

La connexion avec le lit majeur est également primordiale en termes de biodiversité. En effet lors des inondations se produit notamment un dépôt d'alluvions très fertiles sur la plaine. Mais ce n'est pas le seul avantage écologique : cela tend à créer des zones humides, habitats privilégiés pour abriter une biodiversité riche, ainsi que des annexes hydrauliques, connectées directement ou non au lit moyen.

1.1.1.3. La continuité écologique longitudinale

Lorsque la continuité écologique longitudinale est mise à mal par un ouvrage transversal, il en résulte la création d'un « plan d'eau » en amont, où la dynamique des écoulements est bloquée. En effet un ouvrage transversal constitue une section de contrôle hydraulique, mais qui, de manière plus ou moins importante selon ses dimensions, augmente les hauteurs d'eau et diminue les vitesses en amont (Malavoi, 2003). Le transit des sédiments est limité, les plus

gros éléments restant bloqués en amont tant que la retenue solide n'est pas pleine. En plus, ceci a pour effet direct un rééquilibrage du profil en long fracturé pour retrouver une pente la plus proche de la pente d'équilibre par un processus d'érosion/dépôt. La dynamique amont étant réduite, la profondeur et les faciès d'écoulement s'homogénéisent et la mobilité transversale est bloquée. Une succession de seuils conduit à figer le profil en long et le tracé d'un cours d'eau, surtout si celui-ci ne possède pas un bon potentiel de mobilité. Il s'agit justement souvent de l'effet recherché lors de la mise en place de seuils en travers d'un cours d'eau, afin de soutenir l'étiage, et de garder un tracé constant dans le temps en vue de développer l'urbanisation et les activités.

Il faut cependant noter que les seuils de taille réduite, ou ne bloquant qu'une partie de la largeur sur une hauteur raisonnable peuvent avoir un effet bénéfique par création d'une diversité locale des écoulements et du fond.

1.1.1.4. La continuité écologique latérale

La continuité écologique latérale correspond au lien fort qui existe entre les différents lits qui composent l'hydrosystème fluvial ainsi qu'à la possibilité du cours d'eau de se déplacer.

Les aménagements sur les berges, murs de rive, protections de berges en techniques lourdes, constituent des points durs qui bloquent localement l'érosion. Le déplacement du lit est donc impossible à ce niveau et cela entraîne un effet miroir qui répercute l'érosion sur la berge opposée de manière légèrement décalée. Pour les cours d'eau dont les berges sont très artificialisées, l'érosion se concentre sur le fond du lit, seule partie du périmètre mouillé érodable, ce qui peut impliquer à long terme un abaissement du lit mineur si des seuils ne sont pas mis en place pour maintenir le profil en long. L'encaissement d'un cours d'eau le déconnecte, au moins partiellement, de son lit majeur, ce qui implique une diminution des surfaces inondées, et les conséquences écologiques qui en résultent, et une concentration des écoulements vers l'aval. Si les inondations ne posent alors plus problème dans cette zone, elles sont pourtant renforcées en termes de volume à l'aval.

Le blocage de la mobilité latérale d'un cours d'eau l'empêche d'approcher sa pente d'équilibre en créant des sinuosités. Il s'ensuit inévitablement la création d'une pente plus raide qui aboutit à un risque d'inondation plus important vers l'aval.

1.1.2. Une alternative aux protections usuelles contre les inondations ?

Considérant les éléments décrivant le fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux que nous venons d'exposer, il apparaît que les objectifs de départ de protection contre les crues auxquels sont censés répondre les aménagements des cours d'eau ne sont pas toujours vérifiés. En effet soit le problème lié aux inondations est déplacé vers l'aval et ce, de manière plus importante, soit dans certains cas ces aménagements peuvent augmenter localement les lignes d'eau.

De plus en plus d'études cherchent d'autres moyens de s'en protéger, comme l'utilisation du fonctionnement naturel des cours d'eau. La restauration des méandres en plaine permet de gagner du linéaire, de limiter la pente et finalement de limiter les apports en aval. La restauration des zones d'expansion de crues naturelles, elle, permet un laminage des crues. Cependant N. Kreis a notamment montré dans sa thèse de doctorat intitulée « Modélisation

des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d'inondation » (2004) que ce laminage n'est efficace qu'en zone de plaine et surtout essentiellement sur des crues de courte durée. Il montre cependant que cette possibilité se révèle intéressante plus le linéaire renaturé est important, mais cela implique une restauration de la quasi-totalité de la rivière, ce qui n'est pas toujours possible, ainsi qu'un suivi précis de l'ajustement morphologique du cours d'eau en réaction à la renaturation, de manière à conserver une bonne inondabilité.

Ces deux possibilités d'intervention sont de plus limitées par l'occupation du sol actuelle, peu de lits majeurs restant en effet totalement préservés.

1.1.3. Les politiques actuelles et les textes réglementaires : des objectifs de qualité forts

Les opérations de restauration hydromorphologiques des cours d'eau sont encadrées par une politique volontariste en matière de bon état écologique des masses d'eau, tant sur le plan national qu'euro péen. Sont exposés ici les principaux textes réglementaires qui régissent ces actions.

La Directive Cadre sur l'Eau 2000/60

La Directive Cadre sur l'Eau, adoptée par le Conseil et le Parlement européen le 23 octobre 2000, fait partie d'un ensemble d'une trentaine de Directives qu'a développée la législation européenne sur l'eau depuis les années 1970.

Elle vise une cohérence des démarches des 27 Etats européens en matière de qualité de l'eau sous l'égide d'une politique communautaire globale et définit des objectifs élevés en matière de préservation et de restauration des eaux superficielles et souterraines avec pour ambition le « bon état » de l'ensemble des masses d'eau sur tout le territoire européen pour 2015 et une gestion durable de l'eau.

L'échéance doit être respectée sous peine d'amendes aux Etats. Cependant des dérogations, comme des reports d'échéances à 2021 ou 2027, ou des adaptations des objectifs à la qualité de départ de certaines masses d'eau classées comme fortement modifiées hydromorphologiquement parlant, sont possibles mais doivent être formellement justifiées et soumises à consultation du public.

Les objectifs définis passent notamment par les éléments suivants :

- Un bon fonctionnement des milieux aquatiques au travers d'une remise en état et d'une protection à long terme
- Une qualité chimique de l'eau via la réduction voire la suppression des polluants dans les eaux de surface ou souterraines
- Une utilisation durable des ressources

Cette Directive définit un cadre sous forme de lois obligatoirement transposées dans le droit national dont les grands principes sont :

- Une gestion par bassin versant et un raisonnement par « masse d'eau »
- Une planification et une programmation des actions sur 6 ans démarrant par un état des lieux et débouchant sur l'adoption pour la France d'un Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) pour chaque grand bassin hydrographique
- Une analyse économique des modalités de tarification de l'eau et une intégration des coûts environnementaux
- Une consultation du public

Le bon état écologique n'est pas décrit au travers des paramètres hydromorphologiques mais au travers de l'état biologique (faune, flore et habitats) qui lui-même en dépend justement ainsi que de la physico-chimie. Le bon fonctionnement hydromorphologique (diversité de la géométrie du lit, de la granulométrie ou de la végétation rivulaire, continuités écologiques longitudinale et transversale et régime hydrologique fonction des saisons) est donc un objectif implicite dans la DCE mais est néanmoins parfaitement explicite dans sa mise en pratique au travers des lois françaises et des SDAGE qui en découlent.

Le Grenelle de l'Environnement

Le Grenelle de l'Environnement a pour objectif de réformer le droit en faveur de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables et rassemble depuis 2007 les acteurs de l'environnement, soit les représentants de l'Etat, des collectivités locales, des Organisations Non Gouvernementales ou encore des entreprises et des syndicats, pour travailler sur six thématiques dont la seconde est « *Préserver la biodiversité et les ressources naturelles* ».

Le Grenelle tend notamment à réaffirmer l'objectif de « bon état » des masses d'eau de la DCE avec des actions fortes comme l'acquisition de 20 000 hectares de zones humides ou le rétablissement de la continuité écologique des cours d'eau au travers de la Trame verte et Bleue. Cette dernière est un élément phare de la politique menée par le Grenelle de l'Environnement et a rendu obligatoire la notion de continuité écologique, à la fois longitudinale et transversale.

La Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques

La Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) de décembre 2006 constitue pour une grande partie la transposition de la DCE dans le droit français. Elle rend notamment obligatoire « *l'entretien des cours d'eau par des méthodes douces et l'assurance de la continuité écologique des cours d'eau* ».

Le Code de l'Environnement

C'est essentiellement dans le Code de l'Environnement que sont explicitées clairement les mesures nécessaires au bon fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau, mesures qui seront encore précisées dans le SDAGE. Il contient notamment les articles suivants, ainsi que les règles et prescriptions qui y sont associées.

L'**Article L211-1** assure notamment « *la prévention des inondations et la préservation des écosystèmes aquatiques, des sites et des zones humides ; ...* », ainsi que « *le rétablissement de la continuité écologique au sein des bassins hydrographiques* ». Il vise également une gestion équilibrée de l'eau entre les différents usages qui permette « *la conservation et du libre écoulement des eaux et [...] la protection contre les inondations* ».

L'**Article L211-12** prévoit que « *des servitudes d'utilité publique peuvent être instituées à la demande de l'Etat, des collectivités territoriales ou de leurs groupements sur des terrains riverains d'un cours d'eau ou de la dérivation d'un cours d'eau, ou situés dans leur bassin versant, ou dans une zone estuarienne* » pour des objets tels :

- La rétention temporaire des eaux de crues afin de réduire les crues à l'aval
- La création ou la restauration des zones de mobilité du lit mineur en amont des zones urbanisées
- Préserver ou restaurer les zones humides dites « zones stratégiques pour la gestion de l'eau »

De plus, cet article prévoit que « *dans les zones de mobilité d'un cours d'eau [...] ne peuvent être réalisés les travaux de protection des berges, remblais, endiguements et affouillements, les constructions ou installations et, d'une manière générale, tous les travaux ou ouvrages susceptibles de faire obstacle au déplacement naturel du cours d'eau. A cet effet, l'arrêté préfectoral peut soumettre à déclaration préalable [...] les travaux qui [...] sont susceptibles de faire obstacle au déplacement naturel du cours d'eau et n'entrent pas dans le champ d'application des autorisations ou déclarations instituées par le code de l'urbanisme* ».

1.1.4. Les préconisations du SDAGE Rhin-Meuse

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux pour les Districts Rhin et Meuse constitue le plan de gestion des masses d'eau au titre de la Directive Cadre sur l'Eau et en définit un programme précis de gestion de l'eau à vocation durable. Il définit un certain nombre d'orientations permettant de cadrer les différentes actions.

Dans le cadre de l'action sur la morphologie des cours d'eau, les objectifs primordiaux décrits dans le SDAGE sont de « restaurer ou sauvegarder les fonctions naturelles des milieux aquatiques » et de « stopper leur dégradation ».

La disposition essentielle à ce sujet est la disposition **T3 - O3 - D1** qui s'intitule comme suit :

Afin de restaurer ou de sauvegarder l'ensemble des fonctions naturelles des cours d'eau, les principes généraux suivants sont respectés :

1. *Privilégier la reprise de l'entretien sur les cours d'eau non entretenus depuis de nombreuses années, et y assurer ensuite un entretien régulier. Cette restauration comprendra une gestion sélective de la végétation et la gestion de points singuliers (embâcles, protection de berges, atterrissements, etc.).*

2. *Assurer la renaturation des cours d'eau dégradés en privilégiant la restitution d'un minimum de continuité écologique latérale et longitudinale des rivières et la recréation d'une diversité optimale du fond, du lit et des berges (diversité qui dépend du type de cours d'eau).*

3. *Mettre en place les techniques qui constituent le meilleur compromis entre la gestion d'un éventuel problème hydraulique et la préservation des fonctions écologiques des écosystèmes.*

Les orientations principales associées sont les suivantes :

Rétablir ou restaurer la dynamique latérale

Le SDAGE définit l'**Orientation T3 - O3.1.1** dont l'intitulé exact est : « *Pour les cours d'eau mobiles, préserver les zones de mobilité encore fonctionnelles et/ou viser à les reconstituer quand elles ont été dégradées et que leur reconquête est économiquement et techniquement possible.* ».

Cette orientation passe par certaines dispositions comme la détermination des cours d'eau mobiles et la délimitation des fuseaux de mobilité par l'Agence de l'Eau et les Etablissements publics de l'Etat compétents notamment, la prise en compte dans les documents d'urbanisme de ces zones de mobilité de façon à limiter les points de fixation du lit et leur dégradation par l'aménagement de structures qui pourraient perturber son fonctionnement.

Restaurer la diversité écologique des berges et du lit des cours d'eau

Les **Orientations T3 - O3.2.1** et **T3 - O3.2.2** prévoient respectivement de « *préserver ou privilégier la restauration de la diversité écologique du lit mineur et des berges dans les zones artificialisées (diversité des types d'écoulements et granulométrie des fonds : seuils, épis, etc.)* », ainsi que d'« *adopter toutes les mesures nécessaires concernant les ouvrages transversaux pour assurer la continuité longitudinale des cours d'eau* ».

Stopper la dégradation des écosystèmes aquatiques

L'**Orientation T3 – O4.1** consiste à « *limiter au maximum les opérations conduisant à une banalisation, une artificialisation ou une destruction des écosystèmes* ».

Le SDAGE Rhin-Meuse décompose la Fecht en quatre masses d'eau. La première est en « bon état » tandis que les trois autres sont en état « pas bon ». Les objectifs d'état qui ont été retenus sont le bon état global, écologique et chimique pour les masses d'eau 1, 2 et 4 avec pour échéance respective 2015, 2021 et 2027. Pour la masse d'eau 3, classée en « Masse d'eau fortement modifiée », l'objectif écologique est le bon potentiel pour 2015.

Les enjeux auxquels souhaite particulièrement répondre ce document pour la Fecht sont les suivants :

- Préservation des milieux remarquables et des milieux en bon état existants
- Restitution de la continuité écologique longitudinale
- Restitution de la continuité écologique latérale
- Restitution d'une diversité écologique du lit mineur et des berges dans les zones artificialisées

Le SDAGE est accompagné de plusieurs autres documents dont un « Guide des bonnes pratiques pour la gestion des milieux aquatiques » qui précise les actions concrètes à prendre pour chacune de ses mesures et orientations. Un résumé est présent en Annexe 1.

1.1.5. Le rôle du Conseil départemental du Haut-Rhin

Le Département du Haut-Rhin a en charge l'entretien des 800 kms de cours d'eau qui s'écoulent sur son territoire au travers des Syndicats de rivières qui en ont la maîtrise d'ouvrage. Il intervient dans la surveillance des crues et la protection contre les inondations mais il a aussi une politique volontariste en matière de bon état de ses cours d'eau. En effet ses services concernés se sont engagés, en partenariat avec l'Agence de l'Eau, dans un programme ambitieux de restauration des fonctionnalités écologiques naturelles de chaque rivière qui auraient été mises à mal par des travaux hydrauliques ou des interventions humaines. Ce programme veut considérer de manière globale le fonctionnement des cours d'eau, à l'échelle du bassin versant associé, afin de répondre de manière adaptée et efficace aux besoins, tout en maîtrisant les effets à l'amont et à l'aval de ses interventions. Ce recul lui permet de cibler ses actions sur les zones les plus fragiles, et de choisir ses interventions de manière à ce qu'elles aient des retombées positives à la plus grande échelle possible.

Ce programme suit trois axes de travail, dans le but de répondre de la façon la plus complète aux objectifs de la Directive Cadre sur l'Eau :

- L'axe « Hydromorphologie » qui a pour objectif la restauration de la continuité écologique latérale et de la diversité naturelle des écoulements et du fond du lit.
- L'axe « Continuité » qui vise la restitution de la continuité écologique longitudinale au travers du recensement et du diagnostic des ouvrages transversaux
- L'axe « Ecologie » qui vise le retour d'une biodiversité optimale au travers de la restauration des berges et de la ripisylve.

Il se décompose ensuite en deux étapes que sont, tout d'abord l'état des lieux qui consiste en un diagnostic de l'état de la rivière par tronçons linéaires homogènes et une mise en valeur des secteurs intéressants, puis le programme de mesures visant le rétablissement du bon état écologique. Ce travail s'inscrit dans l'axe « Hydromorphologie » de cette deuxième étape.

1.2. Présentation de la zone d'étude - données disponibles

1.2.1. Présentation géographique de la Fecht

La Fecht est une rivière du Haut Rhin qui s'écoule sur 49 kilomètres depuis la commune de Mittlach, à 1030 m d'altitude sur le versant oriental du massif des Vosges, avant de se jeter dans l'Ill, affluent du Rhin, sur la commune d'Illhaeusern, entre Colmar et Sélestat. Elle naît en réalité de la confluence de la Grande Fecht et de la Fecht de Sondernach, et conflue plus en aval avec son autre affluent homonyme qu'est la Petite Fecht du Hohneck à Munster. La Fecht draine finalement un bassin versant de 545 km².

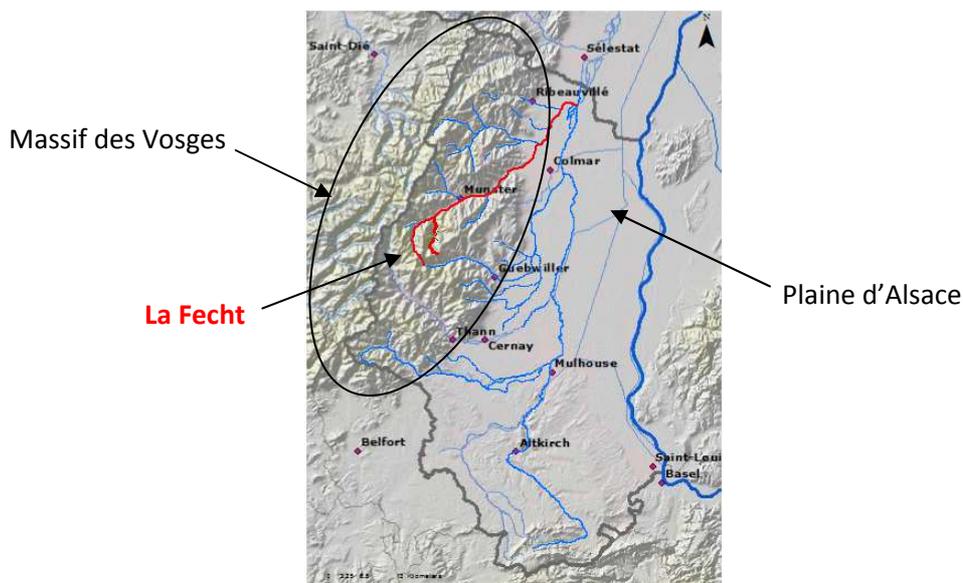


Figure 5 : Localisation de la Fecht dans le Département du Haut Rhin

D'un point de vue climatologique, ce bassin est globalement soumis à un climat semi-continental et peut être délimité en trois zones. A l'amont qui correspond au massif des Vosges, la pluviométrie annuelle est assez marquée avec plus de 2000 mm, tandis qu'à l'aval dans la plaine d'Alsace, elle ne dépasse pas 700 mm. La zone comprise entre les deux est soumise à une pluviométrie intermédiaire. Les inondations de la vallée de la Fecht ont lieu généralement en hiver lors des pluies liées aux redoux ainsi qu'au printemps lors de la fonte des neiges sur les sommets du massif des Vosges. Plusieurs crues violentes ont marqué les esprits, comme en 1919, 1947, 1955 ou plus récemment en 1983 et 1990, avec des débits respectifs évalués à 124 et 140 m³/s, et l'amélioration de la protection contre les inondations garde une place essentielle dans la plupart des interventions sur le cours d'eau.

Cette étude s'intéresse à la Fecht aval, et plus particulièrement sur le linéaire entre la sortie du village d'Ingersheim et la commune de Bennwihir, qui représente environ 6 kms. Cette zone est communément nommée Waldeslust. Une partie de la Weiss, entre la sortie du bourg de Sigolsheim et la confluence avec la Fecht, est également prise en compte. L'ensemble de la zone d'étude est géré par le Syndicat mixte de la Fecht aval et du Strengbach.

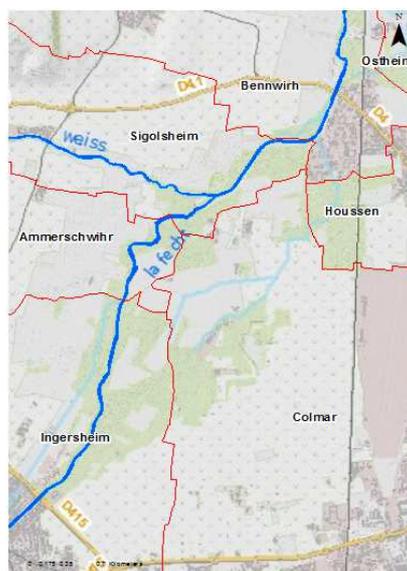


Figure 6 : Localisation de la zone d'étude sur la Fecht

1.2.2. Diagnostic morphologique et bilan sur l'état physique actuel de la Fecht

Le diagnostic morphologique réalisé lors de l'état des lieux sur la Fecht et la Weiss a mis en valeur pour chaque masse d'eau de la Fecht les éléments suivants :

- La première masse d'eau s'étend de la source de la Grande Fecht à l'aval de Munster. La Fecht sur cette partie est un torrent de montagne plutôt naturel, à l'exception des traversées de village où il est vite contraint par des aménagements de berges notamment. Le cours d'eau est néanmoins classé en zone humide remarquable pour la diversité des habitats qu'il abrite. C'est dans la traversée de Munster que sont localisés les premières vraies artificialisations du lit mineur avec notamment des prises d'eau et canaux, des seuils et des murs et protections de berges.
- La seconde masse d'eau s'étend jusqu'au centre de Zimmerbach. La vallée commence à s'élargir et la pente à diminuer. La stabilisation du lit et des berges par des seuils et des enrochements de berges contraint fortement les écoulements sur cette partie où le potentiel de mobilité est fort, comme peuvent en témoigner les anciens tracés. Le lit majeur est néanmoins bien préservé et une grande partie est classée en zone humide remarquable.
- La troisième masse d'eau s'étend jusqu'à la confluence avec la Weiss. La Fecht s'écoule sur son cône de déjection. Les tracés historiques et les anciens chenaux encore visibles témoignent d'un fort potentiel de mobilité avec une tendance au tressage sur la commune d'Ingersheim et aux méandres divagants plus en aval. Même si le linéaire reste globalement naturel car traversant des zones d'exploitations viticoles et agricoles et que la forêt alluviale est classée en zone humide remarquable, ce dynamisme est contraint par de nombreux seuils et protections de berges, contrainte poussée à son paroxysme lors de la traversée de Turckheim et d'Ingersheim.
- La quatrième et dernière masse d'eau se terminant au niveau de la confluence avec l'Ill a été de la même manière stabilisée et endiguée, malgré un bon potentiel. A l'aval d'Ostheim, la dynamique s'affaiblit et le lit mineur redevient plus naturel. Le lit majeur est de nouveau bien préservé.

La zone étudiée s'inscrit dans les deux dernières masses d'eau, comprenant l'aval de la troisième et l'amont de la quatrième. Son fort potentiel de mobilité et sa tendance à des styles fluviaux comme le tressage ou les méandres divagants font en effet qu'elle présente une hydromorphologie très intéressante.

De plus les enjeux écologiques y sont nets ; le diagnostic morphologique précis sur la zone a permis de détacher les éléments suivants :

- Le lit mineur est endigué sur une bonne partie du linéaire. Il est stabilisé par de nombreux seuils et protections de berges à la sortie d'Ingersheim, puis retrouve un caractère plus naturel avant la confluence avec la Weiss. La partie du secteur à l'aval de cette confluence est entièrement artificielle.

Partie 1 : Contexte de l'étude et problématique

- Des encoches d'érosion ainsi que d'anciens chenaux de crue bien marqués témoignent d'un fort potentiel de mobilité. Les tracés historiques appuient cette conclusion.
- Le lit mineur et les forêts alluviales relictuelles sont classés en zone humide remarquable. La zone inondable du cône de la Fecht est relativement bien préservée.
- La continuité écologique longitudinale pour les espèces cibles (saumons et anguilles) n'est pas respectée car plusieurs seuils sont partiellement voire non franchissables.

Remarque : La Fecht est classée en Axe migratoire prioritaire pour les saumons et les anguilles.

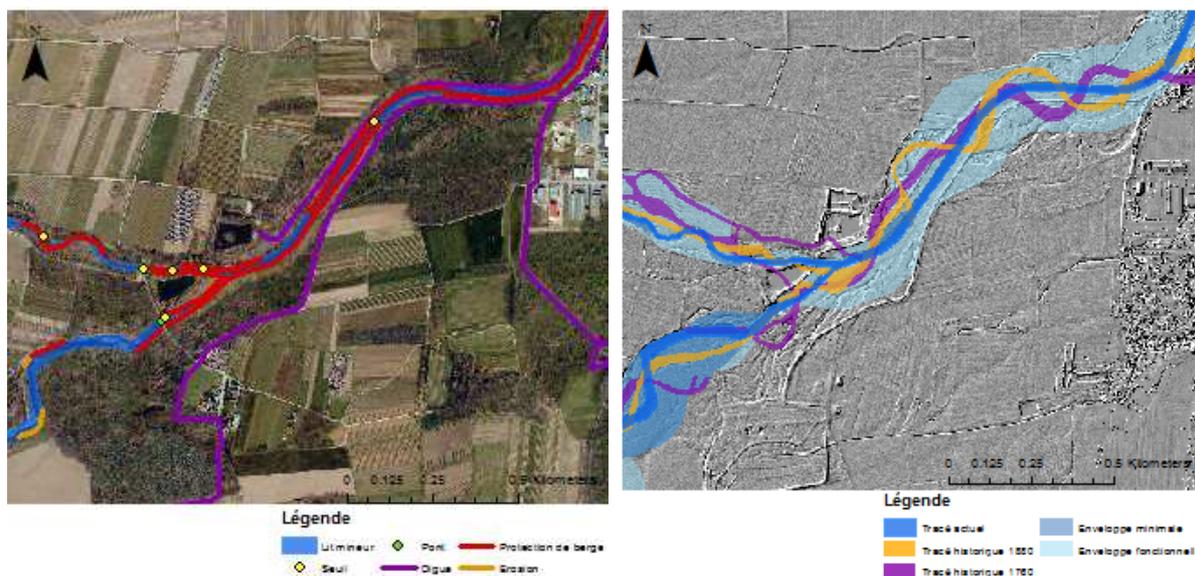


Figure 7 : Etat des lieux, mobilité historique et enveloppes de mobilité au niveau de la confluence avec la Weiss

Le bilan de l'état des lieux et les fuseaux de mobilité pour l'ensemble du secteur d'étude sont disponibles en Annexes 2 et 3. Ces fuseaux de mobilité fonctionnelle ainsi que les enveloppes minimales ont été définies conformément au SDAGE, afin de repérer les zones mobiles, potentiellement à restaurer.

1.2.3. Etudes antérieures, travaux récents et en projet

Depuis les années 1970 où la plupart des seuils présents actuellement ont été aménagés modifiant le profil en long, la rivière s'est adaptée et a retrouvé un équilibre. Ainsi toute modification de la hauteur de ces seuils est délicate pour la plupart d'entre eux car cela entraînerait une érosion régressive importante. Ce risque est accentué par le fait que les seuils sont en général peu éloignés les uns des autres et l'érosion due à l'intervention sur un peut facilement déstabiliser celui situé juste en amont et ainsi de suite, créant ainsi un processus incontrôlable. Des études sont donc en cours pour envisager d'autres possibilités d'intervention, comme par exemple augmenter le linéaire jusqu'à la pente d'équilibre naturelle pour effacer certains seuils. Mais les marges de manœuvres restent minces à certains endroits où les digues sont peu éloignées du lit mineur.

Ce réseau de digues a été mis en place à la fin des années 1970 pour protéger les communes de Bennwihr et Houssen. Un système de laminage des crues par casiers a par la

suite (2006) été mis en place en association avec cette protection en rive droite dans la zone inondable du cône de la Fecht. Ce système, constitué de deux ouvrages cadres et d'un busage, permet de limiter les apports en eau à l'aval et donc les inondations destructrices lors des crues violentes. Des protections rapprochées ont été prévues pour les habitations situées sur cette zone privilégiée d'expansion de l'inondation. Cependant ce dispositif n'est pas suffisant et les écoulements traversent la voie de chemin de fer pour finir par inonder Houssen, comme cela a été le cas en 1990. Ceci est d'autant plus problématique que l'eau reste bloquée dans cette cuvette et ne ressuie que lorsque le niveau de la nappe redescend.

Face à ce constat et dans le but d'améliorer encore la situation à l'aval, un nouveau projet (Annexe 4) a été mis en place. Ce projet prévoit le rehaussement des digues de protection à l'amont de Bennwihr ainsi que la création d'une digue le long de la voie ferrée. Ceci permet l'installation d'un troisième ouvrage cadre un peu plus en aval des deux précédents ainsi que d'un déversoir après la confluence, et finalement un surstockage dans la plaine inondable. Des protections rapprochées sont enfin prévues pour les zones à risques situées dans la plaine.

Face aux érosions vives relevées sur la partie du secteur entre Ingersheim et la confluence avec la Weiss, et pour éviter des recoupements de méandres ou le contournement de certains seuils, de nombreuses protections de berges ont successivement été installées, dont certaines réaménagées récemment avec des techniques de génie végétal.



Figure 8 : Exemples d'aménagements en génie végétal a) Tenue de berge par la végétation sur fibre de coco b) Fascines de saules (Source : Frossard, 2009)

En aval du secteur une « zone nature » a été créée à partir d'anciens chenaux de crue en 2002. Ces chenaux ont été reconnectés et des mares aptes à recevoir une biodiversité riche ont été mises en place. L'objectif était également d'améliorer la franchissabilité du seuil présent à ce niveau en créant une zone de contournement. Cette zone, bien que fonctionnant aujourd'hui globalement bien d'un point de vue faunistique et floristique, semble hélas avoir une forte tendance au dépôt et un suivi et des ajustements réguliers sont nécessaires pour ne pas la voir se combler rapidement et disparaître.

Un projet de même type est également envisagé en rive gauche juste en aval de la confluence dans les anciens tracés, sur la zone où le lit mineur endigué et artificiel. Les études ont déjà été réalisées mais le projet reste en instance. En effet un seuil non franchissable et non aménagé et qui maintient le profil en long à ce niveau, est situé juste en aval. Comme il existe également d'autres chenaux de crues en rive droite, plusieurs scénarios ont été envisagés afin d'exploiter au mieux les atouts sur ce secteur et obtenir les meilleurs résultats en terme de bon état physique et écologique. Cette partie nous intéressera tout

particulièrement par la suite et les scénarios seront développés dans la IIIème partie de ce rapport.

1.2.4. Données disponibles

Le Département du Haut-Rhin dispose de levés topographiques LIDAR (Laser Detection and Ranging) haute résolution (4 points/m²) couvrant respectivement la Fecht et la partie étudiée de la Weiss, et l'Ill, ainsi que des orthophotos de 2007 et de 2011 de résolution 30 cm. Ces deux éléments permettent une description précise de la topographie du site, et mettent en valeur notamment les irrégularités du lit mineur ainsi que les anciens chenaux. Ceci était en effet nécessaire pour un travail comme celui-ci.

Le Conseil départemental dispose de l'état des lieux de la Fecht et de la Weiss, réalisé en 2012 et exploité dans la partie 1.2.2. Celui-ci est disponible en Annexe 2. Les inventaires descriptifs des différents ouvrages (seuils, digues, protections de berges, vannes, etc.) ainsi que des nombreuses zones d'érosion ou des zones humides remarquables, qui ont été menés dans ce cadre sont également utilisables. Ces données sont essentielles pour localiser les différents enjeux. Cet état des lieux a également donné lieu à des relevés granulométriques réguliers sur l'ensemble du linéaire.

Sont aussi disponibles des cartes des tracés historiques de 1880, 1840 ou encore 1760 (Annexe 3). Celles-ci permettent de préciser les zones de mobilité.

Les éléments précédents sont géoréférencés et exploitables sur un Système d'Information Géographique (SIG) grâce au logiciel ArcGIS 10.1.

Les données du Plan de Prévention des Risques d'Inondations de la Fecht approuvé en 2008 sont consultables. Elles contiennent notamment les débits de référence pour les crues décennale, cinquantiennale et centennale sur la Fecht en plusieurs stations hydrométriques sur le linéaire. Ces valeurs ont été obtenues par des analyses statistiques des pluies sur le bassin versant, à partir des mesures des pluviomètres localisés dans les trois zones décrites dans la partie 1.2.1. Les débits qui seront effectivement utilisés pour cette étude sont les valeurs obtenues pour la crue centennale, soit 175 m³/s à Wintzenheim, à l'amont de la confluence avec la Weiss, et 235 m³/s à Ostheim, en aval. Le PPRI est disponible en Annexe 5.

A titre de comparaison pour la suite, un modèle unidimensionnel récent a été développé sur la zone de la Waldeslust avec le logiciel HEC-RAS. Il prend en compte le fonctionnement des casiers de laminage dans la zone inondable avec les ouvrages cadres existants, ainsi que les aménagements prévus pour améliorer la protection contre les crues décrits dans la partie 1.2.3.

1.3. Problématique et objectifs

Face au constat que nous venons de tirer sur l'état actuel de la Fecht, des interventions sur le tracé, les seuils ou encore les protections sur les berges, peuvent apparaître nécessaires pour lui redonner un caractère plus naturel. Mais un retour en arrière complet n'est pas évident car les enjeux en termes d'inondation et d'occupation du sol exposés précédemment sont trop

importants pour entendre redonner une mobilité totale sur toute la zone. Chaque intervention possible doit être réfléchie, et les conséquences à court et long terme connues. Seulement l'hydromorphologie est une matière complexe, qui même si on en est expert, relève pour beaucoup de l'expérience. Il est en effet difficile de mesurer clairement à la fois l'utilité, l'adéquation et la pérennité de l'intervention mais aussi l'ampleur de toutes les suites induites sur le cours d'eau.

La modélisation hydraulique bidimensionnelle, telle qu'elle est utilisée couramment pour les études de prévention des inondations, est un outil performant qui permet de rendre compte des effets d'une crue en termes de hauteurs d'eau et de vitesses. Les résultats mettent en valeur les zones vulnérables aux inondations selon différents degrés et sont la base sur laquelle s'appuient les Plans de Prévention des Risques d'Inondations (PPRI). Mais elle intervient également dans les études de renaturation pour mesurer les effets sur les mêmes paramètres hydrauliques de diverses interventions. C'est sur ce point qu'elle paraît tout à fait convenir aux besoins de la Fecht. Cependant comme nous l'avons exposé précédemment, l'hydromorphologie fait également intervenir le transport solide en association aux paramètres hydrauliques, et c'est cette association qui aboutit à des modifications de la morphologie de la rivière. C'est pourquoi il s'agit dans ce travail de pousser plus loin les possibilités de la modélisation jusqu'à des résultats décrivant tous les enjeux d'une intervention, à la fois en terme hydraulique et en terme sédimentaire.

Plus précisément, il s'agit de chercher à mettre en valeur et à quantifier les changements des paramètres hydrauliques et sédimentaires suite à une intervention sur le cours d'eau, pour ensuite évaluer les changements induits et l'éventuel risque qui y est lié. L'analyse hydraulique dira si oui ou non l'intervention augmente le risque lié aux inondations (champs d'expansion des crues et vitesses associées) et l'analyse sédimentaire mesurera l'équilibre du cours d'eau et mettra en valeur la possible création d'un nouveau risque lié à la reprise de mobilité du cours d'eau.

Cette démarche présente également un intérêt non négligeable avec simplement l'analyse d'une simulation en situation actuelle. En effet cela permet d'évaluer l'utilité d'un aménagement : si les contraintes liées aux écoulements sont suffisantes à un endroit, une modification artificielle du tracé, qui pourrait en plus s'avérer ne pas convenir tout à fait à la dynamique de la rivière, se révélerait incohérente. On met en effet ainsi en évidence l'inadéquation des moyens par rapport aux besoins, la non intervention peut s'avérer meilleure ou simplement suffisante pour certaines zones, et il vaudrait mieux agir sur des zones où l'on sait que la rivière seule ne pourrait reprendre un caractère naturel. De plus il est souvent intéressant voire très utile de prévoir les évolutions morphologiques d'un cours d'eau. Cela peut passer par la connaissance du terrain, le suivi des encoches d'érosion, du déplacement des bancs de graviers voire du tracé au fil des années, ou encore le repérage des écoulements préférentiels en lit majeur. Mais pour certaines zones à forts enjeux, la démarche exposée dans ce travail pourrait permettre de localiser les zones où le cours d'eau est susceptible de bouger à plus ou moins long terme, et ainsi de prendre des mesures de prévention et/ou de compensation, avant que le processus ne soit visible sur le terrain.

C'est en tâchant de mettre en œuvre ces différents objectifs que nous pourrons répondre de l'adéquation de l'outil de simulation hydraulique bidimensionnel en tant qu'outil d'aide à la décision pour les études de restauration hydromorphologique des cours d'eau.

Dans le cadre des opérations de restauration hydromorphologique des cours d'eau poussées par des politiques actuelles ambitieuses en termes de bon état écologique, le Conseil Départemental du Haut-Rhin mène actuellement une étude sur la Fecht. L'état des lieux a révélé un état physique globalement plutôt mauvais mais aussi un potentiel de mobilité, notamment sur l'aval, ainsi qu'une nette tendance aux méandres divagants très intéressants. La zone choisie pour cette étude comporte ces caractéristiques. Les enjeux écologiques y sont donc forts mais des enjeux en termes d'inondation y sont aussi représentés. En effet de nombreux aménagements de protection contre les crues existent sur la zone et rendent le fonctionnement hydraulique très particulier.

Cette zone dite de la Waldeslust convient tout à fait aux ambitions de ce travail qui cherche à confronter l'outil de modélisation hydraulique bidimensionnel aux opérations de restauration qui y sont envisagées. Il s'agit d'utiliser un modèle en deux dimensions pour mettre en valeur et quantifier les changements des paramètres hydromorphologiques à la fois en termes d'hydraulique mais surtout en termes sédimentaires, induits par une intervention. Les objectifs finaux sont de dire dans quelles mesures cet outil peut permettre de comprendre le fonctionnement d'un cours d'eau et représenter un outil d'aide à la décision pour la renaturation hydromorphologique, mais aussi en quoi il peut être un outil de prévision des évolutions futures dans des zones à forts enjeux.

Il convient maintenant de choisir parmi les outils existants ceux qui seront les plus adaptés à la situation. Le choix de ces outils ainsi que la méthodologie associée pour répondre aux objectifs sont explicités dans la suite.

2. OUTILS ET METHODES DE TRAVAIL

2.1. Outils existants

2.1.1. La modélisation hydraulique numérique

Bien que d'autres moyens existent pour modéliser la dynamique fluviale d'un cours d'eau, comme l'utilisation des formules empiriques (modèle empirique) ou la conception d'une maquette 3D (modèle physique), l'outil numérique, basé sur des lois à base physique, se révèle être un outil très efficace. Il présente en effet les avantages de prendre en compte de nombreux paramètres et de réaliser rapidement des calculs longs et complexes de l'évolution temporelle des variables et ce, en plusieurs dimensions. Il est ainsi possible d'analyser les répercussions de plusieurs options à moindre coût et surtout sans conséquence. Les interfaces graphiques permettent de plus à l'ingénieur de visualiser rapidement les résultats des différents calculs et ainsi de procéder à une analyse efficace.

Les modèles utilisés sont de type mécaniste, c'est à dire qu'ils étudient le mouvement réel du fluide. Ils sont basés sur des principes physiques, et notamment les équations de Barré de Saint-Venant (1871) qui sont très utilisées par la communauté scientifique pour décrire les écoulements non stationnaires graduellement variés à surface libre (Vasquez, 2012). Ces équations, simplifications des équations de Navier-Stokes (Paquier, 2006), traduisent dans le temps et l'espace (uni- ou pluridimensionnel) la conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

Il existe trois principaux types de modélisation en fonction du nombre de dimensions traitées (Rousselot, Vetsch et Fäh, 2012).

La modélisation 1D considère que les écoulements suivent un axe privilégié qu'est celui du lit mineur. Les modèles associés sont basés sur des profils transversaux sur lesquels sont calculées les variations au cours du temps du niveau d'eau et de la vitesse moyenne d'écoulement. Le nombre de profils détermine la précision des résultats. Ce type de modélisation est très utilisé mais reste réservé aux projets qui demandent peu de détails ou qui concernent de grands linéaires. Il peut être maillé, pour représenter les confluences ou les différences d'écoulements entre lits mineur et majeur, ou à casiers où le lit majeur est entrecoupé par des digues qui forment des surfaces de stockage.

La modélisation 2D considère les écoulements en deux dimensions. Cela permet de représenter ces écoulements en lit majeur, indépendamment de la direction qu'ils suivent dans le lit mineur. Elle est de plus bien adaptée à la description de processus locaux pour lesquels la topographie précise, obtenue à partir d'un modèle numérique de terrain, est nécessaire. Les hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement sont moyennées sur la verticale de chaque élément de calcul représenté par une maille. Le calage est cependant très complexe car il nécessite de nombreux points où les hauteurs d'eau ou les vitesses sont connues, à la fois dans le lit mineur et dans le lit majeur. Il est de plus nécessaire de bien connaître les conditions aux limites. Le temps de calcul est plus long que pour un modèle 1D mais il est possible d'associer les deux types de modèles, de façon à obtenir la précision nécessaire sur des zones particulières dont on connaît parfaitement la topographie tout en limitant les temps de calcul.

La modélisation 3D offre la possibilité de résoudre des problèmes aux dimensions spatiales très réduites et où les courants turbulents jouent un rôle primordial. Les modèles 3D sont très

difficiles à mettre en place et sont essentiellement utilisés aux abords d'ouvrages hydrauliques comme par exemple les centrales hydroélectriques, ou pour les stations d'épuration. Ils ne sont pas ou peu utilisés pour modéliser les écoulements en rivière.

Au regard de ces caractéristiques, l'outil bidimensionnel apparaît effectivement comme le plus adapté pour notre cas. En effet la modélisation 3D, est bien trop complexe et inadaptée à la situation. La modélisation 1D, quant à elle, n'apporterait pas des résultats suffisants pour les écoulements en lit majeur et ne permettrait pas de traduire la dynamique latérale du lit.

2.1.2. Evolution morphologique du lit - Quantification du transport sédimentaire

2.1.2.1. Le transport solide en rivière – Formules empiriques

Comme nous l'avons décrit dans la partie 1.1.1.1., les cours d'eau transportent une charge solide depuis la source jusqu'à la mer. Les matériaux solides peuvent avoir une origine interne : érosion du fond, des berges et de la plaine alluviale sous l'action du courant, apport par un affluent ; ou externe : glissements de terrain, apport par le vent...

Ces éléments sont transportés par les écoulements sous deux formes principales (Malavoi et Bravard, 2010) :

- Par mise en suspension, lorsque le courant est suffisant pour les transporter
- Par charriage, soit par roulement sur le fond et saltation lorsque le courant n'est pas suffisant pour les mettre en suspension.

Le transport sous l'une ou l'autre de ces formes dépend de la force du courant mais également de la résistance du grain à l'entraînement. Cette résistance dépend essentiellement de son diamètre. On retrouve ces éléments dans la courbe de Hjulström (1935), qui utilise les couples vitesse du courant/diamètre du grain pour décrire l'activité de celui-ci.



Figure 9 : Formes de transport solide (Source : Degoutte, 2006)

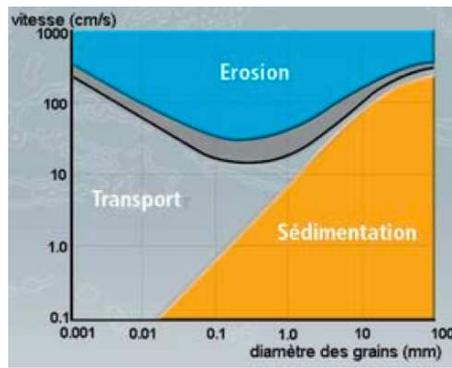


Figure 10 : Diagramme de Hjulström (Source : Malavoi et Bravard, 2010)

Les formules empiriques suivantes décrivent bien ces phénomènes.

La mise en mouvement des particules a lieu sous l'action de forces hydrodynamiques dues à l'écoulement, en fonction de leur propre poids (Degoutte, 2006).

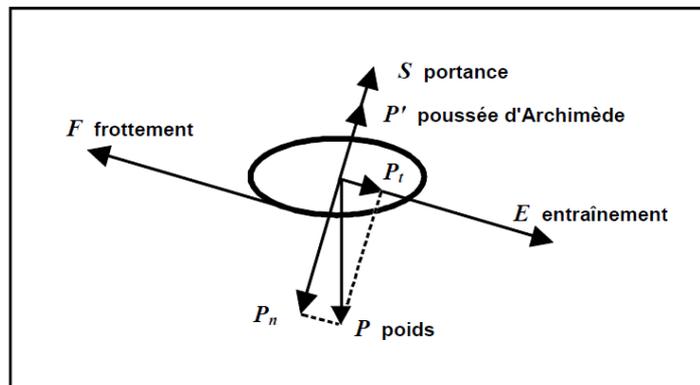


Figure 11 : Equilibre d'un grain au fond d'un chenal (Source : Degoutte, 2006)

En écoulement uniforme, ces forces s'équilibrent et on peut démontrer que la force d'entraînement s'écrit sur la section :

$$\sigma_0 = \rho g R_h I, \text{ la force tractrice en Pa ou N/m}^2$$

Avec ρ la masse volumique de l'eau, R_h le rayon hydraulique égal au périmètre mouillé sur la section mouillée, et I la pente. Lorsque le lit est large on peut négliger l'influence des bords et écrire que : $\sigma_0 = \rho g h I$.

En écoulement varié, la contrainte tractrice peut s'écrire en fonction des paramètres de l'écoulement utilisé en bidimensionnel que sont la hauteur d'eau et la vitesse moyenne, et de K qui caractérise la surface du fond du lit, selon la **formule de Manning-Strickler** :

$$\sigma_0 = \frac{\rho g}{K^2} \frac{U^2}{h^{1/3}}, \text{ la contrainte tractrice locale en régime varié en Pa ou N/m}^2$$

Avec K le coefficient de frottement de Strickler, U la vitesse moyenne des écoulements, et h la hauteur d'eau.

Une autre formule du même type existe. Il s'agit de la **loi de Nikuradse** qui s'écrit de la façon suivante selon $u^* = \sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho}}$:

$$\frac{U}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{30h}{ek_s} \right)$$

Avec k la constante de Kármán, égale à 0,4 et k_s la longueur de rugosité qui caractérise la surface du lit. Ce dernier paramètre dépend notamment des formes du fond.

En faisant l'hypothèse que le transport solide est un phénomène à seuil, un bilan des forces s'exerçant sur un grain de diamètre d permet de caractériser le début d'entraînement par le paramètre adimensionnel dit **paramètre de Shields** :

$$\sigma^* = \frac{\sigma_0}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d}$$

Où γ_s et γ_w sont respectivement les poids volumiques du sédiment et de l'eau, avec $2600 < \gamma_s < 2700 \text{ kg/m}^3$

On estime que le charriage débute pour une valeur du paramètre de Shields de 0.047 pour laquelle $\sigma_0 = \sigma_{cr}$ avec σ_{cr} **la force tractrice critique**, soit :

$$\sigma_{cr} = 0.047(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d$$

Remarque : Ces formules ne prennent pas en compte les effets d'armature et de pavage qui stabilisent le fond mais elles seront suffisantes pour cette étude puisqu'il s'agit déjà de tester les possibilités générales de la modélisation 2D en termes de prévision de l'évolution morphologique.

2.1.2.2. Définition de l'équilibre d'une rivière

Lorsque l'on intervient sur une rivière dans le cadre d'une renaturation, on cherche à aboutir à un état aussi proche que possible de l'état d'équilibre naturel, de façon à s'assurer de la stabilité après intervention. Il est donc nécessaire de caractériser cet équilibre en calculant une « géométrie d'équilibre », en considérant cependant le fait que, l'équilibre étant dynamique, il n'existe pas des valeurs de pente, de largeur ou de profondeur d'équilibre uniques, mais plutôt des gammes de valeurs.

Nous utiliserons pour caractériser cet équilibre **la pente d'équilibre** qui représente celle « qui permet le transfert vers l'aval, sans déformation majeure de la géométrie du lit sur le long terme, des débits liquide et solide imposés par l'amont » (Malavoi, Garnier, Landon, Recking, Baran, 2011). Elle peut être calculée à partir de l'expression du paramètre de Shields à l'équilibre, soit :

$$I_{eq} = \frac{0,047(\rho_s - \rho) \cdot d}{\rho R_h}$$

2.1.2.3. Techniques de prévision de l'évolution morphologique d'un cours d'eau

L'équilibre naturel du cours d'eau étudié étant défini, et le fonctionnement de l'hydrosystème

connu (partie 1.1.1.), il est possible de prévoir les évolutions de morphologie qui auront lieu pour atteindre cet équilibre. Plusieurs méthodes sont utilisées pour décrire cette évolution (Malavoi, Garnier, Landon, Recking, Baran, 2011).

La méthode des pentes d'équilibre, consistant à calculer la pente d'équilibre, locale ou globale, est très utilisée, notamment pour connaître la pente que devra avoir un bras que l'on souhaite rouvrir, ou pour décrire l'évolution du profil en long (notamment quantifier l'érosion régressive induite) après la suppression ou l'arasement d'un seuil.

Les formules empiriques de transport solide exposées dans la partie 2.1.2.1 sont aussi efficaces pour prédire l'évolution morphologique d'un cours d'eau. Elles permettent de localiser les lieux à tendance érosive et ou à tendance au dépôt, de mesurer l'érodabilité d'une zone etc.

Les modèles physiques apportent de bons résultats dans le cas où le lit est sollicité dans les trois dimensions. Ce type de modèle est très difficile à mettre en œuvre et nécessite non seulement un bon savoir-faire mais aussi de nombreuses données d'entrée. Une autre difficulté réside dans l'échelle et les lois de similitudes associées, qui doivent garantir que ce qui est observé avec le modèle se reproduira dans les mêmes proportions dans la réalité.

Les modèles numériques en morphologie fluviale sont, de la même manière que les modèles hydrauliques, de trois types. Les modèles 1D sont bien adaptés pour l'évolution à grande échelle du profil en long, tandis que les modèles 2D permettent de prendre en compte la dynamique latérale et donc la modification de la géométrie en travers. Les modèles 3D, beaucoup plus complexes, sont eux de plus en plus utilisés pour les thématiques d'érosion des littoraux.

La plupart des modèles modifient la géométrie du lit en fonction du transport solide calculé à chaque pas de temps (Malavoi, Garnier, Landon, Recking, Baran, 2011). Les conditions limites à entrer sont un hydrogramme de crue, les conditions de contrôle hydraulique aval et l'apport solide en entrée, facteur le plus difficile à quantifier.

Il est possible de coupler une modélisation hydraulique avec une modélisation de la morphologie. Cette option présente l'immense intérêt de prendre en compte les interactions entre les modifications de la géométrie du lit et les variations hydrodynamiques : modification de la ligne d'eau, modification des vitesses locales entraînées par une modification du lit et entraînant une autre modification du lit. Les deux calculs sont ainsi menés en parallèle et échangent les nouvelles valeurs des paramètres à chaque pas de temps. Ceci est possible avec le logiciel TELEMAC 2D que nous utiliserons pour cette étude, qu'il est possible de coupler avec le logiciel SISYPHE, également bidimensionnel et développé par le même constructeur. M. De Linares a testé ce couplage pour sa thèse de doctorat intitulée « Modélisation numérique bidimensionnelle du transport solide et de la dynamique fluviale. Validation sur deux sites en Loire et sur l'Arc. » (2007) et en a conclu une bonne robustesse de ces codes de calculs et des résultats satisfaisants malgré le fort besoin en données sédimentaires que ce type de calcul nécessite. Cet élément a d'ailleurs été la grande limite à son travail et cela peut être généralisé à de nombreux logiciels pour le moment. Un exemple des résultats qu'il a obtenu est présenté en Annexe 6.

D'autres logiciels comme le logiciel BASEMENT, développé par l'Office fédéral de l'environnement en Suisse (Rousselot, Vetsch et Fähr, 2012), offrent la possibilité de coupler les deux calculs dans un unique logiciel. Les processus peuvent de plus être modélisés en 1D et/ou en 2D, selon les besoins pour une étude complète ou des processus locaux.

2.2. Démarche pour évaluer l'impact d'aménagements

La méthode de prévision de l'évolution morphologique du cours d'eau choisie pour cette étude est l'utilisation des formules empiriques à partir des résultats de hauteur d'eau et de vitesses, issus de la modélisation hydraulique. Le couplage des calculs hydrodynamique et morphologique, bien que fort intéressant pour une problématique comme la nôtre, n'a pas été retenu car il est bien trop complexe à mettre en œuvre dans le temps imparti. L'utilisation de cette méthode demanderait beaucoup de temps, à la fois pour la préhension du logiciel mais aussi pour la construction du modèle en lui-même. Celui-ci nécessite en effet bien plus de données granulométriques et géométriques précises pour le fond du lit que celles dont le Conseil départemental dispose actuellement. De plus, ce type de modèle est très difficile à ajuster, et le calage ou du moins la validation, seraient encore très chronophage. Enfin il faut noter que le temps de calcul, déjà lourd pour le seul calcul sur TELEMAC 2D, ralentirait encore les recherches.

Dans le but de répondre aux objectifs de cette étude, plusieurs situations ont été testées.

2.2.1. Choix des situations tests

Chacune des situations a été testée pour une crue centennale, crue de dimensionnement habituelle des projets de protection contre les crues. On part du principe que si un aménagement tient lors d'une crue de cette ampleur, il tiendra pour des crues de périodes de retour inférieures.

La première situation simulée est la situation actuelle. Les résultats devraient permettre de montrer si le tronçon est globalement en équilibre dynamique et de prévoir l'évolution du lit si aucune intervention n'est réalisée. On pourrait ainsi justifier par la méthode développée dans cette étude l'intérêt ou non d'interventions.

Deux situations de renaturation au niveau de la confluence avec la Weiss ont été analysées. La première consiste à reconnecter les zones en rive droite et en rive gauche où sont visibles des annexes hydrauliques de type Paléopotamon - c'est à dire complètement séparées du chenal principal et mises en eau lorsque le débit est suffisant pour que l'eau surverse localement au dessus des digues ou les contourne - par ouverture locale des digues. En rive droite les restes d'un chenal sont encore visibles, et bien qu'il soit colmaté sur une partie, une certaine continuité se dessine. Le secteur en rive droite, lui, n'est plus constitué que de petites dépressions discontinues. Cette intervention permettrait de mettre en valeurs ces chenaux en tant qu'annexes hydrauliques actives. Cela pourrait créer d'autres « zones nature » à l'image de celle créée plus en aval, et constituer un habitat riche en biodiversité. Les deux questions principales liées à cette situation sont de savoir si ces zones reconnectées sont viables à long terme et si le risque d'inondation n'est pas augmenté.

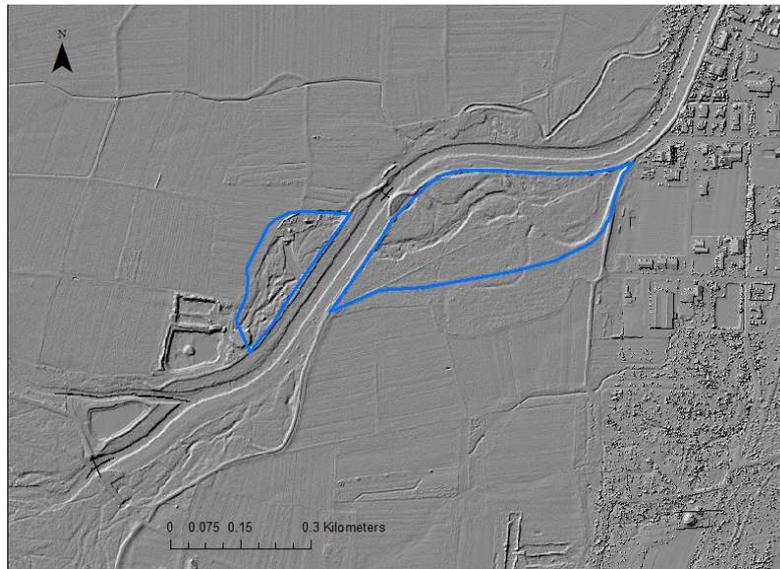


Figure 12 : Localisation des deux secteurs d'intérêt pour les situations tests

La seconde est plus ambitieuse puisqu'elle consiste à ouvrir un second bras passant par ces zones. Cet aménagement rétablirait d'un même coup la continuité écologique longitudinale, piscicole et sédimentaire et apporterait de plus des avantages certains en termes de mobilité latérale. L'évolution à long terme de cette situation est très intéressante : si ce nouveau bras devient le principal, un comblement progressif du seuil à ce niveau pourrait avoir lieu et on aboutirait à un tronçon en anastomoses.

La démarche concrète pour tester ces différentes situations consiste en une analyse des modifications des paramètres morphodynamiques.

2.2.2. Hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement et risques liés aux inondations

Le calcul hydraulique donne pour chaque élément du maillage l'évolution au cours de la crue et de la décrue, de la hauteur d'eau et de la vitesse moyenne sur la verticale. La démarche consiste à calculer les maximums asynchrones de ces deux variables pour mesurer les modifications maximales qui peuvent avoir lieu sur la période de crue, liées aux nouveaux aménagements et quantifier les éventuels risques associés. Les lignes d'eau sont également exploitées afin de mettre en valeur d'éventuelles modifications.

2.2.3. Forces tractrices et évolution prévisible de la morphologie du lit

Il s'agit de calculer pour chacune des situations les forces tractrices liées à l'écoulement et les contraintes critiques pour l'ensemble du secteur, puis de comparer les deux afin de cartographier les zones à dynamique érosive et les zones dont la tendance est plutôt au dépôt. M. De Linares ayant montré dans sa thèse (2007) que les deux formules des contraintes tractrices calculées en fonction des résultats qu'apportent les simulations (Manning-Strickler et Nikuradse) donnent des résultats équivalents, la formule utilisée pour cette étude est celle de Manning-Strickler, plus aisée à mettre en place.

Le calcul des forces tractrices utilise les valeurs maximales asynchrones des variables de calcul. Ceci permet de raisonner sur le risque maximal encouru.

Les contraintes critiques sont calculées à partir de trois valeurs de granulométrie, d'après les relevés qui ont pu être réalisés par le Conseil départemental. Ces valeurs ont été étendues à la plaine alluvionnaire, avec d'amont en aval des granulométries de 70, 60 et 50 mm. La cartographie de ces contraintes se trouve en Annexe 7.

Dans l'objectif de comparer la force de l'écoulement à la résistance à l'entraînement, et a fortiori de cartographier la dynamique morphologique du cours d'eau, la valeur du paramètre de Schields est calculée en tout point mouillé du modèle et est comparée à la valeur seuil 0.047. Dans la même optique, les valeurs brutes de contraintes critiques sont soustraites aux valeurs de forces tractrices. On montrera dans la suite que ces deux manières de procéder apportent des résultats tout à fait comparables.

2.3. Méthode de travail pour la construction d'un modèle 2D

2.3.1. Présentation du logiciel TELEMAC 2D

TELEMAC 2D est un logiciel de modélisation d'hydraulique à surface libre en deux dimensions du système TELEMAC, développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de la Direction des Recherches et Développement d'EDF. Il est utilisé autant dans le domaine fluvial que maritime.

Les résultats principaux des calculs hydrauliques sont la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale en chaque point du maillage de résolution. Ce logiciel prend en compte notamment les frottements de fond, la turbulence, les écoulements torrentiels et fluviaux, le suivi de traceurs, ou encore le traitement de singularités (seuils, digues, buses). Un autre atout de ce logiciel est la prise en compte de « bancs découvrant » et des plaines d'inondations, c'est à dire du fait que certains nœuds en eau ne puissent plus l'être au pas de temps suivant. Cela permet notamment de modéliser les décrues.

Ce logiciel fonctionne avec des mots clés et des fichiers précis en entrée et en sortie. En entrée sont nécessaires :

- Le fichier de paramètres, qui permet au logiciel de savoir dans quels autres fichiers il doit trouver les données dont il a besoin et qui décrit les différents paramètres et options de calcul.
- Le fichier de maillage, qui contient la structure des mailles, les coordonnées des nœuds, et les données de topographie et de coefficients de frottement qui y sont associés.
- Le fichier des conditions aux limites, qui décrit le type de chacune des frontières
- Le fichier des conditions initiales, qui permet la reprise d'un calcul
- Le fichier contenant les caractéristiques des ouvrages
- Le fichier Fortran qui contient les sous-programmes nécessaires à la simulation (l'utilisateur peut utiliser ce fichier pour ajouter des lignes de codes selon ses besoins).

D'autres fichiers d'entrée existent mais les options qui y sont associées ne seront pas utilisées pour cette étude.

TELEMAC 2D n'ayant pour interface qu'une fenêtre de commande dans laquelle on appelle le fichier de paramètres, d'autres logiciels sont utilisés en pré- et post-processing :

BlueKenue, développé par le Centre Hydraulique Canadien (CHC), est le logiciel utilisé pour créer le maillage du modèle sous format selafin. Il permet de créer un maillage non structuré, c'est à dire que celui-ci est défini par des éléments interconnectés que sont les mailles, et non simplement par des nœuds comme cela serait le cas pour un maillage structuré. Cela permet aux mailles de s'ajuster à une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité et de s'adapter aux contraintes imposées par les singularités du secteur comme des lignes de rupture (Boudjeris, 2011). Les mailles sont de plus de forme triangulaire, ce qui permet au maillage de s'adapter le plus justement à la topographie et ainsi de révéler les spécificités.

Fudaa-Prepro a été conçu pour être l'interface graphique des logiciels Reflux, Rubar et TELEMAC, jouant le rôle de superviseur (exploration des données et lancement des codes de calcul), d'éditeur de projet (entrée des différents paramètres, interpolation de la topographie dans le maillage, conditions limites et initiales) et de post-processeur (visualisation et exploitation des résultats).

Le schéma en Annexe 14 représente la méthode utilisée avec la place de chaque logiciel et les échanges possibles entre eux. D'autres méthodes d'obtention du modèle sont possibles, comme utiliser BlueKenue également en post-traitement ou y entrer directement les conditions limites et la topographie. Le maillage peut être réalisé par le logiciel Matisse. Enfin, pour exploiter les résultats il est possible d'utiliser les logiciels BlueKenue, Rubens ou Fudaa-Prepro. Nous ne proposons donc ici qu'une méthodologie particulière avec les logiciels à disposition.

2.3.2. Délimitation du secteur modélisé

La délimitation du secteur modélisé s'est d'abord basée sur les zones inondées décrites par le PPRI. La limite longe la voie de chemin de fer. Si l'objectif principal de cette étude avait été l'analyse des inondations, il aurait été préférable d'étendre le modèle encore plus à l'est. Ici le choix a été fait de limiter le modèle aux zones utiles pour l'analyse de l'évolution de la morphologie du lit. L'impact sur l'inondation au droit de la voie ferrée est tout de même accessible par analyse des hauteurs d'eau calculées le long.

Les limites ont été dessinées perpendiculairement au lit mineur. La limite amont sur la Fecht est placée à la sortie d'Ingersheim, juste en aval de la route départementale. Les erreurs que l'on pourrait commettre en omettant des débordements avant la zone modélisée sont moindres. En effet l'encaissement et les protections de rives au sein du bourg, ainsi qu'un seuil important juste à la sortie jouant le rôle de section de contrôle, assurent un bon maintien des écoulements dans le lit mineur. L'analyse de la topographie corrobore cette conclusion. La même réflexion peut être menée pour la limite amont sur la Weiss. Cet affluent a été modélisé sur près d'1 km, de façon à ne pas fausser les apports en eau dans le modèle. L'extrémité du modèle se situe juste en aval d'un pont dont la section est large et l'amont endigué. Pour le débit considéré dans la Weiss pour la simulation et compte tenu de la topographie, les erreurs sur les apports en dehors du modèle peuvent être négligées. Enfin, la limite aval a été placée à l'aval des zones d'intérêt en veillant à se placer suffisamment loin du seuil présent à ce niveau pour être sur une zone en écoulement fluvial et non perturbé, dans un souci de justesse de la condition aval attribuée.

Le périmètre du secteur modélisé est visible en Annexe 2.

2.3.3. Topologie et maillage du modèle - Représentation de la topographie du site

La création du maillage est la première étape de la construction d'un modèle. Comme dit précédemment, le maillage est un ensemble d'éléments triangulaires, les mailles, formés par trois nœuds, et connectés les uns aux autres par des arêtes et des sommets. Chaque nœud se voit attribuer une altitude, et suite à l'interpolation de cette altitude au sein des mailles, c'est l'association de ces mailles qui représente la géométrie du site. Les écoulements se propagent de proche en proche, de maille en maille.

2.3.3.1. Traitement de la topographie

La préparation de la topographie est réalisée sur le logiciel ArcGIS à partir des données des deux modèles numériques de terrain (MNT) de l'Ill et de la Fecht. Il s'agit de quelques ajustements et corrections d'erreurs. Tout d'abord, lors de l'assemblage des deux plaques, un décalage de 42 cm a été relevé dans le profil en long de la rivière, juste à la jonction où il n'existe pourtant aucune irrégularité susceptible de créer un tel décalage. Les débits qui transitaient le jour où ont eu lieu les vols pour la création des deux plaques sont en effet différents ($6 \text{ m}^3/\text{s}$ et $11 \text{ m}^3/\text{s}$). La bathymétrie du lit mineur a donc été ajustée au débit le plus bas pour rétablir un profil en long correct. Il est important de noter ici que l'altitude du fond de la rivière correspond en fait dans le modèle à la ligne d'eau s'écoulant dans la Fecht pour un débit de $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Ceci n'est pas préjudiciable pour la qualité des résultats, compte tenu de la section trapézoïdale du lit mineur.

Le lit mineur doit subir un traitement spécifique de façon à supprimer tous les artefacts issus de la prise LIDAR, du fait notamment de la végétation. Cette opération a été réalisée sous le logiciel de modélisation hydraulique 1D HEC-RAS, offrant à la fois la possibilité de nettoyer le lit via une série de profil en travers, mais aussi de lancer une modélisation en régime permanent avec un faible débit permettant de lisser légèrement le profil en long de façon à ne pas perturber le calcul sous TELEMAC 2D. La remarque précédente quant à la qualité des résultats s'applique également ici. Cette étape requiert de suivre les règles de base suivantes concernant les profils en travers (Kreis, 2004) :

- Ils doivent être perpendiculaires à l'écoulement.
- Ils ne doivent jamais se croiser.
- Ils doivent décrire le profil en long, soit permettre de visualiser correctement les ouvrages afin de pouvoir les modéliser. Ils doivent donc être placés juste en amont et juste en aval.
- Ils doivent décrire les contractions et les élargissements des écoulements, ainsi que les courbes. C'est pourquoi leur fréquence doit être plus importante dans ces secteurs.



Figure 13 : Représentation des profils en travers pour le traitement sous HEC-RAS

Une fois les profils en travers nettoyés, un débit de 50L/s est injecté dans le lit mineur. Les résultats de la simulation sont ensuite exportés sous ArcGIS pour conversion en modèle numérique de terrain.

Les différents traitements sont enfin associés pour former un modèle unique du terrain dont sont tirées les données topographiques brutes à associer au maillage. La topographie complète est disponible en Annexe 8.

2.3.3.2. Mise en place du maillage

La structure du maillage prend en compte les différents éléments caractéristiques de la zone d'étude. Il est défini à partir de polygones, de lignes ou de points géoréférencés représentant ces éléments, qu'il est possible soit de créer sur le logiciel à partir de ses coordonnées, soit d'importer depuis ArcGIS.

La résolution du maillage par défaut a été fixée à 20 m, c'est à dire que les mailles du modèle auront une taille maximale de 20 m, mais un travail sur cette résolution permet d'augmenter la précision au niveau des zones d'intérêt, tout en limitant le nombre de mailles pour l'ensemble du modèle, afin de rester dans des temps de calcul corrects. Les surfaces où se trouvent les anciens chenaux sont ainsi densifiées à 4 m, de façon à pouvoir repérer les zones d'écoulements privilégiés et obtenir des résultats précis en termes d'évolution morphologique.

La résolution autour des digues est également affinée car elles constituent des zones stratégiques, les résultats dépendant du respect de la cote de la crête. En effet puisque l'altitude d'une maille est calculée en son barycentre, si celle-ci a des dimensions trop importantes par rapport à la crête, cela peut entraîner des abaissements locaux de la digue et donc faire naître des écoulements irréalistes de l'autre côté, qui se propagent de proche en proche dans le modèle et créent ainsi des inondations qui n'existeraient pas dans la réalité. Afin d'éviter ce phénomène, l'affinage du maillage à 2 m à ce niveau est complété en définissant les digues comme des lignes de rupture. Les mailles sont alors accrochées sur l'axe de la digue, et sa crête de largeur 4 m parfaitement représentée par deux mailles en travers. De la même manière le tracé visible des sorties des vannes de laminage est affiné pour éviter les dérivations des écoulements hors des chenaux et ainsi mettre en évidence l'impact de ce système dans la zone d'expansion des inondations.

Le lit mineur, lui, bénéficie d'un maillage particulier entre les rives, avec des mailles allongées dans le sens du courant, ce qui crée des lignes perpendiculaires à l'écoulement. Le nombre de mailles en travers est fixé à six pour une largeur à pleins bords de 18 m environ, de manière à représenter précisément le profil en travers du lit, tout en gardant un nombre d'éléments limités grâce à cette disposition particulière. Ce premier maillage peut ensuite être intégré dans le maillage général en tant que sous-maillage.

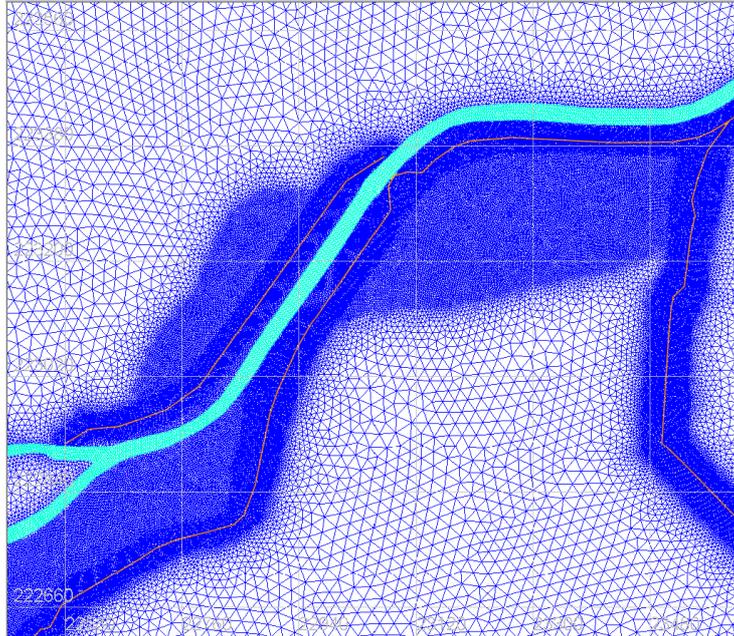


Figure 14 : Eléments du maillage (en turquoise le lit mineur, en rouge les lignes de rupture)

La résolution du maillage est enfin également affinée à 10 m sur une bande au niveau des conditions aux limites. Ceci est conseillé pour assurer le bon déroulement du calcul sous TELEMAC 2D. De même, un coefficient de variation de taille de maille de 1,2 a été appliqué pour la création du maillage, pour ne pas faire varier trop brusquement la taille des éléments et perturber le calcul. Le maillage complet se trouve en Annexe 9.

Il faut noter que TELEMAC 2D, par l'intermédiaire de Fudaa, est très sensible à la qualité du maillage. Un maillage qui peut sembler correct sous BlueKenue peut ne pas être accepté sous Fudaa, au titre de connexions entre les mailles non reconnues. Il faut donc être très vigilant à la qualité du maillage obtenu.

2.3.3.3. Etape d'échantillonnage

Une fois la construction terminée, la géométrie du maillage est exportée sous format selafin afin d'être exploitable sous Fudaa qui prend en charge l'étape suivante dite d'échantillonnage, qui consiste à lui associer les données brutes de topographie. Ces données sont en général importées sous format .txt avec les trois colonnes des coordonnées x, y et z, et associées aux nœuds puis calculées pour les mailles par interpolation. Compte tenu de la surface que couvre le modèle et afin de limiter la taille de ce fichier, les nœuds sont exportés sous format Shape et importés dans ArcGIS afin d'attribuer à chacun de ces nœuds une altitude et de ressortir un fichier .txt avec uniquement leurs coordonnées. Ce passage sous ArcGIS permet également d'attribuer à chaque nœud un coefficient de frottement de Strickler, attribution qui sera détaillée en 2.2.3.1.

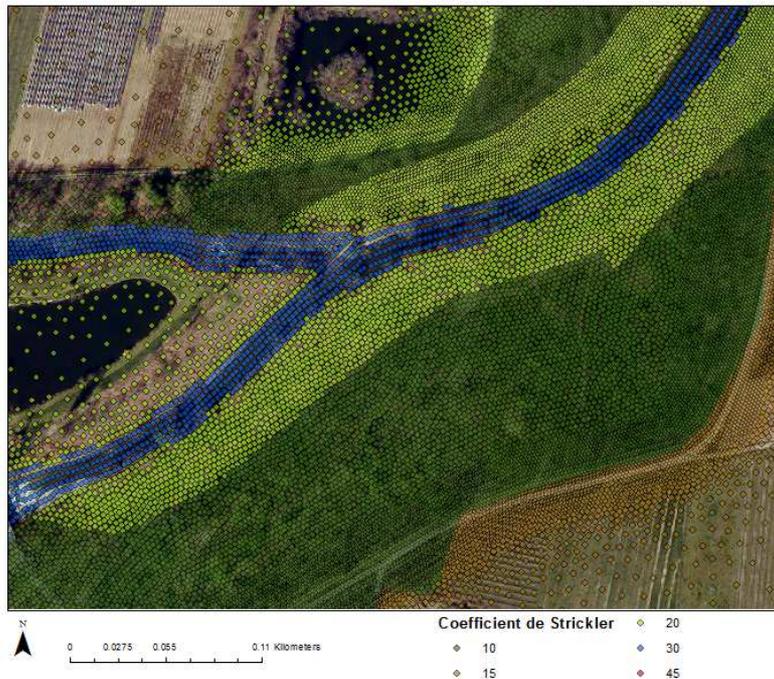


Figure 15 : Répartition des nœuds de maillage et des coefficients de Strickler au niveau de la confluence

2.3.3.4. Modélisation des ouvrages

Les ouvrages sont modélisés de manière différente selon leur type. Les seuils sont représentés uniquement via la topographie, tandis que les ponts sont modélisés sous la forme d'un alignement en travers de six buses ou ouvrages élémentaires (puisque le lit est représenté par six nœuds en travers). La méthode à suivre est la suivante : sur le MNT, le traitement des données LIDAR par le bureau de géomètres a donné lieu à un effacement des ponts. L'altitude des points à leur niveau doit donc être relevée à la cote du tablier. Un fichier .txt dont chaque ligne représente les caractéristiques d'un ouvrage élémentaire (nœuds d'entrée et de sortie, altitudes de ces nœuds, largeur, hauteur d'ouverture, coefficient) est créé. Il faut être vigilant au fait que les nœuds compris entre le nœud d'entrée et le nœud de sortie soient bien alignés de manière rectiligne, car cela risque d'arrêter prématurément le calcul, ce qui rend alors nécessaire la modification du maillage. Le coefficient associé à ces ouvrages est dans les codes de base de TELEMAC 2D un coefficient de pertes de charge. Mais dans la version utilisée par le Département sa signification a été modifiée suite au constat qu'il surestimait les pertes de charge. Ce coefficient est donc fixé à 0,5, mais il peut être modifié pour caler le modèle. Les vannes sont représentées de la même manière et intégrées dans ce fichier « ouvrages ».

2.3.3.5. Qualité du maillage

D'un point de vue purement géométrique, l'analyse du maillage proposée par le logiciel BlueKenue peut déjà apporter quelques éléments sur la qualité du maillage produit. Celle-ci donne des informations sur le nombre minimum et maximum de voisins pour les nœuds (si ce nombre est nul pour un des nœuds, le maillage ne sera pas utilisable), sur l'aire des mailles (des mailles trop petites peuvent gêner le calcul), ou encore sur les angles formés par les éléments. Un contrôle de l'aspect des éléments qui ne doivent pas être trop déformés par rapport à la géométrie de référence qu'est la forme équilatérale, et donc ni trop aplatis ni trop allongés, est également efficace pour prévenir des gênes lors du calcul.

La qualité du maillage est, pour l'aspect topographique, conditionnée par la résolution du maillage. Le maillage a été construit de manière à représenter la topographie du site le plus justement possible. Cependant pour vérifier cette condition, une résolution de 0.5 m aurait été nécessaire. Et plus la taille des mailles augmente plus l'on s'éloigne de la topographie réelle. La carte ci-dessous a été construite de manière à visualiser les erreurs d'altitude par comparaison du maillage et de la topographie du terrain ressortant du MNT. Comme on pouvait s'y attendre les plus grosses erreurs se trouvent dans les zones où la résolution du maillage est de 20 m, et ce, notamment dans la zone urbanisée. On a en effet un accroissement des erreurs à ce niveau du fait des changements d'altitude nets. Cela n'est cependant pas contraignant puisque cette zone est hors d'eau pour les débits considérés (voir résultats partie 3). Les crêtes des digues et le lit mineur sont bien représentés. En effet les erreurs importantes que l'on peut constater le long des berges ne sont autres que des artefacts liés à l'assemblage des différents MNT. Ces derniers n'ont pas été pris en compte lors de l'inscription de la topographie dans les nœuds puisque seuls les nœuds compris strictement dans le lit mineur ont été associés à l'altitude corrigée sous HEC-RAS.

On constate cependant des erreurs dans les chenaux utilisés pour le laminage au sortir des vannes malgré la précision supplémentaire qui a été attribuée à cette zone, ainsi que les chemins en remblais qui en réalité impactent les écoulements. Ce facteur sera pris en compte dans les résultats.

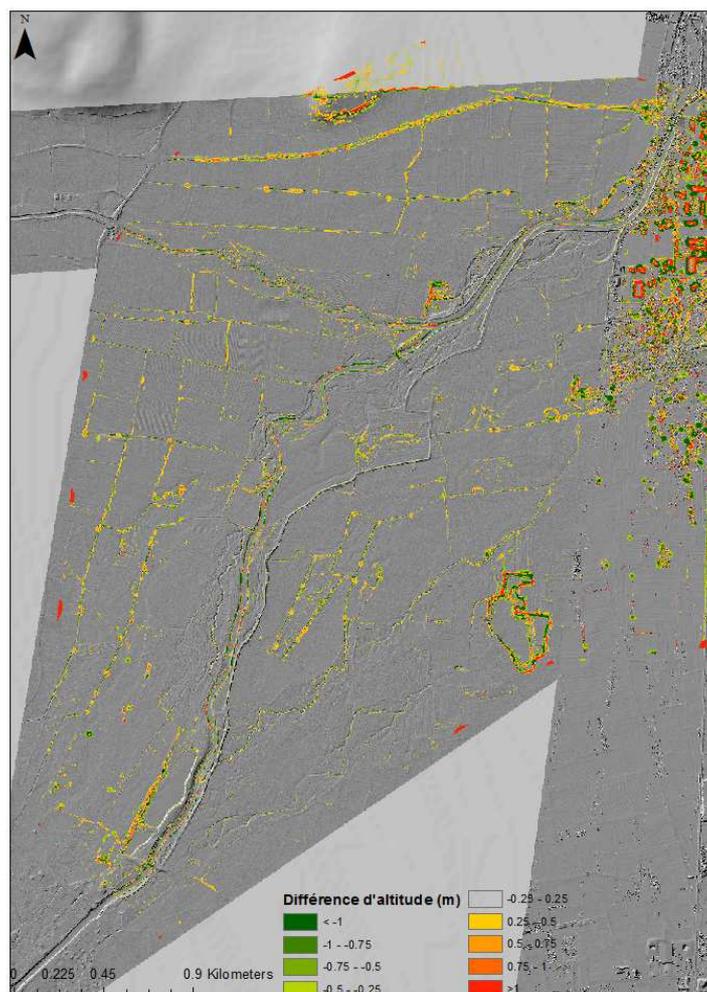


Figure 16 : Comparaison entre la topographie réelle et la topographie du maillage

2.3.4. Prétraitement du modèle

2.3.4.1. Choix des coefficients de frottement

Le coefficient de Strickler est couramment utilisé pour décrire les phénomènes de dissipation d'énergie dans un écoulement. En écoulement 2D, ce coefficient comprend les pertes de charge liées aux frottements sur le fond du lit, à la viscosité, à la turbulence... Les pertes liées aux changements de directions sont reprises par le caractère 2D des équations résolues. Les valeurs utilisées sont répertoriées dans le tableau ci-dessous (Degoutte, 2006). La valeur choisie pour le lit mineur correspond à celle utilisée couramment pour les rivières à graviers, large et dont la végétation rivulaire est peu dense.

Tableau 1 : Valeurs du coefficient de Strickler

Occupation du sol	Valeur du Strickler ($m^{1/3}/s$)
Lit mineur	30
Zone enherbée/Prairie	20
Forêt	10
Vignoble	15
Zone urbaine	45

2.3.4.2. Importance des conditions aux limites et définition des conditions initiales

Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont représentées par des frontières de type solide (extrémités du modèle) ou liquide. Les frontières liquides peuvent être de type débit, hauteur ou vitesse imposés, hauteur et vitesse imposées ou sortie libre. Les conditions limites amont pour la Fecht et pour la Weiss ont été définies avec un débit imposé correspondant à la crue centennale, variable dans le temps, sous forme d'un hydrogramme. La forme d'hydrogramme qui a été choisie est celle de la crue de 1983, bien représentative des crues sur la Fecht, avec un volume étalé dans le temps (Annexe 10). Les valeurs de débit estimées pour la crue centennale sont $175 \text{ m}^3/s$ à l'amont de la confluence avec la Weiss, et $235 \text{ m}^3/s$ en aval. La valeur du débit entrant par la Weiss a donc été fixée à $60 \text{ m}^3/s$. La forme de l'hydrogramme correspondant a été arbitrairement calquée sur celui de la Fecht, du fait du manque de données actuel sur les crues de la Weiss à ce niveau.

La condition aval correspond à une courbe de tarage obtenue à partir de simulations avec les débits composant l'hydrogramme de la crue centennale sous HEC-RAS en utilisant le modèle 1D réalisé par le Conseil départemental.

La taille des frontières liquides, c'est à dire sa largeur ou le nombre de nœuds qui la décrivent, est un facteur auquel il faut être très vigilant. En effet les résultats peuvent être très différents selon la taille que l'on applique. Cela est bien visible sur l'expansion de l'inondation. A l'amont, si la frontière est trop étroite, celle-ci va se comporter comme une section de contrôle, les débordements en aval vont alors prendre une forme d'entonnoir, et peut être avoir lieu trop tôt par rapport à la réalité, et surtout avec des vitesses plus élevées. (Annexe 11). A l'inverse, si la frontière est trop large, de l'eau peut apparaître au niveau de points bas qui ne seraient pas en eau normalement. En effet le logiciel considère à l'instant t une cote de surface libre pour le débit entrant. Et tout nœud appartenant au bord liquide amont dont la bathymétrie est inférieure à cette cote se voit noyé à cette cote. La taille des bords liquides amont a donc été fixée, pour

la Fecht à partir d'une courbe de tarage obtenue via la modélisation 1D de la zone, et pour la Weiss via un calcul empirique avec la formule de Manning Strickler $Q = K_s \cdot S \cdot R_h^{2/3} \cdot \sqrt{I}$ où S est la section mouillée.

A l'aval, si une frontière liquide trop large ne change nullement les résultats, une frontière trop étroite entraîne un surstockage en l'amont et fausse les valeurs des variables calculées (Annexe 11).

La voie ferrée constitue une extrémité du modèle mais les retours d'expérience montrent que l'inondation s'étend au delà. C'est pourquoi un bord solide n'est pas adapté pour cette bordure. Une frontière liquide de type sortie libre a donc été placée le long de la voie. Bien que cela ne représente pas exactement la réalité sur ce secteur puisque la topographie de l'autre côté de la voie est interpolée par le logiciel, le surstockage obtenu avec un bord solide n'existe pas ici (Annexe 12).

Conditions initiales

Les conditions initiales peuvent être soit la reprise d'un calcul précédent, soit une initialisation des cotes de surface libre à la cote de la topographie. Dans la deuxième situation, qui sera le cas pour l'ensemble des calculs réalisés sur cette étude, il est conseillé d'entrer une hauteur d'eau initiale de 50 cm environ, dans les premiers nœuds des lits mineurs, de façon à aider le logiciel à démarrer le calcul. Si cette étape n'est pas suivie, ou que la hauteur d'eau entrée n'est pas suffisante pour une des conditions aux limites, le calcul ne peut pas démarrer. Ces conditions initiales telles qu'elles sont conseillées ne conditionnent en aucune manière les résultats. Cela serait cependant le cas si une hauteur d'eau non nulle était entrée dans une des mailles du lit majeur. L'eau se propagerait alors vers les points bas et occasionnerait des résultats biaisés.

2.3.5. Tests de sensibilité et vérification du modèle

Une fois le modèle fonctionnel, le modèle doit normalement être calé puis validé. Le calage consiste en un ajustement des paramètres hydrauliques de façon à ce que les résultats correspondent aux laisses de crue ou mieux, aux mesures de hauteurs, vitesses ou débits qui ont été relevés pour la crue simulée. Ce modèle ajusté est ensuite validé avec une autre crue. Le calage d'un modèle 2D est cependant très complexe en général (voir 2.1.1), et s'avère même impossible dans notre cas. En effet nous ne disposons d'aucune donnée chiffrée de ce type pour la zone d'étude. Ceci rend également impossible la validation du modèle. Face à ce constat, des tests de sensibilité ont été réalisés de manière à quantifier l'impact du choix du paramètre sur les résultats finaux du modèle. Il est cependant important de rappeler que cette étude n'a pas pour ambition d'aboutir à des résultats très précis comme une carte des inondations impliquant des conséquences comme la mise en place d'un règlement de PPRI, mais plutôt de donner une idée des résultats que l'on peut obtenir en matière de morphologie fluviale avec un modèle 2D. L'ambition en terme de précision n'est donc pas la même.

Seule la sensibilité au coefficient de Strickler a été testée. En effet le coefficient attribué aux ouvrages élémentaires n'a pas un impact notable sur les résultats au vu des surfaces concernées par rapport à la surface modélisée.

2.3.5.1. Test de la sensibilité du modèle au coefficient de Strickler

Deux simulations ont été lancées, la première avec des valeurs à Ks-10 et la deuxième avec Ks+10. Les valeurs exactes utilisées sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Valeurs du coefficient de Strickler utilisées pour les tests de sensibilité

Occupation du sol	Valeurs du Strickler pour Ks-10 (m ^{1/3} /s)	Valeurs du Strickler pour le modèle (m ^{1/3} /s)	Valeurs du Strickler pour Ks+10 (m ^{1/3} /s)
Lit mineur	20	30	40
Zone enherbée/Prairie	15	20	30
Forêt	5	10	20
Vignoble	10	15	25
Zone urbaine	35	45	55

Au regard des caractéristiques de la rivière, un coefficient de Strickler de 30 m^{1/3}/s a par exemple été choisi pour le lit mineur. Il s'agit de vérifier dans quelles proportions une modification de ce paramètre entrainerait une modification quantitative des contraintes tractrices calculées, et si finalement les conclusions quant à l'évolution morphologique du cours d'eau en seraient changées.

La sensibilité du modèle au paramètre de Strickler peut tout d'abord être décrite d'un certain aspect par l'expansion de la crue. Il s'agit de vérifier visuellement qu'un effet de seuil qui modifierait complètement le fonctionnement du cours d'eau, et donc les calculs de forces tractrices, n'est pas mis en jeu. On constate que la modification du paramètre a un fort impact sur les débordements et l'expansion en lit majeur : les frottements étant faibles en lit mineur pour la simulation Ks+10, la crue s'évacue rapidement vers l'aval en limitant les débordements en lit majeur. Inversement la simulation Ks-10 aboutit à une expansion importante de l'inondation. On constate que les modifications sont amplifiées pour l'abaissement, la gradation n'est pas linéaire. Les lignes d'eau en Annexe 13 en lit mineur traduisent bien ces conclusions. Cependant on remarque que le fonctionnement hydraulique n'est en rien modifié, les débordements et les écoulements en lit majeur et par les vannes de laminage se produisent de la même façon.

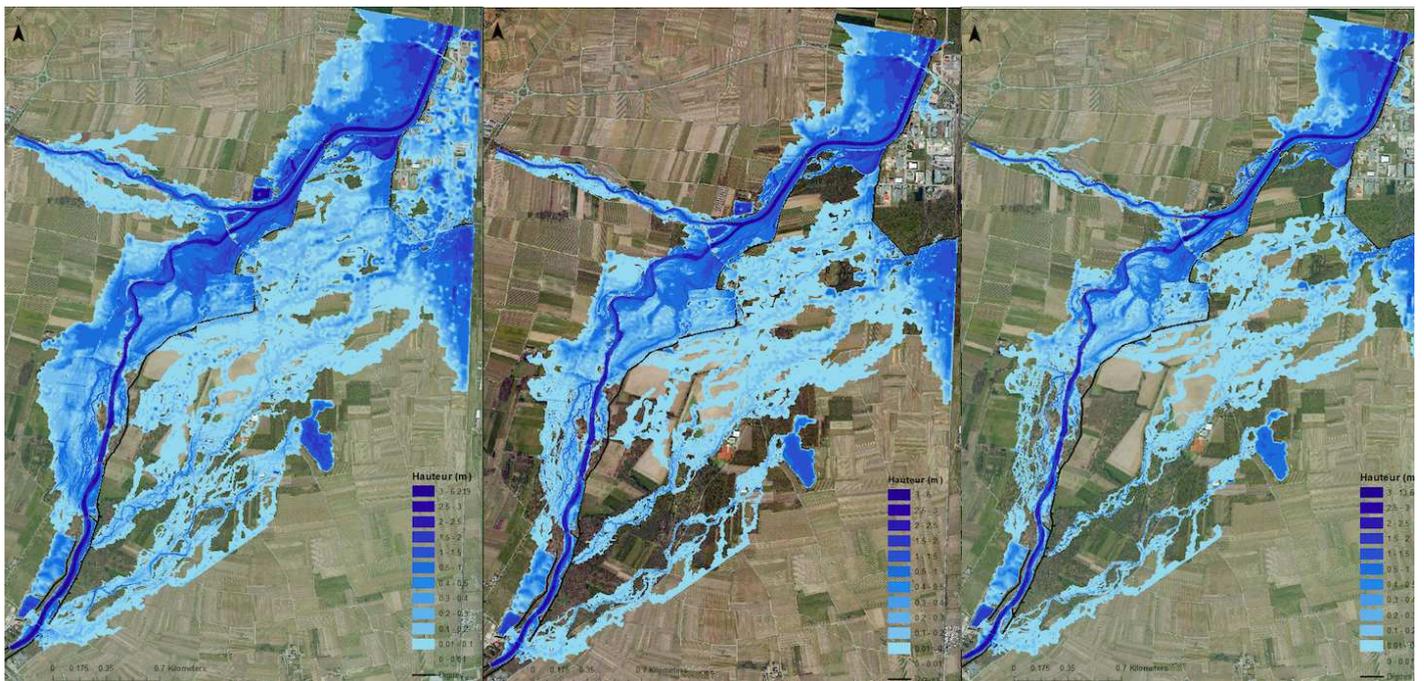


Figure 17 : Résultats des tests de sensibilité au regard de l'expansion de la crue.
a) Simulation avec Ks-10 b) Simulation avec le modèle final c) Simulation avec Ks+10

Le calcul de la variation qu'induit la modification du Strickler sur les valeurs de $\sigma_0 - \sigma_{Cr}$ obtenues permet de mettre en évidence une grande sensibilité du modèle à ce paramètre. Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Variation obtenue pour les valeurs de Tau0-Tau critique obtenues pour les différents tests de sensibilité

Variation entre les simulations Ks-10 et Ks+10	Variation entre la simulation Ks-10 et le modèle	Variation entre le modèle et la simulation Ks+10
78%	65%	17%

Ces résultats mettent de plus de nouveau en évidence cette non-linéarité puisqu'une variation de $-10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ du Strickler par rapport à la valeur utilisée, soit 30%, induit une modification de 65% sur les résultats, et une variation de $+10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, une modification de 17%.

Ceci permet de conclure sur deux éléments importants : ce paramètre peut efficacement être utilisé pour caler le modèle, et les résultats d'un modèle non calé sont très dépendants de la justesse de ce paramètre.

Au regard de ce que cette sensibilité donne en termes qualitatifs sur les conclusions quant à l'évolution morphologique, on constate que même si la répartition des zones d'érosion et des zones de dépôt reste à quelques exceptions près globalement la même (Figure 18). (Les zones de dépôt sont représentées avec un dégradé de bleu, les zones à tendance érosive, avec un dégradé de rouge.), la dynamique érosive est globalement amplifiée pour un abaissement du coefficient et inversement, et ce de manière nette.

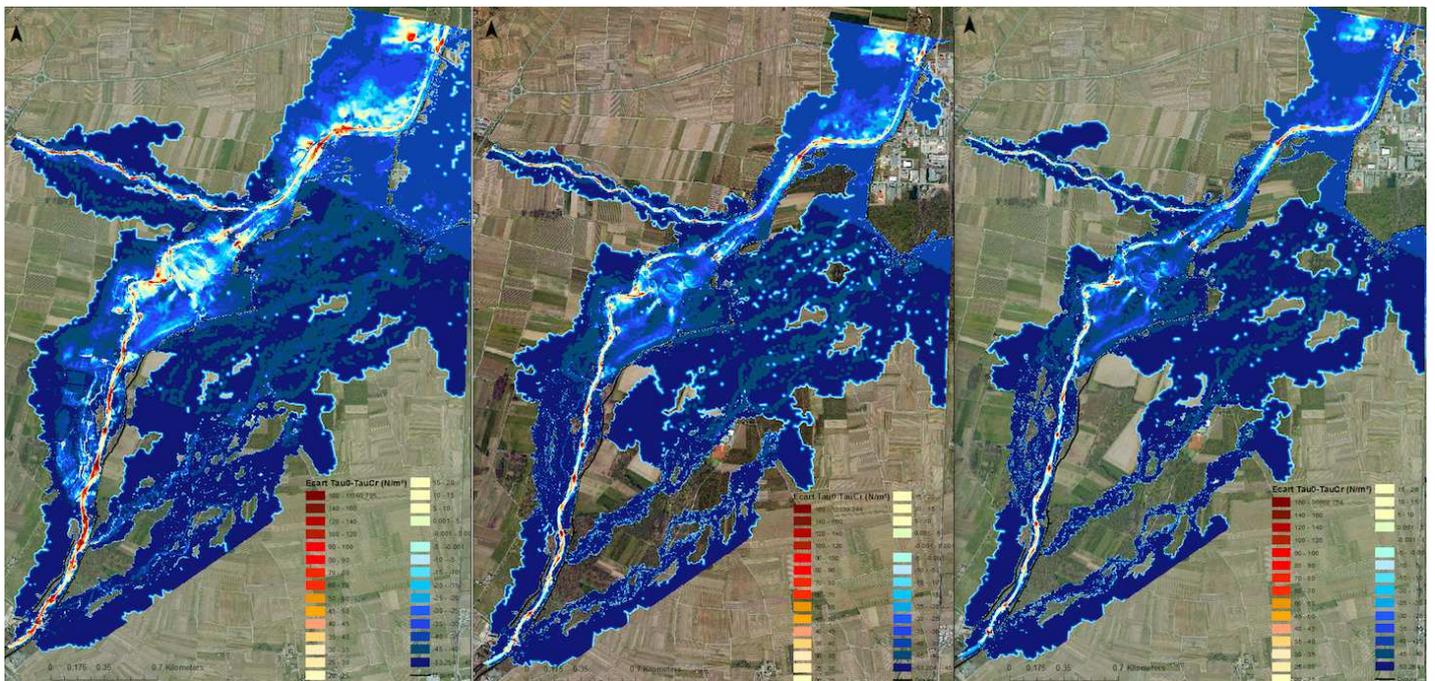


Figure 18 : Résultats des tests de sensibilité au regard de la répartition de la dynamique morphologique.
a) Simulation avec Ks-10 b) Simulation avec le modèle final c) Simulation avec Ks+10

Il faudra donc rester prudent quant aux résultats qui seront développés dans la suite, même si l'on reste dans des ordres de grandeurs cohérents pour une rivière de plaine, à graviers, large et dont la végétation rivulaire est peu dense. La vérification du modèle va permettre de justifier au moins partiellement le choix du coefficient.

2.3.5.2. Vérification du modèle

Le fait que l'étape de calage/validation ne soit pas possible, et les résultats des tests de sensibilité, rendent la vérification des résultats amplement nécessaire. Le modèle peut être justifié à partir de plusieurs éléments. En ce qui concerne l'expansion de l'inondation ainsi que les hauteurs d'eau associées, les résultats concordent avec les expériences de terrain du Conseil départemental. La plupart des surverses au dessus des digues sont en effet connues et les hauteurs d'eau ainsi que les vitesses dessinent les anciens chenaux et fossés où l'on pouvait s'attendre à voir apparaître des écoulements préférentiels. L'expansion de l'inondation coïncide de plus avec les résultats obtenus avec la modélisation 1D, et quelques vérifications simples des hauteurs d'eau sur quelques coupes en travers du lit avec la formule de Manning Strickler assurent la cohérence des résultats.

En ce qui concerne la morphologie du lit, les valeurs des variables obtenues concordent avec les éléments de transport solide visibles sur le site. Concrètement, les bancs de graviers ou les radiers correspondent à des zones associées à une valeur du paramètre de Schields inférieure à 0,047. A l'inverse les zones où des encoches d'érosion ont été relevées, ainsi que les tronçons où l'on sait que le lit a tendance à s'enfoncer, correspondent bien à des valeurs du Schields supérieures à la valeur de référence. Par exemple, la zone nature, dont les retours d'expérience ont montrés qu'elle tendait à se combler au fil des années, se trouve dans une zone clairement à tendance au dépôt. La répartition transversale des forces tractrices est bien représentative avec des valeurs plus élevées du côté de la rive concave, et plus basses du côté de la rive convexe (voir résultats partie 3.1.).

On peut de plus visualiser un gradient longitudinal des vitesses, avec des valeurs plus fortes dans les zones à pente importante et au niveau des seuils, et des valeurs plus faibles au niveau des bancs de graviers. Le gradient de vitesse transversal n'est lui pas net, ce qui s'explique par le fait que le logiciel ne prend pas en compte l'énergie cinétique et le phénomène d'accélération n'est donc pas retranscrit. La répartition transversale des forces tractrices est donc uniquement due à la répartition des hauteurs d'eau.

Au regard de ces différents éléments, le modèle réalisé semble cohérent. Ceci permet de justifier en partie le choix du coefficient de Strickler mais ne peut permettre de le valider. On note cependant des valeurs aberrantes pour les vitesses et donc les forces tractrices au niveau de deux seuils. Ceci s'explique par le fait que le logiciel effectue ses calculs en plan et ne prend donc pas en compte la composante verticale de la vitesse. Ainsi sur les seuils à hauteur importante, le logiciel considère une pente forte et en déduit des vitesses ne correspondant pas à la réalité. Bien que les valeurs soient surestimées au niveau des seuils, la répartition des contraintes qui en découlent reste cohérente avec une dynamique érosive à leur niveau.

Les différents outils et techniques existants pour modéliser le fonctionnement hydraulique la zone d'étude lors d'une crue centennale, et prévoir son évolution morphologique ayant été étudiés, il a été choisi d'exploiter les résultats (hauteurs d'eau et vitesses) du calcul hydraulique bidimensionnel tels quels pour mettre en évidence les modifications du fonctionnement hydraulique liées aux interventions, puis avec des formules empiriques de transport sédimentaire, afin de mesurer et cartographier la dynamique sédimentaire du cours d'eau. Le schéma en Annexe 14 synthétise la démarche et la méthodologie choisie pour répondre aux objectifs.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Situation actuelle : fonctionnement hydrodynamique de la rivière

La situation actuelle a été modélisée en prenant en compte le système de vannage actuel, ainsi que la vanne supplémentaire plus en aval dont l'installation est prévue prochainement.

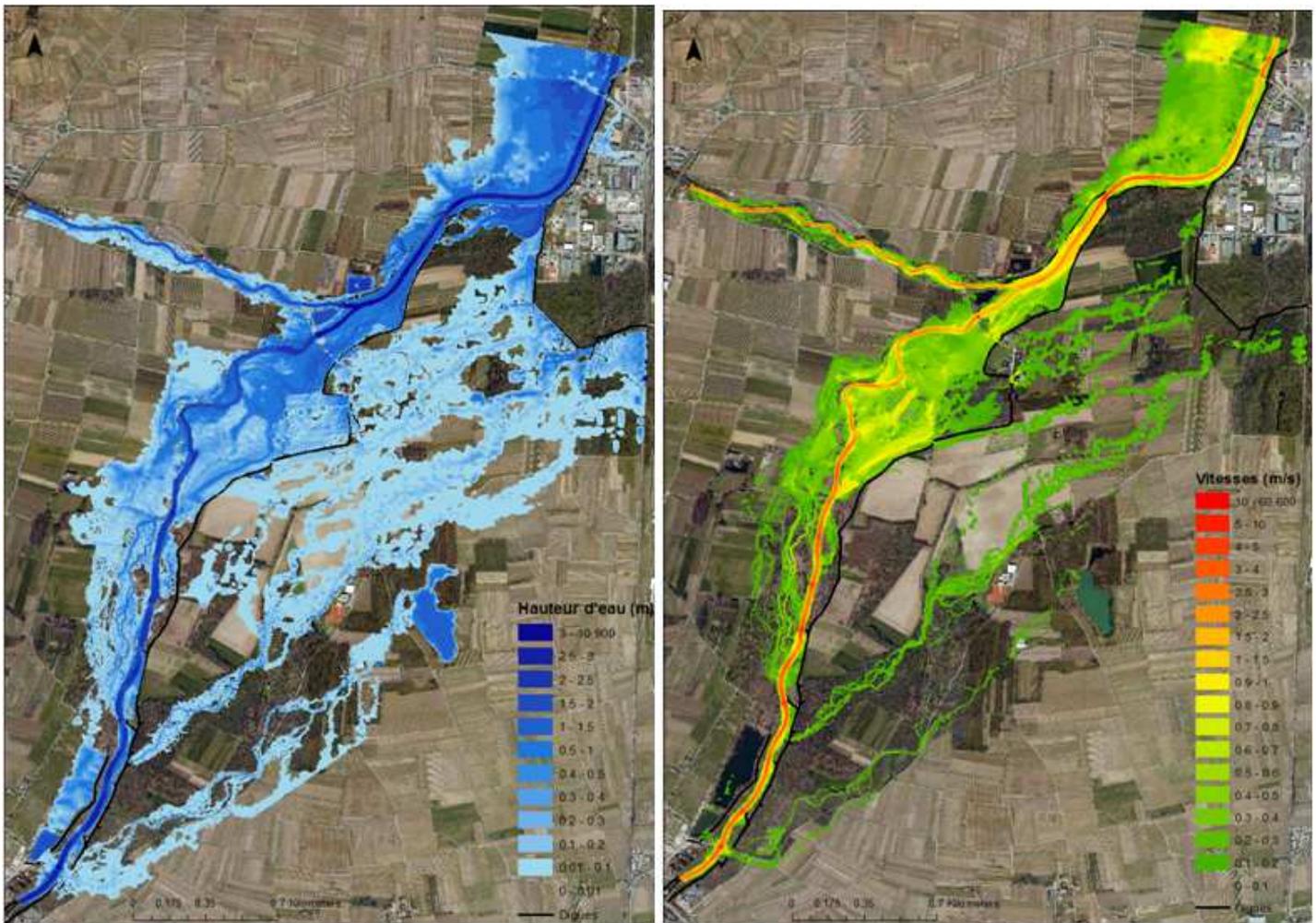
3.1.1. Fonctionnement actuel de la zone

3.1.1.1. D'un point de vue hydraulique

Si l'on suit les écoulements au fil de la montée de la crue, on constate que les premiers débordements ont lieu à la fois au niveau du pont aval et à l'amont de la confluence au sein des chenaux bien marqués en rive droite où ils remplissent peu à peu l'intérieur des digues jusqu'à surverser au niveau de deux abaissements locaux de la crête, puis au niveau de la route départementale plus à l'amont. Les digues encerclent l'eau au niveau de la confluence et la maintiennent à l'intérieur créant ainsi des écoulements préférentiels marqués dans les dépressions. Les vitesses y sont de l'ordre de près de 1 voire 2 m/s par endroits. Ce fonctionnement est illustré en Annexe 15 A.

Le pont tout à l'amont du modèle crée assez vite des débordements qui s'étendent le long de la route et finissent dans la plaine d'inondation, plaine inondée par les apports issus des trois ouvrages cadres et du busage dans la digue. Les départs au niveau de ces vannes sont nettement visibles sur les résultats.

Les deux zones que l'on souhaite renaturer sont inondées en crue. La zone en rive droite est alimentée essentiellement par l'aval par surverse dès $65 \text{ m}^3/\text{s}$, ainsi que légèrement par l'amont. La zone en rive gauche quant à elle est alimentée légèrement par l'aval pour des débits de l'ordre de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ par contournement de la digue, puis sur tout son linéaire à partir de $95 \text{ m}^3/\text{s}$, la digue ne dépassant pas 30 cm à ce niveau (Annexe 15 B).

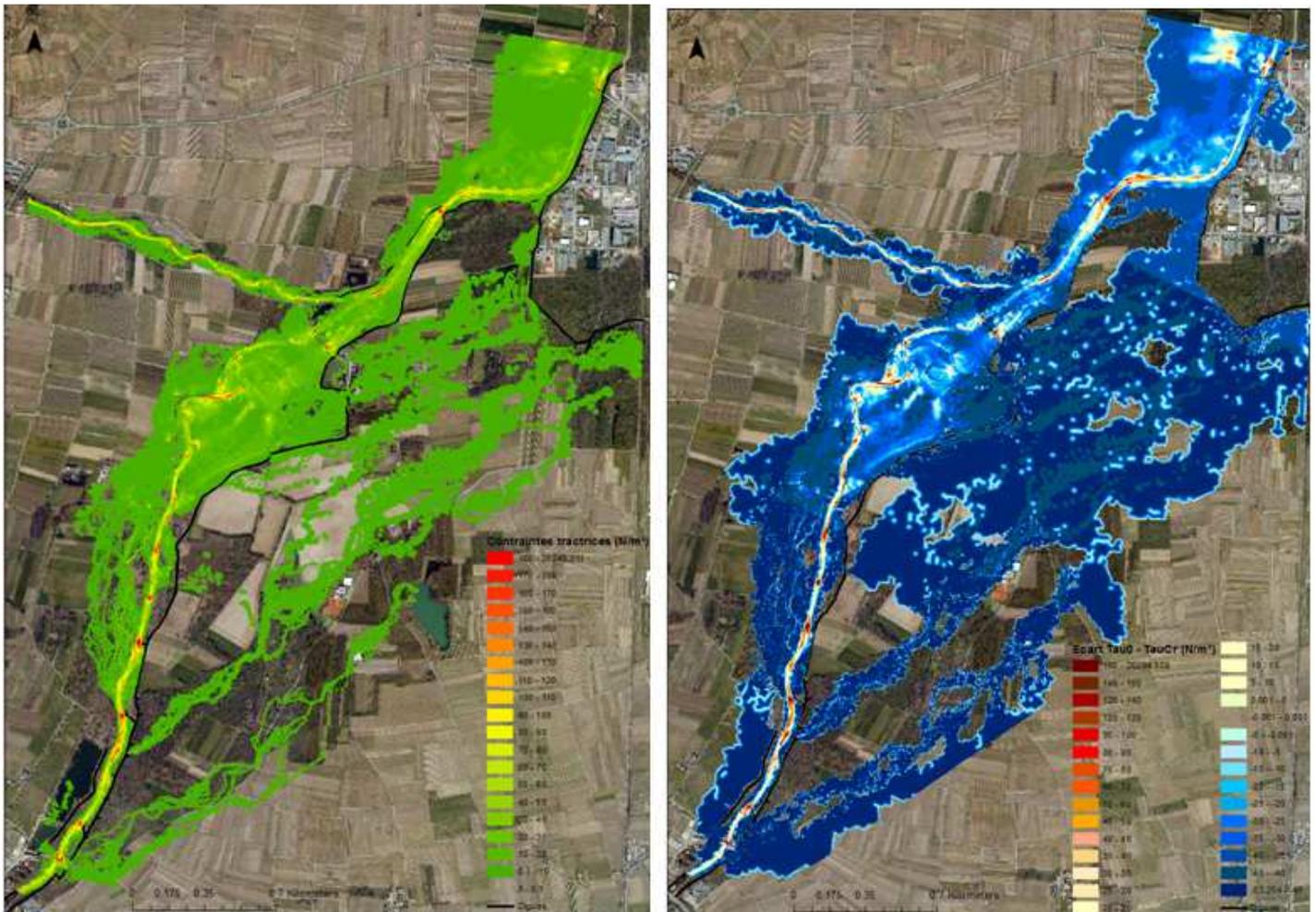


**Figure 19 : Résultats des variables de calcul hydraulique pour la situation actuelle.
a) Hauteurs d'eau b) Vitesses moyennes**

Remarque : Bien que cela n’apporte aucun élément de réponse à notre étude, il faut noter que la comparaison des résultats de modélisation du secteur avec et sans le système de vannages permet de mettre en évidence le fonctionnement hydraulique de ce système et le laminage des crues à l’aval (réduction du débit de pointe d’environ 10%) avec l’expansion précise de l’inondation (Annexe 16), cette situation ayant été modélisée en unidimensionnel mais jamais en bidimensionnel. Cette étude apporte donc des éléments de précision pour le Conseil départemental, qui lui permettent d’affiner ses connaissances des conséquences d’un tel système sur la zone.

3.1.1.2. D’un point de vue morphologique

Les cartes de la Figure 21 représentent les contraintes tractrices calculées à partir des résultats de la simulation ainsi que les écarts entre ces contraintes et les contraintes critiques.



**Figure 20 : Résultats de dynamique sédimentaire de la simulation pour la situation actuelle.
a) Contraintes tractrices b) Ecart entre les contraintes tractrices et critiques**

Au regard de la répartition des contraintes tractrices et de la dynamique sédimentaire, on constate que la Fecht est effectivement globalement en équilibre et surtout très stabilisée. Un kilomètre après la sortie du bourg et ce jusqu'à quelques centaines de mètres après la confluence, le lit mineur comporte des variations régulières dans l'intensité des forces liées à l'écoulement et donc une alternance de zones de dépôt et de zones d'érosion. La pente est de plus globalement proche dans les parties entre les seuils de la pente d'équilibre qui est de 4,1‰ à ce niveau. Cela montre que le cours d'eau est globalement en équilibre sur cette partie, s'étant adapté aux nouvelles conditions imposées par les différents aménagements. Le reste du linéaire est lui à tendance complètement érosive. Le cours d'eau cherche encore à s'ajuster aux aménagements et à atteindre une pente d'équilibre, mais reste bloqué par les digues et les protections de berges qui l'empêchent de reprendre du linéaire. Ceci est nettement visible après la confluence, sur le tronçon totalement artificiel.

En ce qui concerne la mobilité transversale, cette démarche vient conforter les conclusions de l'état des lieux réalisé par le Conseil départemental. Les valeurs importantes des contraintes tractrices sont localisées quasi uniquement dans le lit mineur. Cette remarque est renforcée par le fait que les zones à tendance érosive sont quasi exclusivement situées dans le lit mineur. Les deux zones d'anciens chenaux auxquelles cette étude s'intéresse particulièrement sont très nettement en cours de comblement. Les digues qui les ont déconnectées ont en même temps cassé la dynamique sédimentaire qui existait à ce niveau. On note cependant que dès que le lit sort du champ des seuils et n'est plus bloqué par les digues, il tend à retrouver une

certaine dynamique en lit majeur. Ceci est particulièrement observable dans le kilomètre qui précède la confluence (voir la répartition des seuils en Annexe 2). La Fecht présente donc un bon potentiel de restauration dès qu'elle n'est plus contrainte.

Cette démarche représente finalement bien le fonctionnement de la rivière, d'un point de vue hydraulique et morphologique, et vient corroborer parfaitement le bilan de sa qualité physique.

3.1.2. Evolution morphologique prévisible sans intervention

Au regard des résultats et des conclusions exposés précédemment, la Fecht ne pourra, malgré ses caractéristiques dynamiques naturelles, retrouver seule un bon fonctionnement hydromorphologique dans une échelle de temps à taille humaine. En effet bien que l'on puisse observer des zones de forte érosion, couplées à des zones d'écoulements préférentiels dynamiques bien marquées, qui peuvent à long terme devenir de nouveaux bras, la rivière reste trop stabilisée et bloquée latéralement pour pouvoir reprendre par elle-même des formes qui lui conviennent. La zone que l'on cherche à renaturer dans la suite notamment ne pourra retrouver sans intervention un caractère naturel.

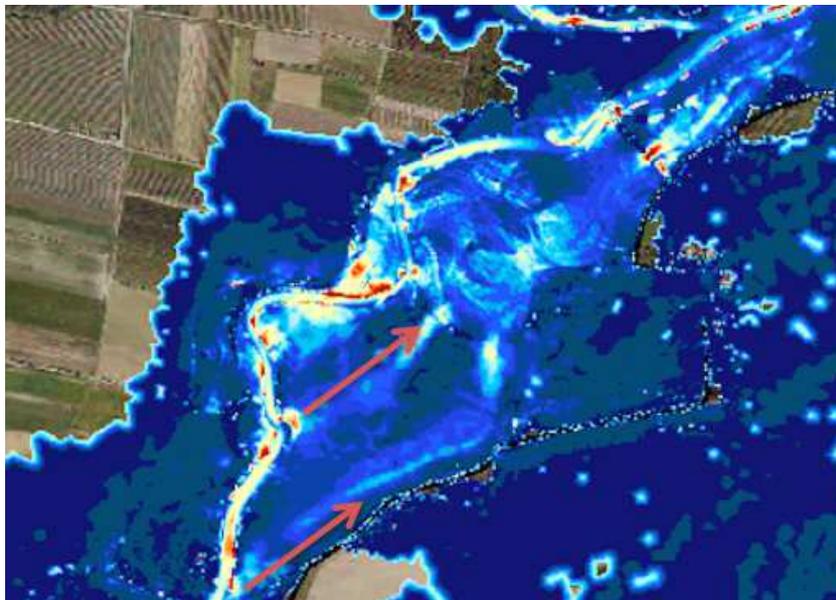


Figure 21 : Zone de dynamique sédimentaire avec mise en évidence d'écoulements privilégiés

Ces résultats viennent donc justifier par le calcul la nécessité d'entreprendre des interventions comme celles qui sont testées dans la suite.

3.1.3. Discussion quant à l'indépendance des zones de travail

Dans un souci d'efficacité en termes de temps de calcul, et considérant que les opérations de renaturation testées ne concernent qu'une petite partie en aval du modèle, il peut être intéressant de tester l'indépendance des zones de travail. Si le fonctionnement hydraulique en amont est indépendant du fonctionnement de la zone renaturée, et que les apports extérieurs au lit dans cette zone peuvent être négligés, alors le modèle pourrait être réduit à l'aval du modèle, après la confluence. Le temps de calcul ainsi que le temps de traitement des données pourraient ainsi être considérablement réduits.

La comparaison des simulations avec le système de vannage et sans, permet de mettre en évidence l'indépendance de la zone que l'on souhaite renaturer avec l'amont du modèle. En

effet la comparaison des résultats du fonctionnement morphologique de la zone pour les deux simulations présentée dans la figure ci-dessous, laisse observer de très fortes similitudes. On peut donc en déduire que le fonctionnement morphologique de cette zone est indépendant de celui plus en amont.

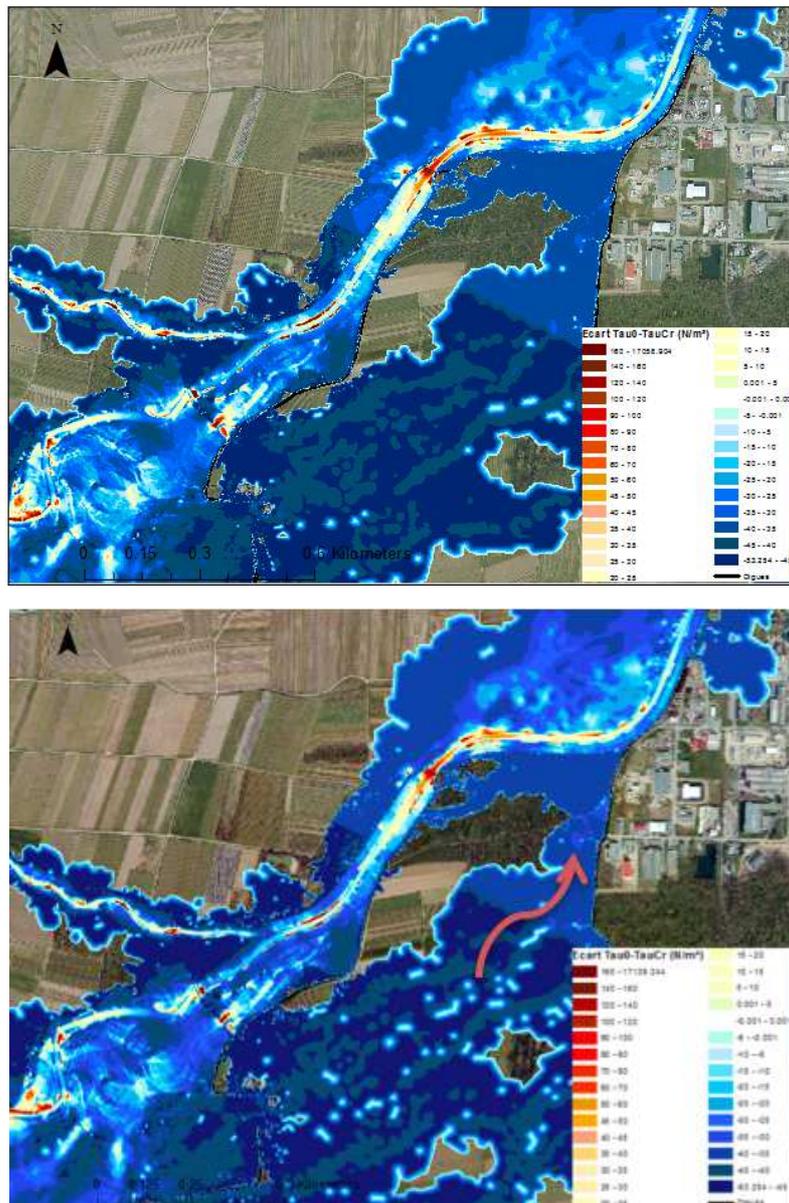


Figure 22 : Comparaison du fonctionnement morphologique de la zone d'étude (a) sans et (b) avec vannes, au travers des hauteurs d'eau maximales asynchrones

De plus, les apports extérieurs au lit mineur, dus notamment à l'expansion des écoulements issus des vannes (figure ci-dessus), peuvent être négligés par rapport au débit s'écoulant dans le lit mineur. En effet ces apports se limitent à $2 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un débit de crue de $235 \text{ m}^3/\text{s}$. L'analyse des vitesses ainsi que des vecteurs associés (Figure 24) et de la topographie, permet de négliger les transferts d'eau dans le sens inverse. Les écoulements se font en effet quasi uniquement dans le sens plaine alluviale-zone des chenaux en rive droite, puisque les débordements issus du lit mineur qui alimentent cette zone par l'aval se stockent dans les dépressions bien marquées et s'étendent ensuite avec des vitesses inférieures à $0,2 \text{ m/s}$.

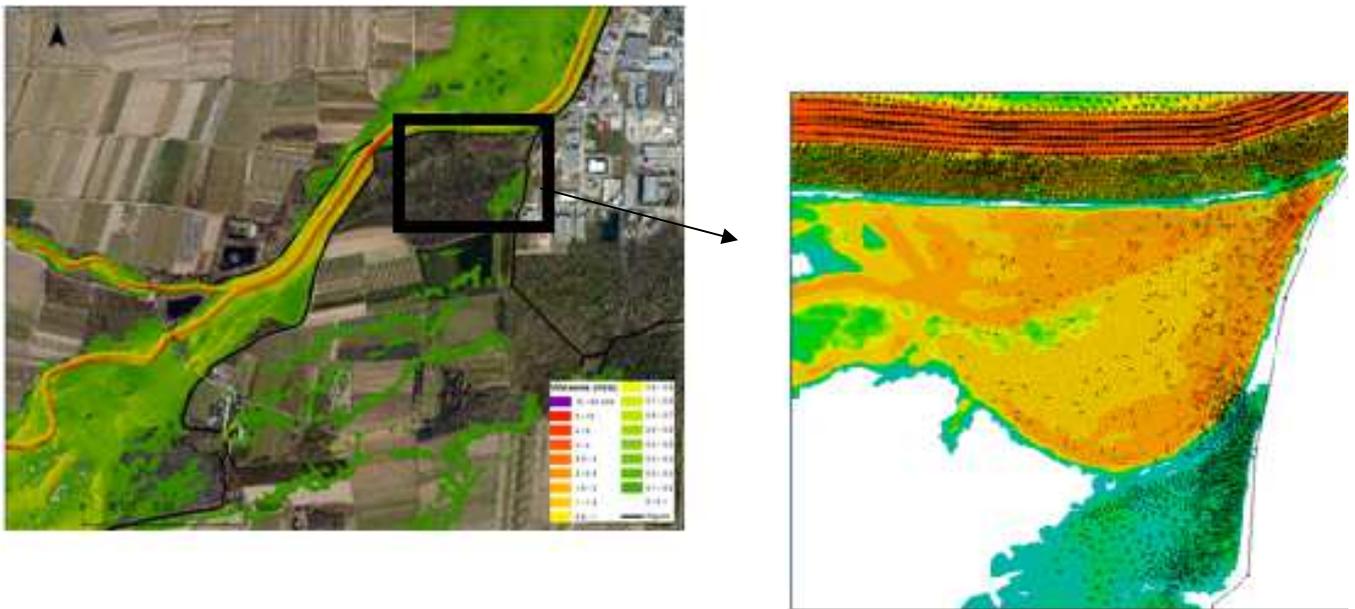


Figure 23 : Justification par l'analyse des vitesses de l'indépendance des zones de travail

Ces résultats permettent de limiter par la suite le modèle à une zone allant de la confluence à l'aval du modèle actuel. On note que le modèle peut être également réduit en largeur puisque la surface d'expansion de crue est à présent connue. Ceci permettra de gagner en temps de calcul (de 23 à 5 heures) et d'exploitation des résultats.



Figure 24 : Délimitation du modèle réduit par rapport au modèle de base

3.2. Connexion d'anciens chenaux au niveau de la confluence avec la Weiss par ouverture locale des digues

Les enjeux posés par la reconnexion des anciens chenaux par simple ouverture locale des digues sont d'une part la viabilité à long terme et d'autre part la possible augmentation des inondations.

3.2.1. Mise en place du modèle associé

On travaille donc à présent sur un modèle réduit (le maillage correspondant se situe en Annexe 17). De façon à être le plus réaliste possible malgré la réduction de la surface modélisée, plusieurs tailles de bords liquides associés à la limite amont ont été testées (Annexe 11) : limitée au lit mineur, ouverte sur toute la section comprise entre les digues, et enfin ouverte jusqu'à la dépression visible en rive gauche et entrée au niveau de cette dépression d'un hydrogramme correspondant à celui modélisé dans le cadre de la situation actuelle. Ceci permet de prendre en compte sur cette section les apports en eau issus des débordements juste en amont. Cette frontière étant la plus réaliste, elle a été choisie pour modéliser cette situation.

La topographie reste la même que la précédente pour la situation actuelle, cependant les digues sont abaissées localement sur une vingtaine de mètres pour établir des connections entre lits mineur et majeur.



Figure 25 : Topographie pour la reconnexion par ouverture de digues et emplacement des ouvertures

3.2.2. Résultats et discussion

3.2.2.1. Modification des paramètres hydrauliques

En terme d'expansion de l'inondation, il est important de noter tout d'abord que tous les apports issus du système de vannage ne sont plus modélisés ici, mais comme vu précédemment, cela n'a pas d'impact sur les hauteurs d'eau du reste de la surface modélisée. Pour le reste de la surface modélisée, l'intervention n'a pas d'impact majeur. En effet en rive gauche on observe

une inondation légèrement plus marquée sur 200 m dans la continuité de la zone reconnectée, mais cela est compensé par un recul de l'inondation légèrement plus en aval. En rive droite l'inondation est légèrement plus étendue mais cela reste dans les limites de la forêt alluviale, déjà actuellement inondée en grande partie.

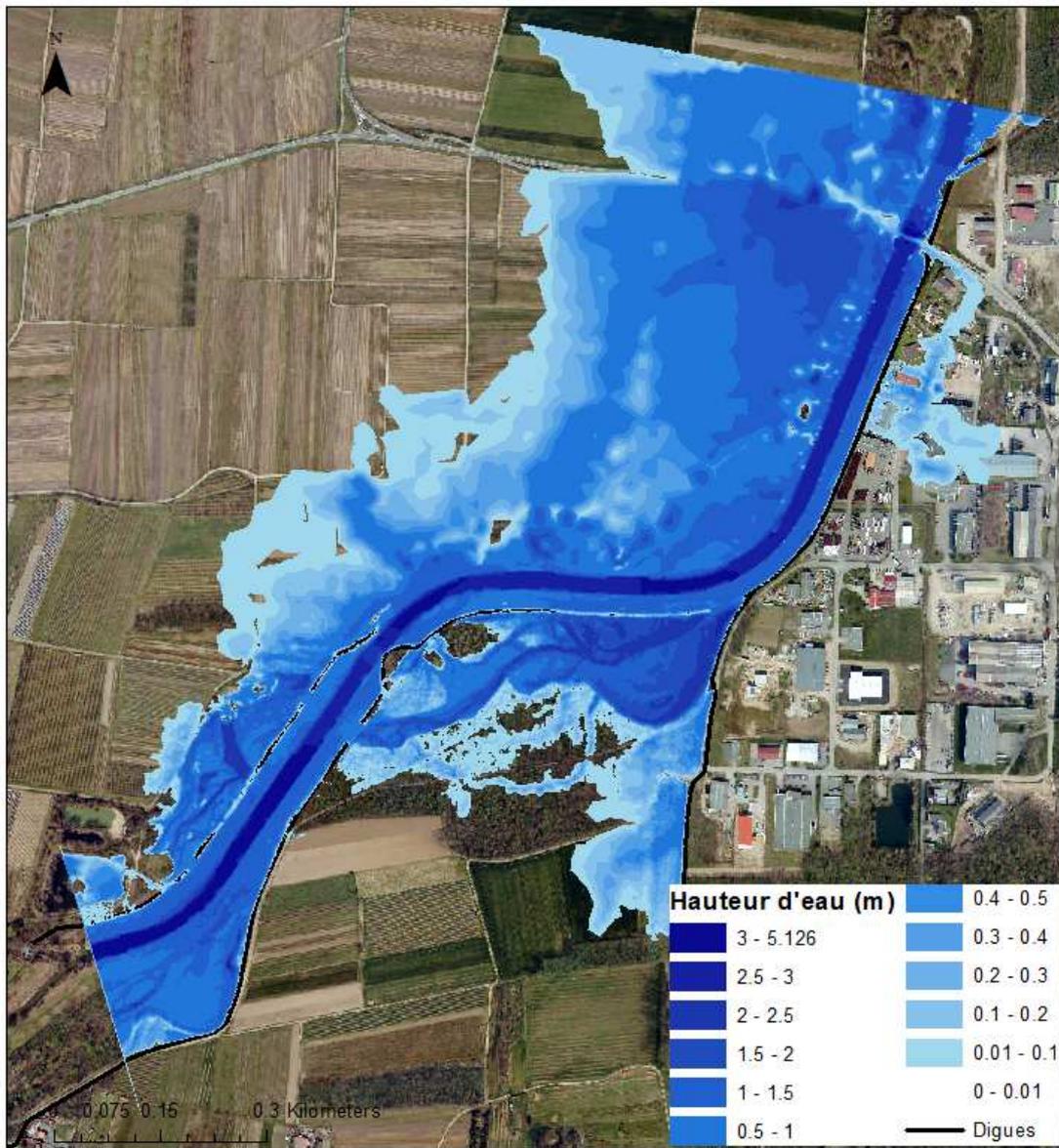


Figure 26 : Résultats pour l'expansion de l'inondation pour la reconnexion par ouverture de digues

La comparaison des lignes d'eau (en Annexe 18) dans le lit mineur après réouverture des digues et dans le lit mineur actuel révèle un abaissement de 10 cm depuis le seuil en amont de la confluence.

La répartition des vecteurs vitesses traduit un bon engouffrement dans les deux zones par l'ouverture amont, même si l'ouverture rive droite semble mieux fonctionner qu'en rive gauche. Il est intéressant de remarquer dès lors que rive droite comme rive gauche, la dynamique est assez hétérogène de l'amont vers l'aval des secteurs reconnectés. En effet rive gauche si une dynamique certaine existe à l'entrée et qu'un chenal préférentiel se dessine, on note une perte de dynamique très rapidement par dissipation de l'énergie. La connexion aval avec le lit mineur ne semble pas non plus fonctionner et on observe une accumulation juste avant dans une

dépression. Les vitesses maximales observées dans les deux secteurs sont au maximum comprises entre 0,8 et 1m/s (Annexe 19).

Compte tenu de la topographie du secteur, constitué d'un ensemble de dépressions discontinues, on peut déjà affirmer que l'ouverture de la digue en entrée n'est pas suffisante pour créer une réelle dynamique dans le secteur et la puissance des écoulements se dissipe dans les nombreuses dépressions.

On constate les mêmes processus en rive droite mais cela est bien moins prononcé. En effet une nette dynamique se dessine sur une grande partie du linéaire puis se dissipe vers l'aval, mais reste tout de même caractérisable. Cette dissipation de l'énergie en aval s'explique facilement par les apports en eau depuis le lit mineur que nous avons déjà relevé dans la situation actuelle.

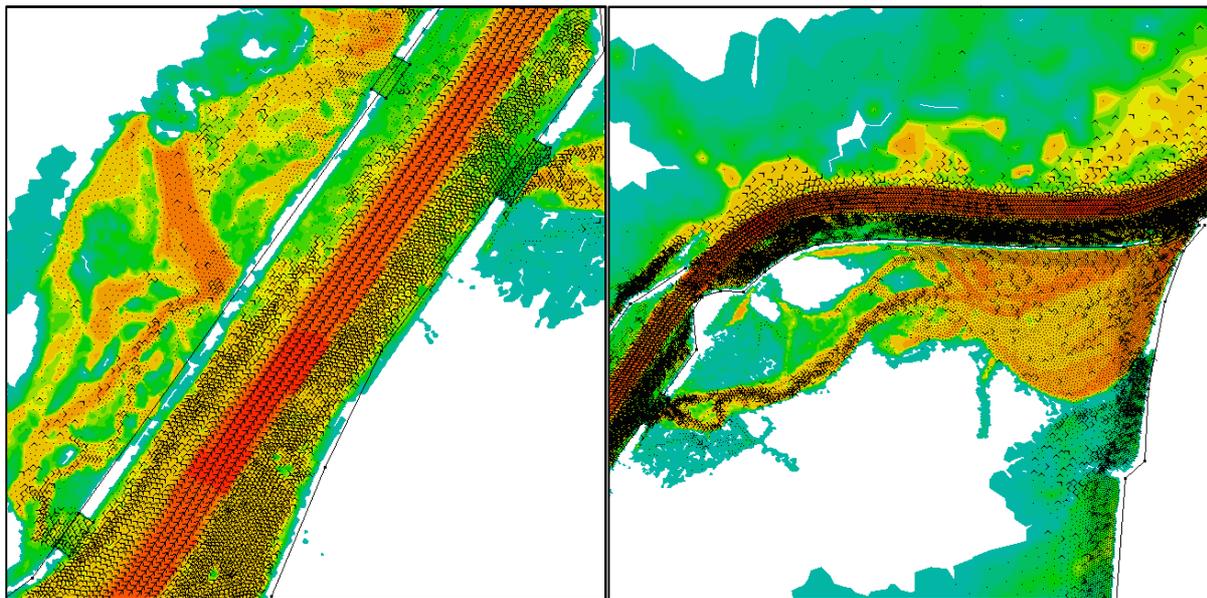


Figure 27 : Vecteurs vitesses et hauteurs d'eau au niveau des digues ouvertes. A) Rive gauche b) Rive droite

3.2.2.2. Forces tractrices et évolution de la morphologie du lit

Les observations précédentes sont corroborées par la répartition des zones à la dynamique érosive et des zones ayant tendance au dépôt. On constate effectivement que le secteur rive gauche reste sur sa totalité une zone de dépôt, la dynamique n'est que faiblement améliorée par rapport à la situation actuelle. Cependant l'entrée est tout de même marquée localement, et on pourrait envisager d'améliorer la dynamique en créant un chenal suivant l'écoulement préférentiel qui se dessine. On limiterait ainsi les dissipations d'énergie. Mais on ne peut tout de même pas conclure à une efficacité totale de cette proposition, compte tenu de ce qui se produit en rive droite. En effet rive droite on constate une très bonne dynamique érosive à l'amont, au sein d'un chenal unique qui était bien visible sur la topographie Figure 27. Cependant l'arrivée d'eau par l'aval rompt cette dynamique et le reste du secteur reste en dépôt prononcé. Cet apport en eau par l'aval existant également pour le secteur rive gauche, on ne peut en effet affirmer la viabilité à long terme de l'ouverture d'un chenal dans ces conditions.

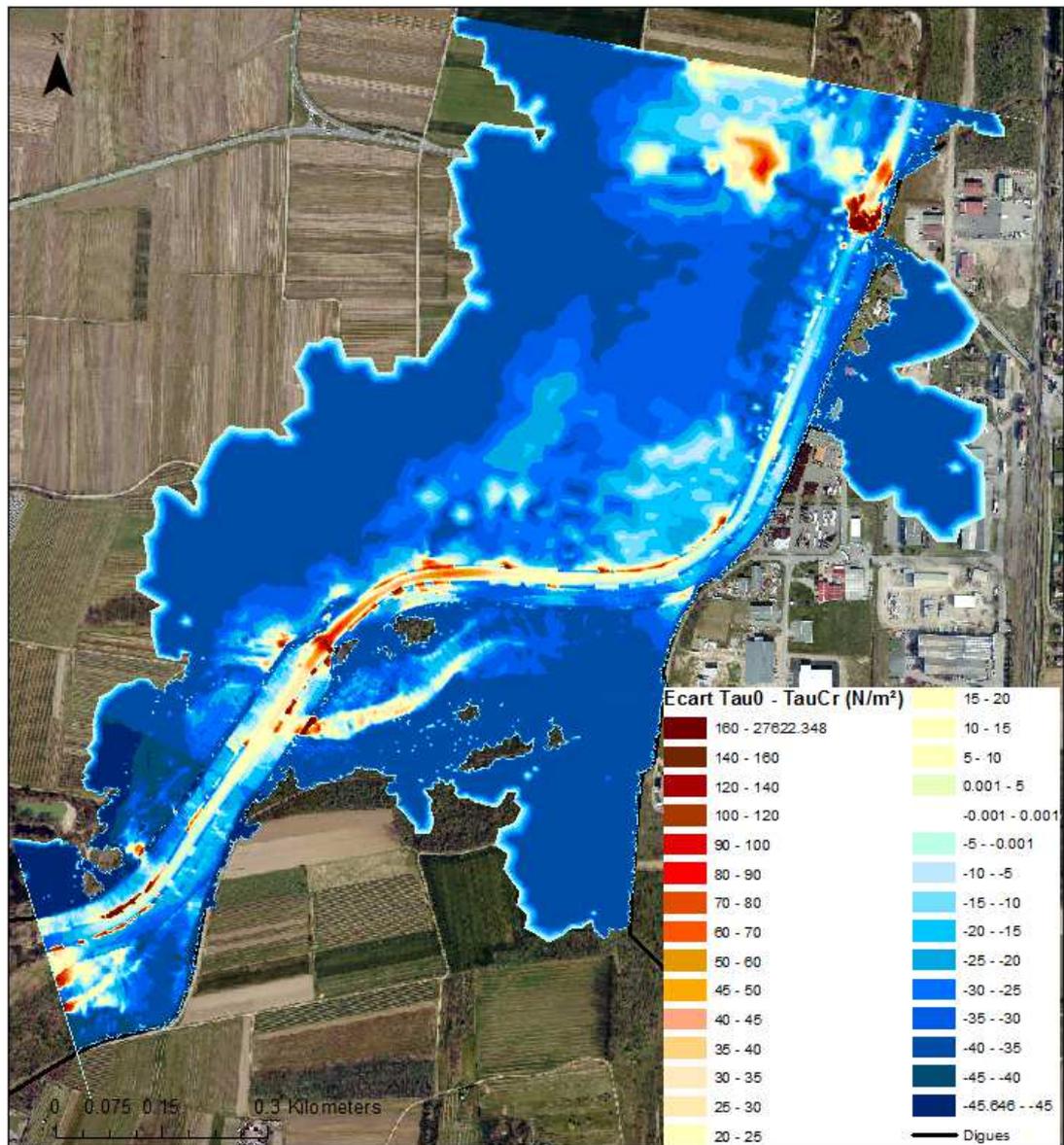


Figure 28 : Résultats concernant les paramètres morphologiques pour la reconnexion par ouverture de digues

On peut donc conclure de ces observations que la dynamique créée par les ouvertures dans les digues est insuffisante pour créer de véritables chenaux actifs, et le secteur rive gauche reste essentiellement voué au comblement à long terme, si aucune mesure complémentaire couplée à un entretien n'est entreprise. On remarque de plus qu'il n'existe pas de connexion, d'échange entre les deux secteurs, et le bénéfice pour la mobilité transversale du lit mineur en reste donc très limité.

Le bilan reste cependant positif au regard des investissements que cela nécessite, puisque cette intervention permet tout de même l'amélioration notable de la dynamique en rive droite, et la transformation d'une annexe hydraulique de type Paléopotamon en une annexe de type Eupotamon, constituant un bras secondaire une partie de l'année lorsque le débit dans le lit mineur dépasse le débit de pleins bords.

3.3. Création d'un deuxième bras par réouverture complète des anciens chenaux

La création d'un chenal secondaire est une intervention bien plus ambitieuse que l'intervention testée dans le paragraphe précédent. Les objectifs liés sont la reprise de la mobilité transversale et le recouvrement d'un style fluvial adapté et écologiquement profitable, ainsi qu'éventuellement le comblement au moins partiel du seuil présent sur cette partie. Les enjeux sont cependant plus importants en termes de modification de la ligne d'eau et donc du risque inondation, ainsi qu'en termes d'érosion puisque le tronçon retrouverait une dynamique latérale.

3.3.1. Mise en place du modèle associé

Le modèle pour cette situation reste le même, excepté au niveau des deux secteurs où un chenal y est créé. Un coefficient de Strickler de $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, correspondant aux frottements en lit mineur, est attribué sur la surface du nouveau tracé. Le traitement de la topographie est réalisé avec le logiciel AutoCAD et son extension Covadis qui permettent de modifier localement un MNT.

La délimitation du tracé (Figure 31) a suivi les écoulements préférentiels révélés dans les paragraphes précédents. Mais l'objectif étant de créer un chenal stable, la pente et les caractéristiques géométriques ont dû être travaillées. On a pu rapidement constater qu'en suivant les tracés déjà dessinés, la pente concordait déjà quasiment avec la pente de la rivière actuelle sur ce secteur (Annexe 20), et les cotes amont et aval correspondaient aux cotes dans le lit mineur. Ceci est compréhensible puisque ces chenaux de crues correspondaient à d'anciens bras lorsque la rivière n'était pas encore aménagée comme elle l'est actuellement (Annexe 3).

La géométrie qui peut globalement être observée sur la plupart du linéaire, comprend une largeur pleins bords de 18 m, une profondeur d'environ 2,3 m et un fruit pour les berges de 2 pour 1. La création du profil en travers type, utilisé pour décrire le nouveau chenal, s'est basée sur ces caractéristiques.

Concrètement le logiciel a creusé le nouveau chenal dans la topographie du modèle utilisée pour la situation actuelle selon les éléments suivants :

- Un profil en long défini à partir des cotes amont et aval et ajusté au niveau du croisement avec le lit actuel pour correspondre à la même cote
- Des profils en travers tous les 4 m pour une bonne précision. Cela était important notamment en rive gauche où le secteur est ponctué de nombreuses dépressions.
- Un profil en travers type appliqué à tous les profils dessinés

Le logiciel a ensuite interpolé la géométrie entre les profils et construit un nouveau modèle numérique de terrain, associé par la suite au modèle actuel. (Une vue en 3D permettant de bien visualiser la topographie est disponible en Annexe 21).

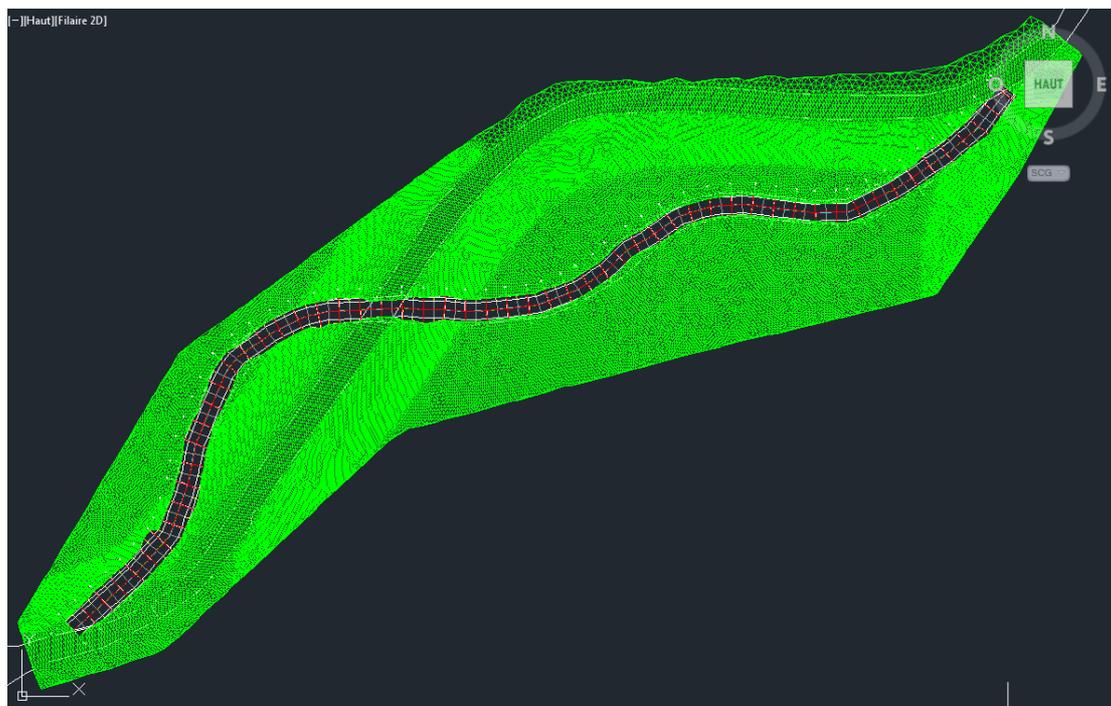


Figure 29 : Vue du haut de la topographie avec visualisation du tracé et de la construction du nouveau chenal sous AutoCAD

La topographie finale est visible sur la Figure 32. Il est important de noter que, compte tenu de la topographie très aléatoire autour du tracé, le chenal ne peut comporter la géométrie type imposée sur tout le linéaire. Les berges sont en effet évidemment dissymétriques, et il n'existe même parfois pas de berge sur certains tronçons qui sont donc connectés à d'autres annexes. Dans la réalité la création d'un chenal « parfait », correspondant aux caractéristiques d'équilibre de la Fecht à ce niveau, nécessiterait un retalutage sur la plupart du linéaire. Mais cette situation n'est de toute façon pas à souhaiter puisque comme nous l'avons vu précédemment, le bénéfice écologique est tiré de la diversité des formes du lit. Cela implique cependant que le débit transitant dans ce bras et les vitesses associées, ainsi que la dynamique morphologique qui en découle, ne soient pas les mêmes que ceux que l'on pourrait attendre avec un deuxième bras calibré exactement comme le lit mineur de la rivière. Il faut de plus être vigilant au regard de l'expansion de l'inondation, au regard de la connexion de ce lit transportant un débit liquide bien supérieur à la situation actuelle, avec les nombreuses dépressions aux alentours.

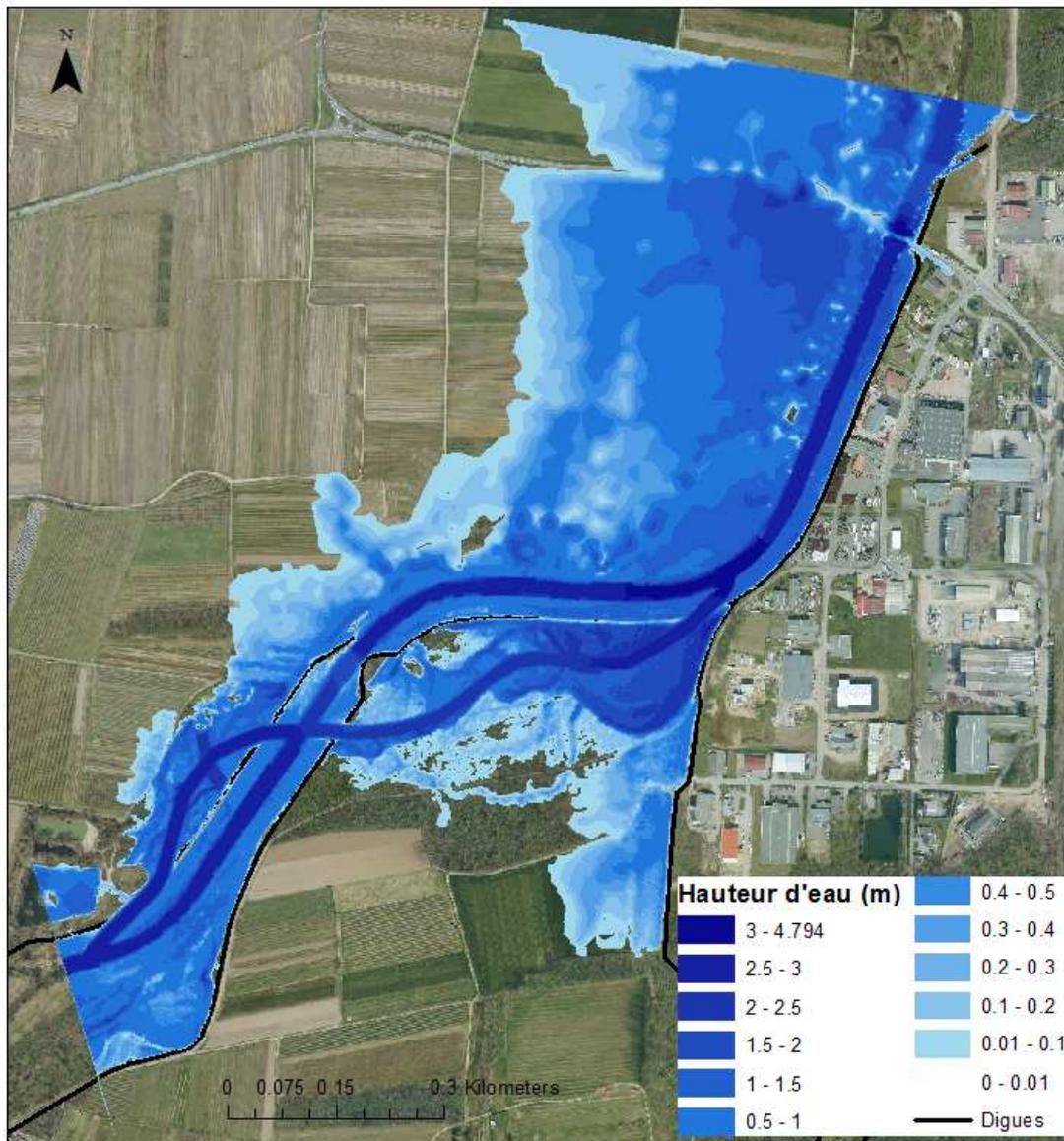


Figure 31 : Résultats pour l'expansion de l'inondation pour la création d'un chenal secondaire

L'analyse des vitesses permet de mettre en évidence un bon fonctionnement global de l'aménagement. En effet il existe une certaine symétrie entre les vitesses dans le bras et les vitesses qui transitent dans le lit mineur : juste en aval des deux premiers croisements, les vitesses sont comprises entre 2 et 3 m/s puis se stabilisent entre 1,5 et 2 m/s sur le reste du linéaire. Cependant comme l'on pouvait s'y attendre au regard de la topographie, les vitesses sur la partie aval des deux tronçons du nouveau bras sont légèrement inférieures à celles dans le lit mineur. Cela s'explique par le fait que sur ces parties, le chenal déjà dessiné était bien moins net et on comptait davantage de dépressions discontinues, dépressions qui forment des élargissements locaux du lit et donc dissipent l'énergie. Le lit actuel reste donc le lit principal sur ce critère.

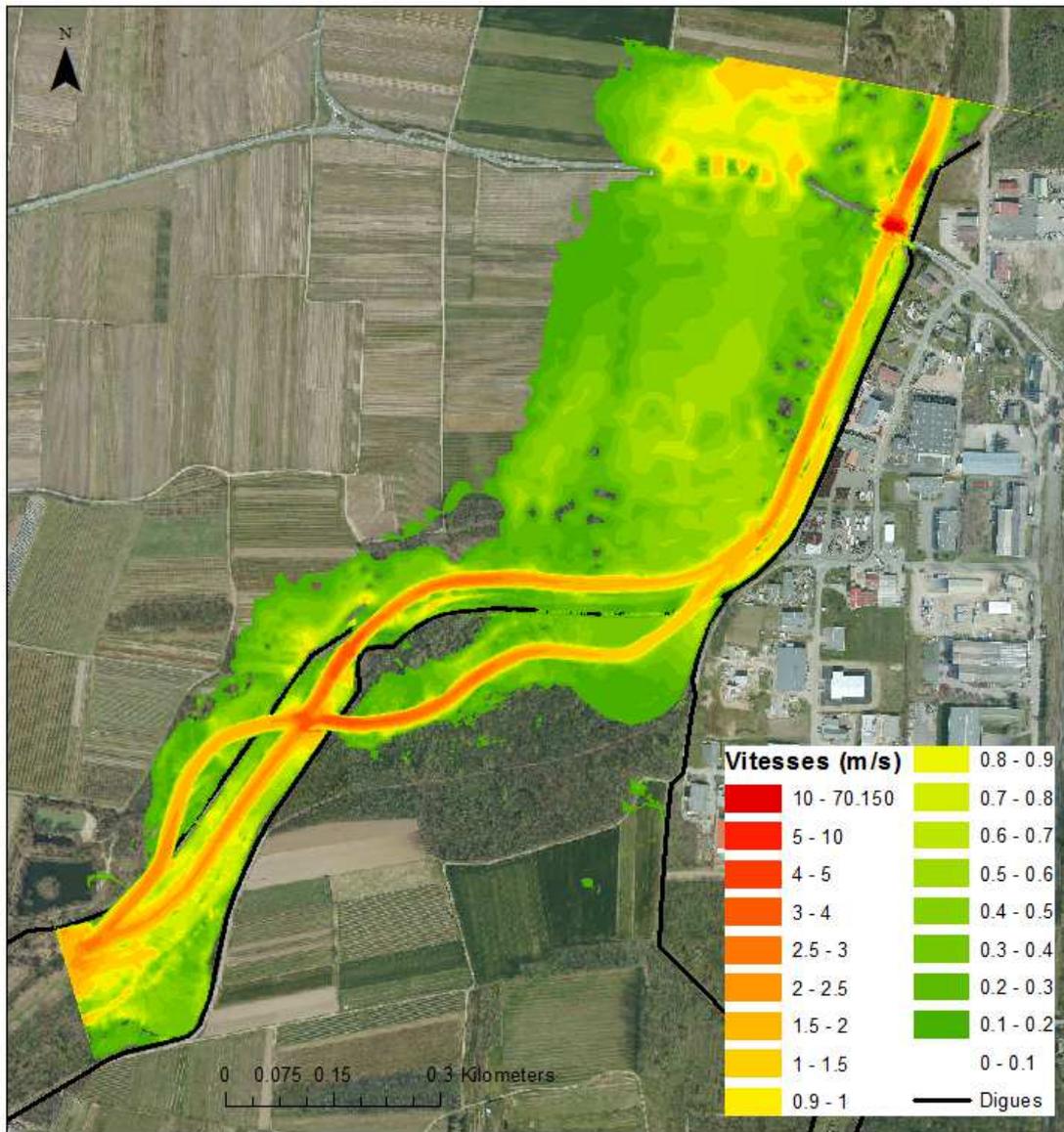


Figure 32 : Résultats en termes de vitesses dans le cas de la création d'un nouveau bras

Les vecteurs vitesses montrent nettement ces dissipations d'énergie avec la diffusion des écoulements dans les dépressions environnantes. Ils mettent de plus en valeur les sections de contrôle que constituent les ouvertures dans les digues avec concentration des écoulements dans le lit qui à ce niveau présente des berges hautes. Mais cela ne se traduit pas vraiment en augmentation critique de la vitesse qui pourrait déstabiliser les digues : les valeurs restent cohérentes avec le reste du tronçon. Cette affirmation doit tout de même être vérifiée en termes de contraintes tractrices.

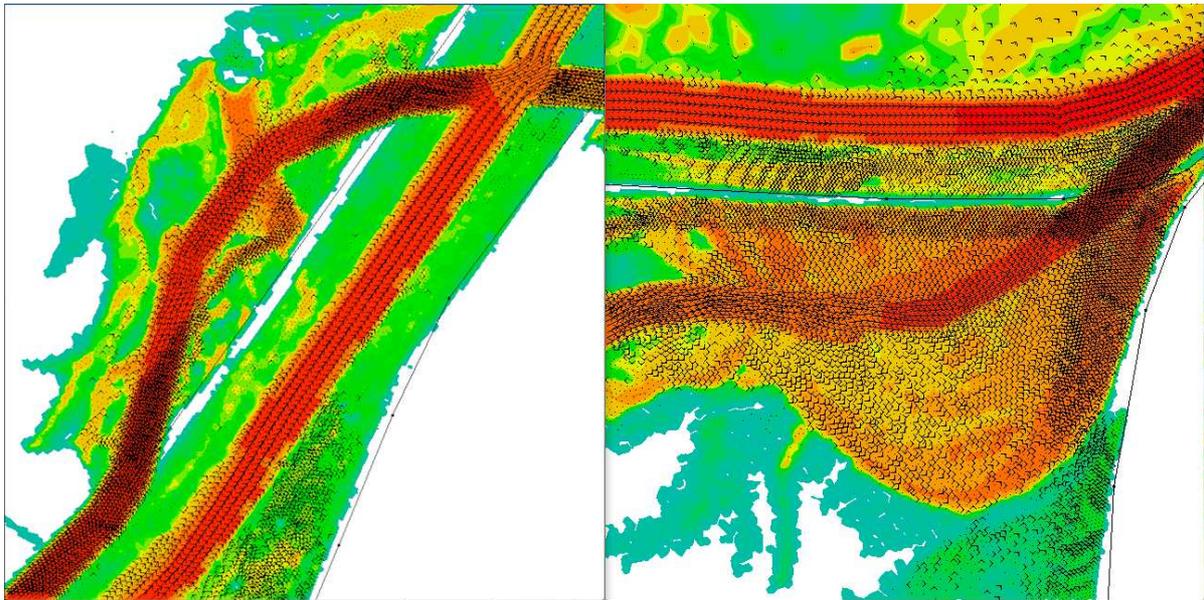


Figure 33 : Vecteurs vitesses et dissipation de l'énergie dans le chenal secondaire

On peut donc déjà conclure que cette intervention a un effet plutôt réducteur sur les inondations à l'aval et que le système semble bien fonctionner avec une concordance entre les comportements hydrauliques des deux bras.

3.3.2.2. Forces tractrices et évolution de la morphologie du lit

L'analyse des contraintes et de la dynamique sédimentaire corrobore les conclusions précédentes pour la partie en aval du croisement. On retrouve en effet une certaine symétrie dans les comportements dynamiques des deux bras, avec dans la première partie une dynamique plutôt érosive, puis dans la deuxième une tendance au dépôt. Ce phénomène est moins visible dans la partie en amont du croisement, où l'on constate que l'érosion reste bien plus marquée dans le bras actuel. Cela s'explique par une différence locale de pente.

En comparant ces résultats avec les résultats de la situation actuelle, on constate que sur tout le tronçon où le lit mineur est dédoublé, il existe une alternance de zones érosives et de zones plus calmes, alternance qui n'existe pas actuellement. La dynamique semble se propager vers l'amont sur la Fecht, jusqu'au passage à gué à proximité du seuil avant la confluence avec la Weiss.

Ces résultats permettent de donner une idée de l'évolution morphologique du lit. En effet à court terme on prévoit donc un équilibre dynamique entre les deux bras. Puis, à plus long terme, la baisse de la tendance érosive sur la deuxième partie du linéaire laisse présager un comblement au moins léger du seuil et une diminution de la pente. Cela pourrait s'avérer profitable pour le nouveau bras dont la dynamique sur la première moitié du linéaire est déjà notable. On pourrait alors envisager que l'érosion associée à ce niveau se propage de l'autre côté du croisement dans le nouveau bras en face, si la dynamique continue de décroître dans le bras actuel. Au regard des paramètres obtenus grâce aux résultats, il ne semble tout de même pas que le nouveau bras puisse prendre d'avantage sur le bras actuel avant le croisement. Cependant si cela s'effectuait au moins après le croisement, le cours d'eau gagnerait nettement en qualité. Mais l'équilibre prévisible à court terme entre les deux bras apporte déjà une amélioration capitale.

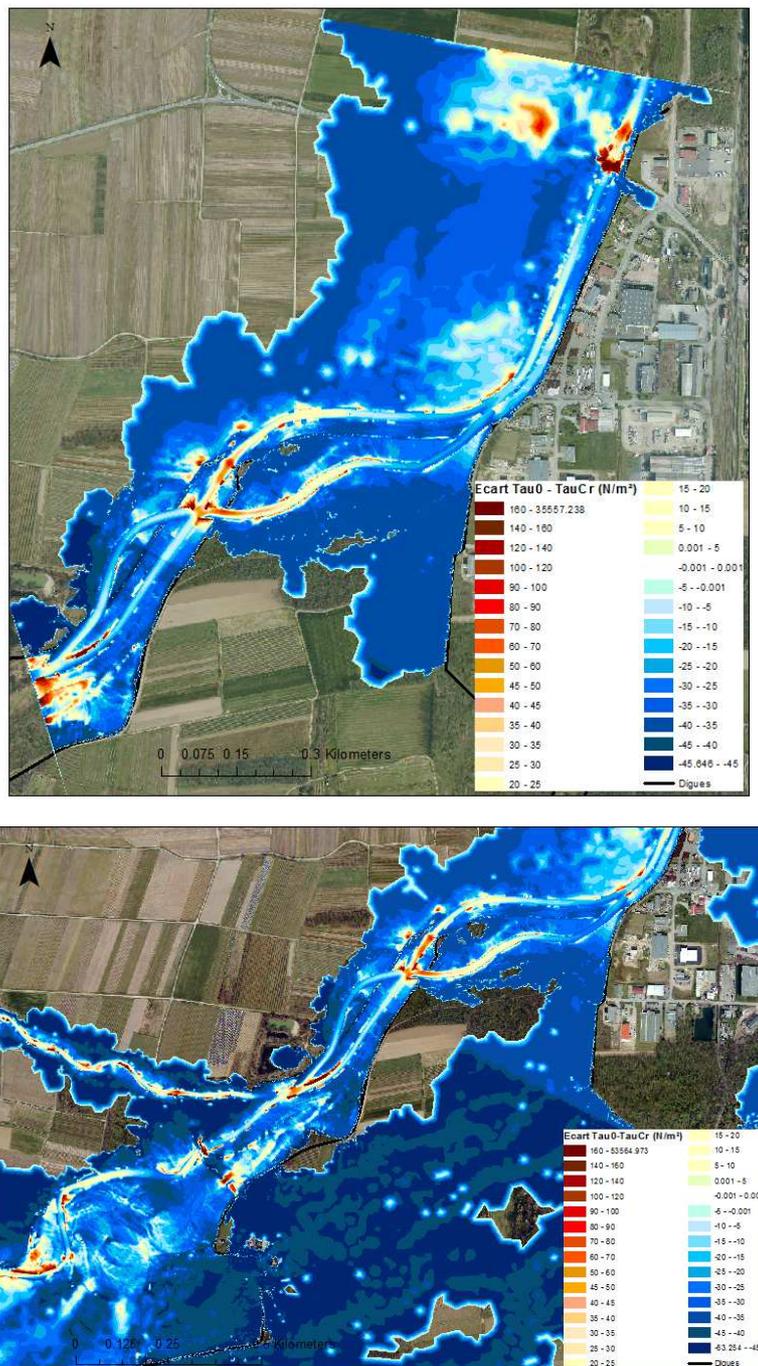


Figure 34 : Comparaison des résultats concernant les paramètres morphologiques pour la création d'un chenal secondaire (b) avec la situation actuelle (a)

En ce qui concerne les éventuels risques liés à la modification de la dynamique latérale et à la répartition des zones érosives, plusieurs remarques peuvent être faites. Tout d'abord au niveau aval des deux bras, on peut noter l'apparition d'une nouvelle zone d'érosion. Au regard de la construction de la topographie on peut affirmer qu'il s'agit simplement d'un défaut du modèle qui définit une courbe mal adaptée à laquelle le modèle répond par une zone d'érosion importante. Cette érosion est très locale et cela ne fragilisera a priori pas la digue.

Comme on le supposait au regard des résultats en termes de vitesses, les passages du nouveau bras entre les digues ne semblent en effet pas avoir d'influence néfaste sur elles. En effet l'érosion est concentrée au centre du chenal et ne devrait pas impacter les digues. Un contrôle régulier sur les deux zones d'érosion mises en évidence, après chaque crue morphogène, serait néanmoins nécessaire.

Globalement sur l'ensemble du tracé on constate une répartition de la capacité érosive du cours d'eau entre les deux bras, ce qui diminue considérablement les risques liés à l'érosion et tend à le stabiliser naturellement. L'expansion de la dynamique érosive en amont ne posera pas non plus problème à échelle de temps humaine puisque la dynamique latérale reste toujours stabilisée par les digues.

Cette intervention est donc très bénéfique au regard de la dynamique morphologique, le tronçon renaturé semble en effet retrouver un certain équilibre. De plus les annexes hydrauliques connectées à présent directement à un chenal actif, sont revitalisées et offrent de nouveau un potentiel écologique important. Cela ne crée d'autre part pas de risque notable, que ce soit d'un point de vue hydraulique ou morphologique.

3.4. Discussion et perspectives

3.4.1. Possibilités et limites du modèle en termes purement hydrauliques

Au regard des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être formulées.

Le modèle, bien que n'ayant été ni calé ni validé, apporte des résultats plutôt satisfaisants. L'expansion de l'inondation semble cohérente au regard de la topographie et des expériences de terrain, bien que, comme nous avons pu le montrer précédemment, sa précision soit limitée en lit majeur. Le fonctionnement hydraulique lié au système de vannage tel qu'il est décrit par le modèle retranscrit les objectifs visés lors de sa mise en place. Enfin les vitesses obtenues sont globalement logiques au regard de la pente et des sections de contrôles. Le modèle est donc capable de retranscrire relativement finement les écoulements tant en lit mineur qu'en lit majeur.

Cependant les tests de sensibilité au coefficient de Strickler, ainsi qu'à la taille et au type des frontières liquides modélisant les conditions limites, et le test de qualité du maillage en termes de retranscription de la topographie ont montré que la qualité des résultats était très dépendante des éléments de la construction du modèle et il est nécessaire de rester prudent dans l'utilisation des résultats.

D'autres éléments viennent relativiser les résultats obtenus. Comme nous l'avons dit précédemment, le fonctionnement de certains seuils à chute brusque ne sont pas représentés de manière réaliste du fait de la non prise en compte de la composante verticale. On ne peut donc prendre en compte ces résultats que qualitativement et conclure que ces seuils provoquent une augmentation locale des vitesses sans toutefois pouvoir quantifier ce phénomène.

On a en outre considéré pour le système de laminage que les vannes étaient ouvertes dès le début de la crue. Elles ne le sont en réalité que dès que le débit devient critique et que les écoulements menacent de surverser par dessus les digues. Ceci est difficilement modélisable car cela équivaut à un changement de topographie pendant le temps de calcul. Ceci est néanmoins possible avec le logiciel, en procédant à une modification des codes d'entrée.

Ce type de modélisation enfin reste lourd en termes de construction et de temps de calcul (23 heures pour le grand modèle). Mais cela est à relativiser au regard de la précision des résultats obtenus.

3.4.2. Possibilités et limites de la modélisation 2D en tant qu'outil d'aide à la décision en matière de restauration

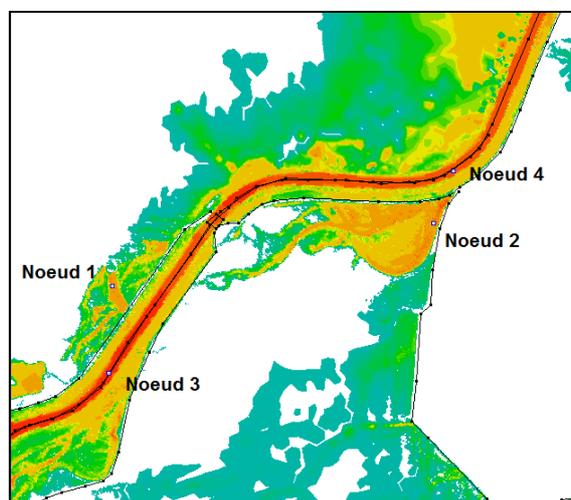
Les forces tractrices qui ont été calculées, et la dynamique morphologique qui en découle, ont permis de réaliser une bonne description de l'état actuel du secteur. Les résultats ont en effet montré une concordance relativement précise des zones de dépôt et d'érosion avec celles relevées sur le terrain, et une retranscription du fonctionnement morphodynamique fidèle à ce qui avait été diagnostiqué.

Les modifications des paramètres morphologiques induites par les interventions se sont révélées conformes à ce que l'on pouvait attendre et ont apporté des précisions supplémentaires en termes de quantification de ces changements en général tout à fait cohérentes. Ces résultats permettent donc de conclure que cette démarche est relativement bien adaptée pour prévoir à court terme les impacts des interventions de renaturation sur la dynamique morphologique. L'évolution à plus long terme reste cependant plus difficile à décrire et à quantifier, bien que ces résultats en donnent déjà une bonne idée, et l'analyse repose parfois sur des hypothèses vérifiables uniquement par des calculs sédimentaires supplémentaires.

Il faut cependant noter que les conséquences des limites du modèle en matière de précision hydraulique conditionnent la précision des résultats de la morphologie.

3.4.3. Adéquation de la démarche utilisée

La démarche est basée sur l'utilisation des maxima asynchrones des variables de calcul pour obtenir les forces tractrices. Cela permet de raisonner sur le risque maximal qui peut apparaître. Cependant dans un souci de réalisme, il convient de vérifier que les valeurs de forces tractrices obtenues ne soient pas trop surestimées. En effet les hauteurs maximales et les vitesses maximales n'ont pas forcément lieu au même moment. Une comparaison des évolutions des hauteurs d'eau et des vitesses sur la durée du calcul au niveau de quatre nœuds a été réalisée. Ces nœuds ont été choisis sur la zone de restauration, sur des lieux d'intérêt à la fois en lit mineur et en lit majeur, comme le représente la Figure 37.



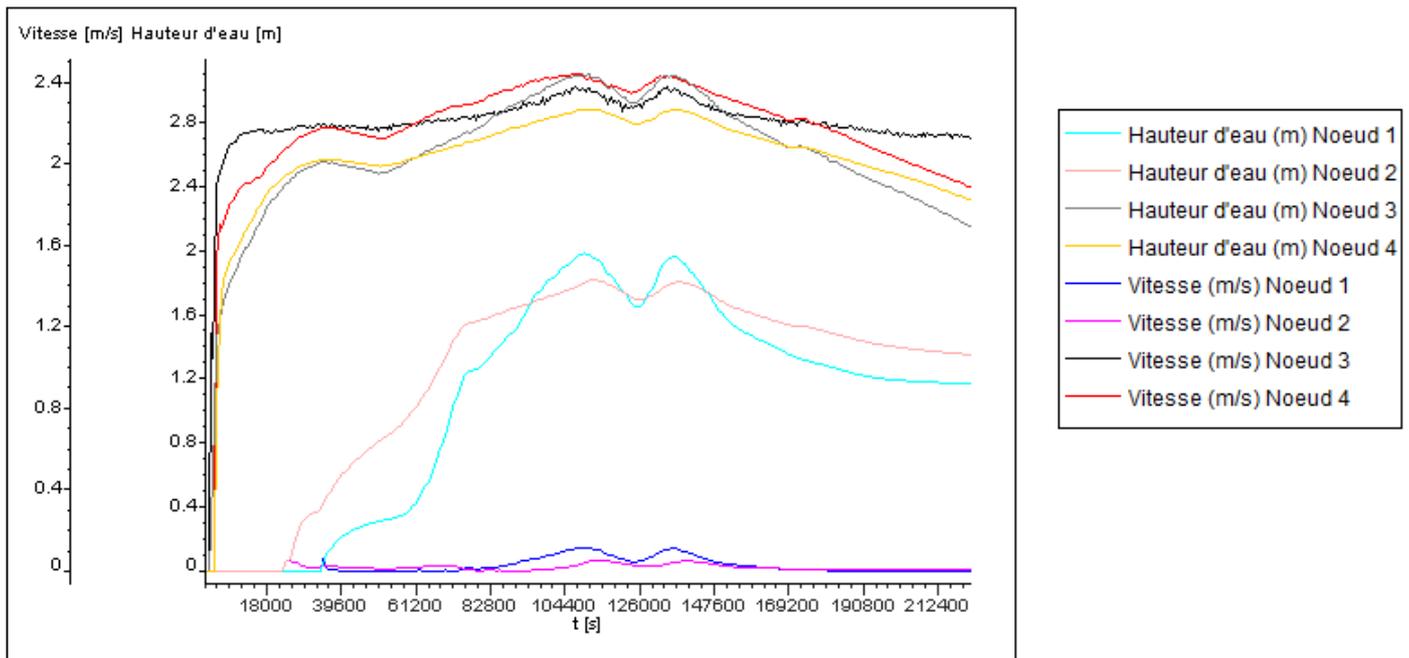


Figure 35 : Justification de l'utilisation des maxima des variables de calcul dans la démarche

Ces résultats montrent que les maxima des deux variables sont globalement synchrones pour les nœuds considérés. Ceci permet de justifier la démarche et les résultats, en restant toutefois vigilant sur le fait que cette hypothèse ne soit pas forcément réaliste sur l'ensemble du modèle. Calculer les forces tractrices sur chaque pas de temps puis analyser la valeur maximale obtenue serait un bon moyen de s'assurer de la pertinence des résultats au regard de ce critère.

Du point de vue des formules utilisées pour caractériser la morphologie associée aux variables de calcul, bien que nous ayons montré au travers des situations testées que celles-ci donnaient des résultats tout à fait cohérents, d'autres formules auraient pu être utilisées et c'est pourquoi un test de sensibilité à ce critère peut s'avérer intéressant.

La répartition de la dynamique sédimentaire s'est basée sur l'écart entre les contraintes tractrices et les contraintes critiques. L'écart entre le paramètre de Shields et la valeur de référence 0.047, qui aurait également pu être utilisée, a été testée mais les résultats en Annexe 22 obtenus avec les deux méthodes montrent que les conclusions que l'on peut tirer sont strictement les mêmes. Cela n'est pas surprenant puisque la structure des deux formules est basée sur les mêmes hypothèses (début d'entraînement du grain pour un paramètre de Shields égal à 0.047) et utilise les mêmes paramètres. La méthode choisie est donc pertinente.

3.4.4. Perspectives

Une analyse supplémentaire des résultats avec des techniques empiriques permettrait de décrire plus précisément et plus justement, avec des données chiffrées à l'appui, l'évolution morphologique du lit à plus long terme. Par exemple, dans la situation où un deuxième bras est créé, une érosion importante a été relevée dans la première partie de ce second chenal juste

en aval du croisement. Un calcul de la pente d'équilibre prenant en compte la valeur de la contrainte tractrice associée à cette érosion, permettrait de corroborer ou non l'hypothèse d'une extension régressive dans le premier tronçon. On pourrait ainsi véritablement conclure sur le fonctionnement à long terme des deux bras et prévoir si oui ou non le deuxième bras deviendra le principal.

Il serait intéressant d'affiner la contrainte critique, définie dans cette étude uniquement via la granulométrie du fond du lit, à la végétation sur les berges. Cela permettrait de préciser les contraintes qui s'appliquent réellement dans les zones d'érosion et ainsi préciser la probabilité d'un déplacement effectif du lit.

Seule la crue centennale a été modélisée puisque l'on a considéré que cette crue était obligatoirement morphogène. Mais cette démarche ne permet pas de savoir dans quelles proportions une crue décennale ou même une crue biennale pouvaient entraîner des modifications morphologiques. Cela apporterait des éléments intéressants pour prévoir approximativement le temps nécessaire à l'ajustement du lit après réalisation des modifications.

Enfin cette démarche peut tout à fait être appliquée à d'autres cas et fréquemment utilisée. En effet la difficulté ne réside que dans l'établissement d'un modèle hydraulique bidimensionnel adapté à la zone étudiée, et si l'on maîtrise cet outil, la méthodologie développée ici peut donner des résultats relativement rapidement. Il faut néanmoins noter qu'un calage doit être réalisé autant que possible afin d'obtenir les résultats les plus justes.

CONCLUSION

Cette étude s'est ancrée dans une politique forte à dynamique européenne de restauration des masses d'eau, relayée par un cadre réglementaire approfondi mis en œuvre au sein du Conseil départemental. La Fecht s'est révélée être un sujet d'étude particulièrement intéressant de part son mauvais état mais ses potentialités de restauration certaines, et aussi de part les risques liés aux inondations qui existaient aux alentours. L'étude s'est focalisée sur un secteur dynamique mais très contraint, où sont encore visibles d'anciens chenaux.

L'objectif étant de confronter l'outil hydraulique bidimensionnel à la prévision de l'évolution morphologique du lit liée aux interventions de renaturation, une démarche, qui consiste à calculer en tout point du modèle les contraintes tractrices et la dynamique morphologique associée à partir des résultats du calcul hydraulique, a été mise en place.

Les deux options qui ont été testées se sont révélées globalement positives pour l'amélioration de la qualité physique de ce tronçon. La reconnexion par ouverture de digues ne semble pas viable à long terme sur le secteur en rive gauche à cause d'une dynamique trop faible, mais, même si cette intervention ne permettrait pas de recréer une réelle dynamique qui lierait les deux secteurs et créerait un chenal préférentiel, cela améliorerait nettement la dynamique et revaloriserait les annexes existantes. La création d'un bras secondaire amène, elle, un nouvel équilibre sur le secteur totalement artificiel, en recréant une dynamique certaine qui se propage légèrement vers l'amont et valorise les annexes hydrauliques existantes. Au regard des résultats obtenus, ces deux interventions permettent même une diminution plus ou moins importante de la ligne d'eau sans pour autant créer de nouveaux risques.

La démarche utilisée pour cette étude a dans l'ensemble donné de bons résultats et une prévision assez précise des modifications des paramètres hydrauliques et morphologiques à court et moyen terme. La prévision à long terme nécessiterait cependant des tests supplémentaires. Il faut enfin noter que ces résultats, bien que globalement cohérents, dépendent beaucoup de la méthodologie suivie pour la construction du modèle hydraulique et restent sensibles aux paramètres d'entrée.

Cet outil reste cependant lourd à construire et se révèle très dépendant des paramètres d'entrée et de la technique de construction, et bien que les résultats obtenus lors de cette étude soient globalement encourageants, il reste à approfondir la méthode dans l'objectif de répondre le plus précisément possible aux problématiques de restauration.

BIBLIOGRAPHIE

ADAM P., DEBIAIS N., GERBER F., LACHAT B. **Le génie végétal**. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. La documentation française, 2011, 290p. ISBN 978-2-11-0062840

BOUDJERIS M. **Calcul des performances aérodynamiques de la configuration aile-fuselage Ara M100 par maillage hybride**. Thèse d'Ingénieur d'Etat, Université Saad Dahleb, Blida, 2011, Partie II.2.2 Maillage [visité le 17/02/15] <http://www.memoireonline.com/05/12/5815/m_Calcul-des-performances-aerodynamiques-de-la-configuration-aile-fuselage-Ara-M100-par-maillage-hybr19.html>

Comité de Bassin Rhin-Meuse. **SDAGE et programmes de mesures des districts Rhin et Meuse**, 2009, Chapitre 3 : orientations fondamentales et dispositions ; Annexe 10 : Guide des bonnes pratiques pour la gestion des milieux aquatiques dans les districts "Rhin" et "Meuse et Sambre", [visité le 10/04/15], <http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/dce/site/outils_docs_sdage.php>

DE LINARES M. **Modélisation numérique et bidimensionnelle du transport solide et de la dynamique fluviale, Validation sur deux sites en Loire et sur l'Arc**. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007, 158p.

DEGOUTTE G. **Diagnostic, aménagement et gestion des rivières**. Hydraulique et morphologie fluviales appliquées. Lavoisier, 2006, 394p. ISBN 2-7430-0877-6

Editeur de projet hydraulique : Télémac, [PDF téléchargeable] [consulté le 4/03/15] <<http://prepro.fudaa.fr/prepro-doc/telemac.fr.pdf>>

EPTB de la Somme. **Restauration hydromorphologique des cours d'eau sur le bassin de la Somme** [PDF téléchargeable] Aménagement et valorisation du bassin de la Somme, 2013 [consulté le 11/03/15] <<http://ameva.org/sites/default/files/mediatheques/MATAER/prE9sentation%20AMEVA.pdf>>

FROSSARD P-A. **Le génie végétal**, Génie végétal en rivière de montagne, 2009, [visité le 17/05/15] <<http://www.geni-alp.org/principes.php?pag=genievegetal>>

KREIS N. **Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque inondation. Application à la vallée de la Thur (Haut-Rhin)**. Thèse de doctorat, Centre d'Ecologie Végétale et d'Hydrologie, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 2004. 349p.

JODEAU M., PAQUIER A. (2006). **Analysis of Water and Sediment Flows over an Alternate Bar in a Gravel Bed River**. *River Flow*, Lisbonne, Taylor and Francis/Balkema, 1251p.

LANG P. **Système de modélisation TELEMAC-2D manuel de l'utilisateur**. Centre d'hydraulique Canadien du Centre national de recherches du Canada, 2010, 124p

MALAVOI J-R. **Stratégie d'intervention de l'agence de l'eau sur les seuils en rivière**. [PDF téléchargeable], Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2003, [visité le 07/01/10], <http://www.eau-loire-bretagne.fr/espace_documentaire/documents_en_ligne/guides_milieux_aquatiques//Etude_Seuil.pdf>

MALAVOI J.R., BRAVARD J.P. **Éléments d'hydromorphologie fluviale**. Onema, 2010, 224p.

MALAVOI J.R., GARNIER C.C., LANDON N., RECKING A., BARAN P., 2011. **Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière**. [PDF téléchargeable] Onema. 216 pages [visité le 3/03/15] <http://www.onema.fr/IMG/pdf/Transport_Solides_BD.pdf>

MARON P, FAURE T. **Manuel d'utilisation pour le mailleur de BlueKenue**. Centre d'hydraulique Canadien du Centre national de recherches du Canada, 2012, 61p.

ROBINS E, DAVIES G. **Application of TELEMAC-2D and SISYPHE to complex estuarine regions to inform future management decisions**. Bangor University, 2011, 6p.

ROUSSELOT P, VETSCH D, FÄH R. **Fiche 7 : Modélisation numérique des cours d'eau. Fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau**, Office Fédéral de l'Environnement, Berne, 2012.

VASQUEZ J. **Hydraulique à surface libre**. ENGEES (support de cours), 2012, 105p.

VIAL E, LALEMENT R, PAPOUIN M. **Note Eaufrance - De l'état des eaux en 2009 aux objectifs 2015**. [PDF téléchargeable] Onema, 2010, [visité le 23/04/15], <http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/eaufrance_rapportage_2010-03-22.pdf>

ANNEXES

Annexe 1 : Guide des bonnes pratiques pour la gestion des milieux aquatiques.....	76
Annexe 2 : Bilan de l'état des lieux pour le secteur d'étude et extrémités du modèle	77
Annexe 3 : Fuseaux de mobilité pour le secteur d'étude	78
Annexe 4 : Nouveau projet de protection contre les crues sur la Waldeslust (Source : Conseil Départemental du Haut-Rhin)	79
Annexe 5 : Plan de Prévention des Risques Inondations de la Fecht (2008).....	80
Annexe 6 : Exemple de résultats pour l'évolution morphologique du fond du lit obtenue avec SISYPHE (Source : De Linares, 2007).....	81
Annexe 7 : Cartographie des contraintes critiques	82
Annexe 8 : Topographie du modèle pour la situation actuelle	83
Annexe 9 : Maillage du modèle hydraulique pour la situation actuelle	84
Annexe 10 : Hydrogramme pour la crue centennale utilisé en entrée du modèle.....	84
Annexe 11 : Impact de la taille de frontières liquides sur la qualité des résultats	85
Annexe 12 : Impact du choix de la frontière pour représenter les écoulements après la voie ferrée. a) Bord solide b) Bord liquide sortie libre	86
Annexe 13 : Impact du choix du coefficient de Strickler sur les lignes d'eau dans le lit mineur....	87
A. Ligne d'eau pour la simulation avec Ks-10	87
B. Ligne d'eau pour la simulation du modèle final.....	87
C. Ligne d'eau pour la simulation avec Ks+10	88
Annexe 14 : Schématisation de la démarche.....	89
Annexe 15 : Fonctionnement hydraulique de la zone pour la situation actuelle	90
Annexe 16 : Comparaison en termes d'expansion de l'inondation entre les situations avec et sans fonctionnement du système de laminage et mise en évidence du fonctionnement hydraulique de ce système	92
Annexe 17 : Maillage du modèle hydraulique réduit.....	93
Annexe 18 : Comparaison des lignes d'eau dans le lit mineur avant et après intervention	94
A. Ligne d'eau pour la situation actuelle	94
B. Ligne d'eau pour la reconnexion par ouverture de digues	94
C. Ligne d'eau pour la création d'un bras secondaire	95
Annexe 19 : Résultats en termes de vitesses pour la situation test avec reconnexion des chenaux par ouverture des digues	95
Annexe 20 : Profils en long comparés du lit mineur actuel et de l'emplacement envisagé pour le second bras	96
Annexe 21 : Vue isométrique 3D de la topographie avec visualisation du tracé et de la construction du nouveau chenal sous AutoCAD.....	97
Annexe 22 : Comparaison de deux méthodes pour mettre en évidence la répartition des zones de dépôt et d'érosion au regard des résultats obtenus A. Ecart entre le paramètre de Schields et la valeur de référence 0.04	98
B. Ecart entre la contrainte tractrice et la contrainte critique	98

Annexe 1 : Guide des bonnes pratiques pour la gestion des milieux aquatiques

D'un point de vue général, le guide conseille de bien étudier le fonctionnement des cours d'eau afin de définir des règles adaptées à chaque cas. Cela permettra également d'agir sur les causes des disfonctionnements plutôt que sur les conséquences et ainsi réaliser des interventions efficaces et durables. Il recommande également et notamment de privilégier une gestion sur longue durée, avec des entretiens réguliers et respectueux du milieu plutôt que des interventions lourdes et ponctuelles.

Concernant la diversité écologique du lit mineur et des berges, plusieurs actions sont décrites en fonction des situations. Sur les cours d'eau rectifiés et simplifiés, la recréation de sinuosités, la reconnexion d'anciens bras encore visibles ou la remise en eau d'anciennes zones humides, sont à prévoir, bien entendu selon les caractéristiques actuelles et les possibilités du cours d'eau. Il peut s'agir de simples aides (faux-embâcles, épis) pour initialiser les processus ou bien d'interventions plus complètes qui donneront des résultats plus rapides. Pour les zones recalibrées, le guide prévoit de retrouver la largeur caractéristique du cours d'eau via la mise en place d'épis et de banquettes, rétrécissant localement le lit. Cette méthode peut également être utilisée pour diversifier un lit mineur artificialisé. Pour les zones encaissées, un retalutage peut être envisagé, mais seulement dans le cas où il n'existe pas ou plus de dynamique d'enfoncement. Dans le cas contraire il faudra davantage chercher à stopper le phénomène en gagnant du linéaire par reméandrage ou en plaçant de petits seuils de fond franchissables afin de retrouver une pente adaptée au cours d'eau.



**Exemple d'un travail de renaturation a) Avant les travaux b) Trois mois après
(Source : EPTB de la Somme, 2013)**

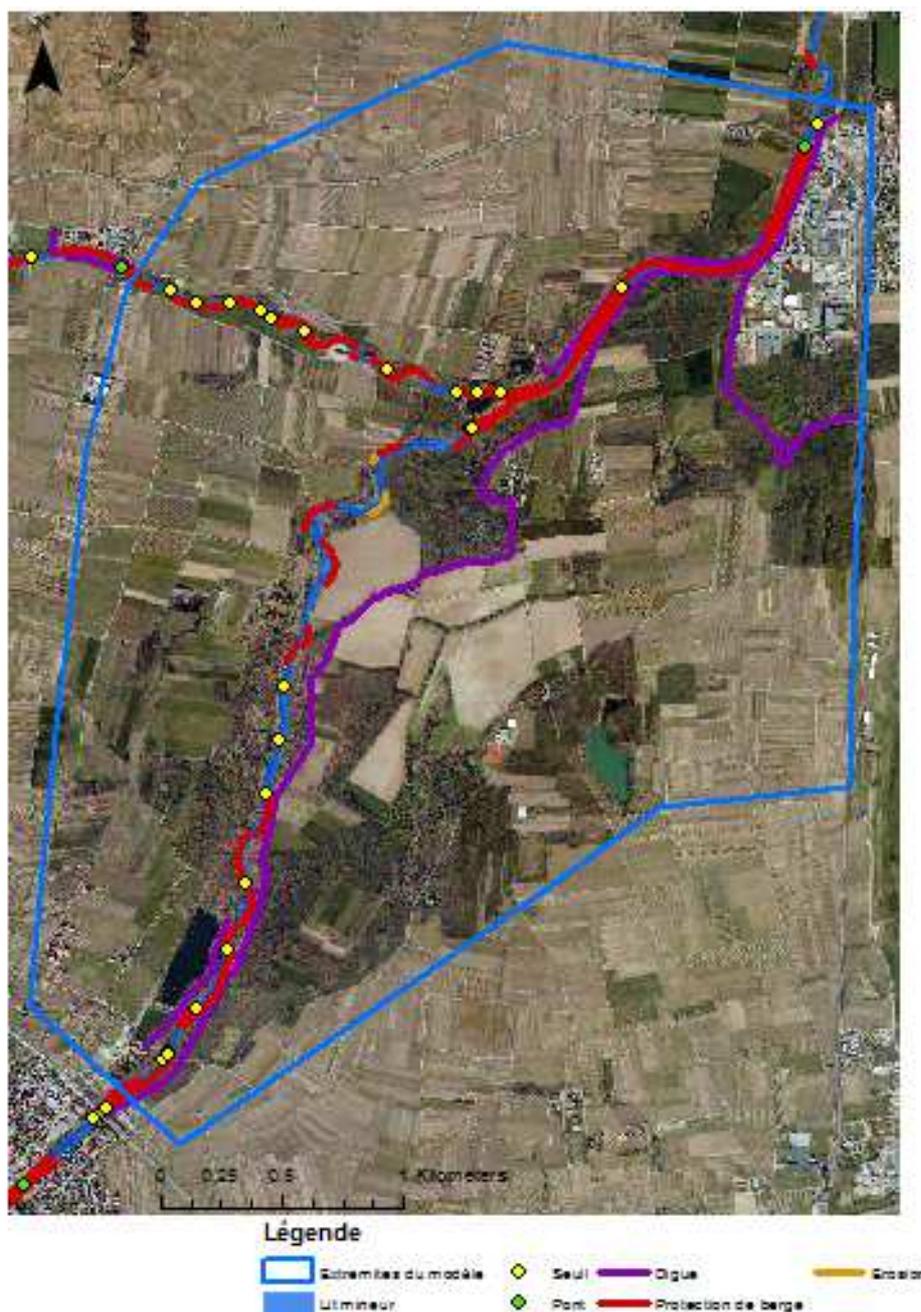
Pour la question des ouvrages transversaux qui bloquent le passage des sédiments, il est conseillé de bien étudier les répercussions d'un dérasement sur la morphologie du lit, du point de vue de l'érosion régressive qui va s'ensuivre vers l'amont, et du déblocage rapide des sédiments accumulés vers l'aval. Mais il faut également mesurer la reprise de mobilité latérale qui peut entraîner un basculement de la végétation rivulaire ou une fragilisation des installations types murs par exemple situées sur les berges. Parfois seul un arasement d'une partie de la hauteur est possible voire aucune intervention n'est possible, mis à part la création d'une passe à poisson.

En ce qui concerne la continuité écologique cette fois latérale, il est conseillé de préserver ou de recréer un lien fort entre les lits mineur et majeur, la connexion devant suivre le rythme des saisons. Cela peut passer par la recréation de zones inondables ou la réhabilitation d'annexes hydrauliques ou de zones humides desséchées. Dans ce sens, afin de maintenir ou de

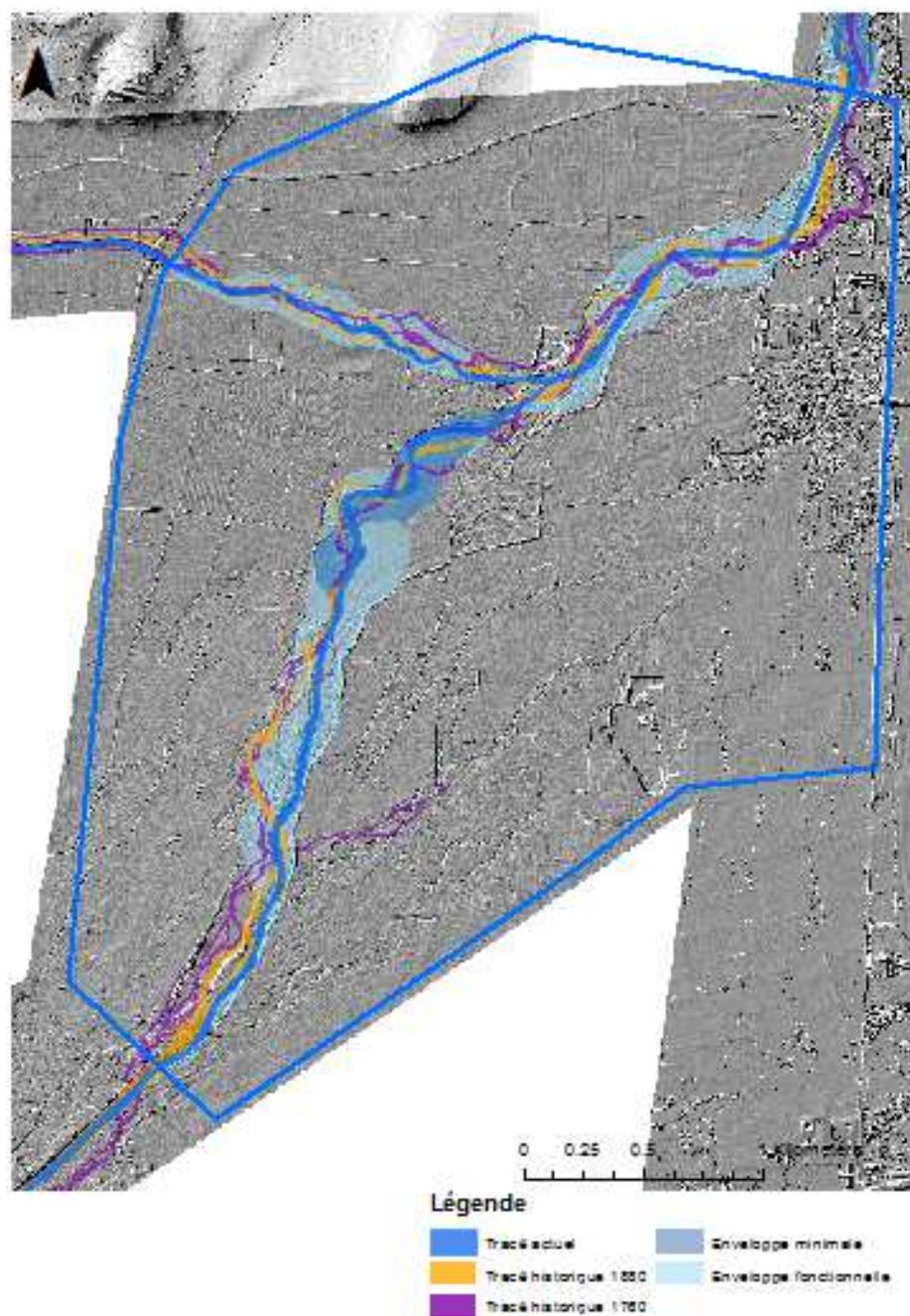
reconstituer la dynamique latérale des cours d'eau, une méthodologie est proposée pour définir les zones de mobilité. Une politique volontaire visant à limiter les constructions dans ces zones est à mener pour les préserver.

Il faut enfin remarquer que la non intervention peut parfois être une solution tout aussi efficace mais moins coûteuse qu'un aménagement. En effet un simple laisser-faire accompagné d'un entretien régulier et d'une préservation de la zone peut être tout à fait suffisant sur certains cours d'eau au fort potentiel de restauration.

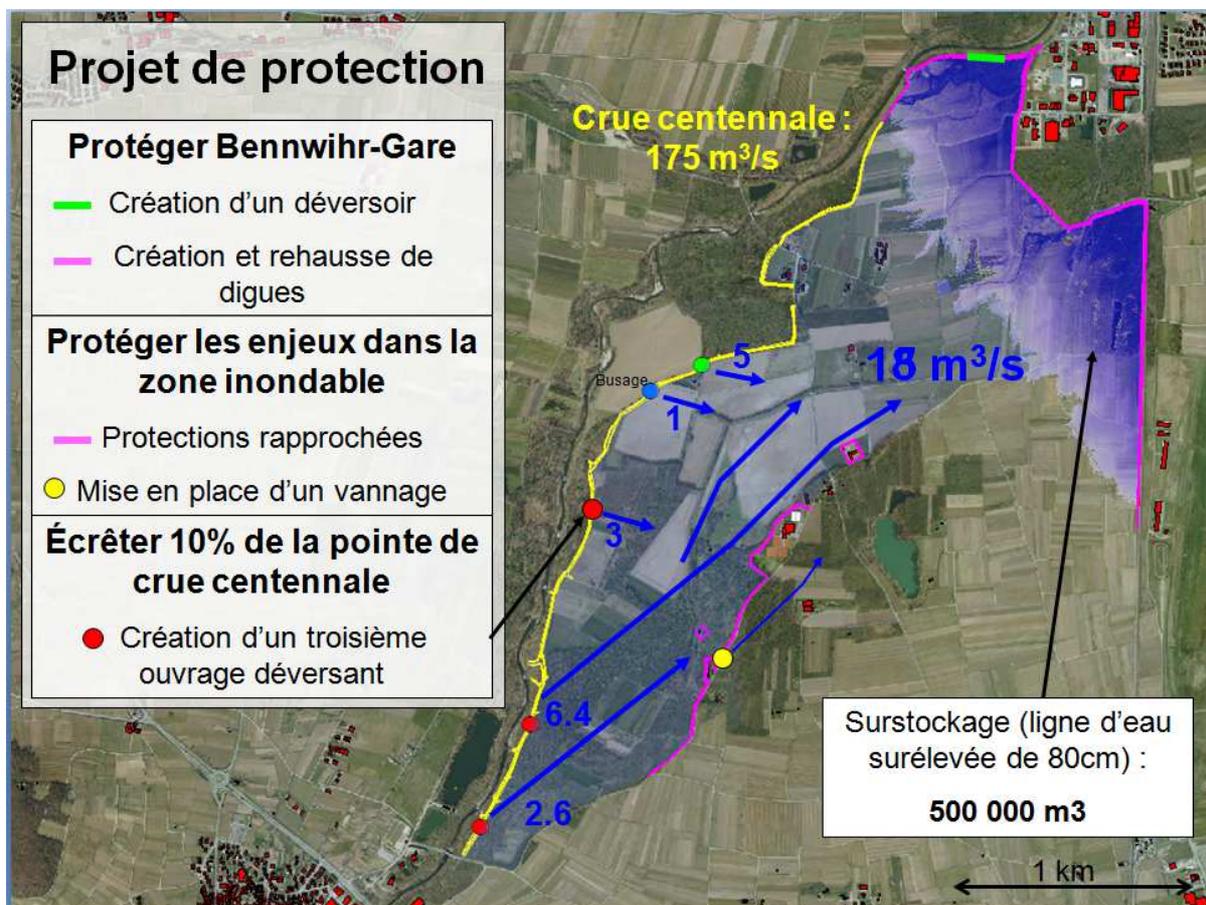
Annexe 2 : Bilan de l'état des lieux pour le secteur d'étude et extrémités du modèle



Annexe 3 : Fuseaux de mobilité pour le secteur d'étude



Annexe 4 : Nouveau projet de protection contre les crues sur la Waldeslust (Source : Conseil Départemental du Haut-Rhin)



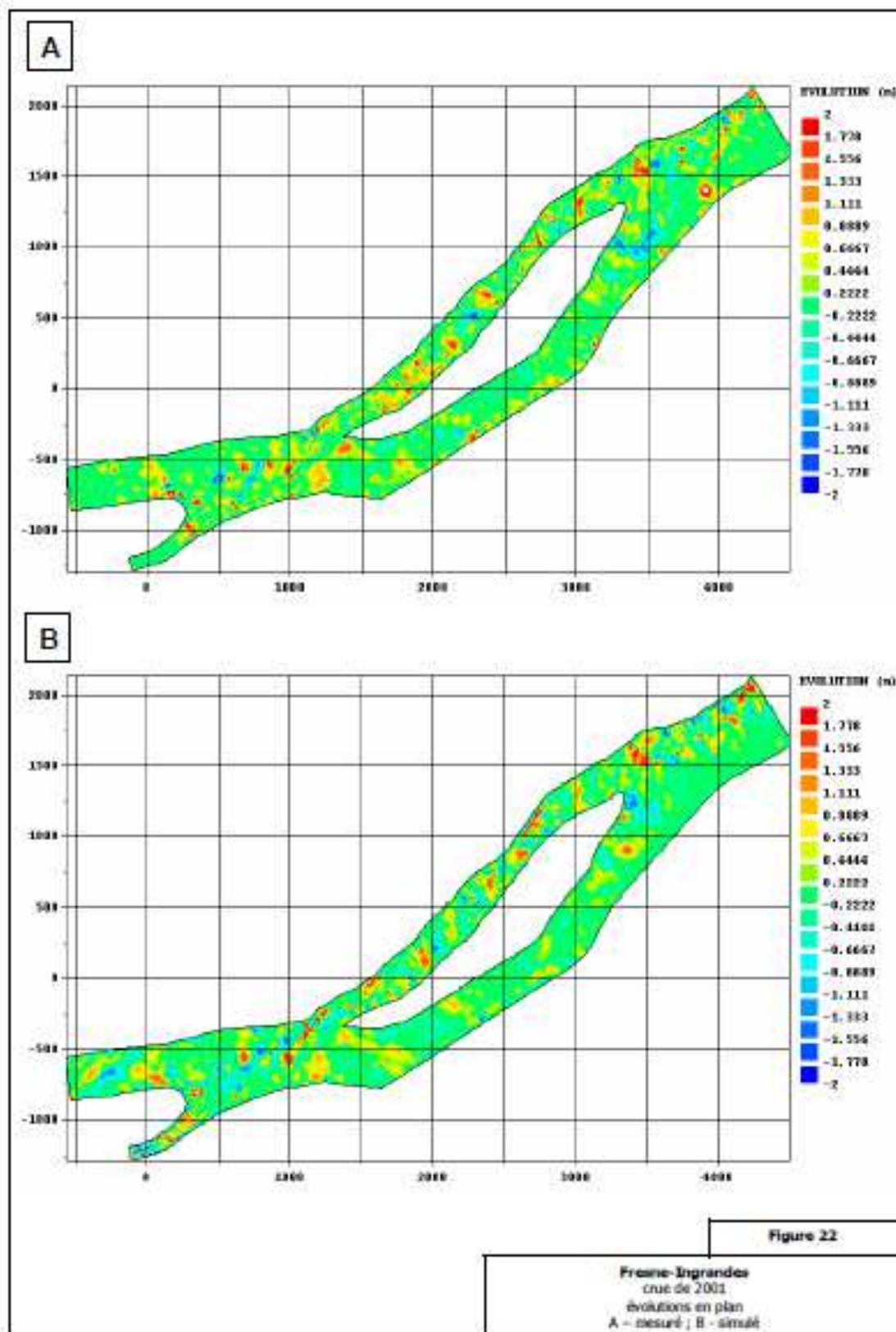
Annexe 5 : Plan de Prévention des Risques Inondations de la Fecht (2008)



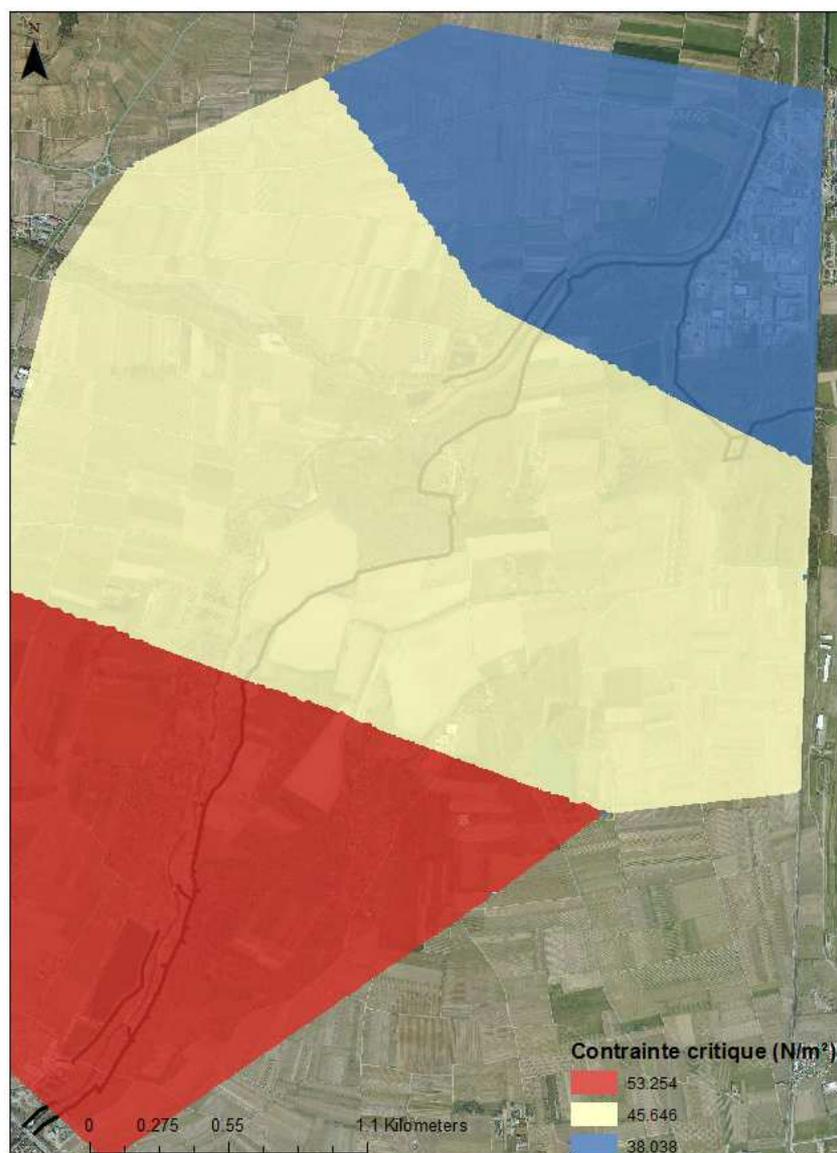
Légende

- Zone inondée par débordement, ou inondable en cas de crue centennale, inconstructible
- Zone inondée par débordement, ou inondable en cas de crue centennale, à risque modéré, pouvant être ouverte à l'urbanisation
- Risque fort en cas de rupture de digue
- Risque modéré en cas de rupture de digue

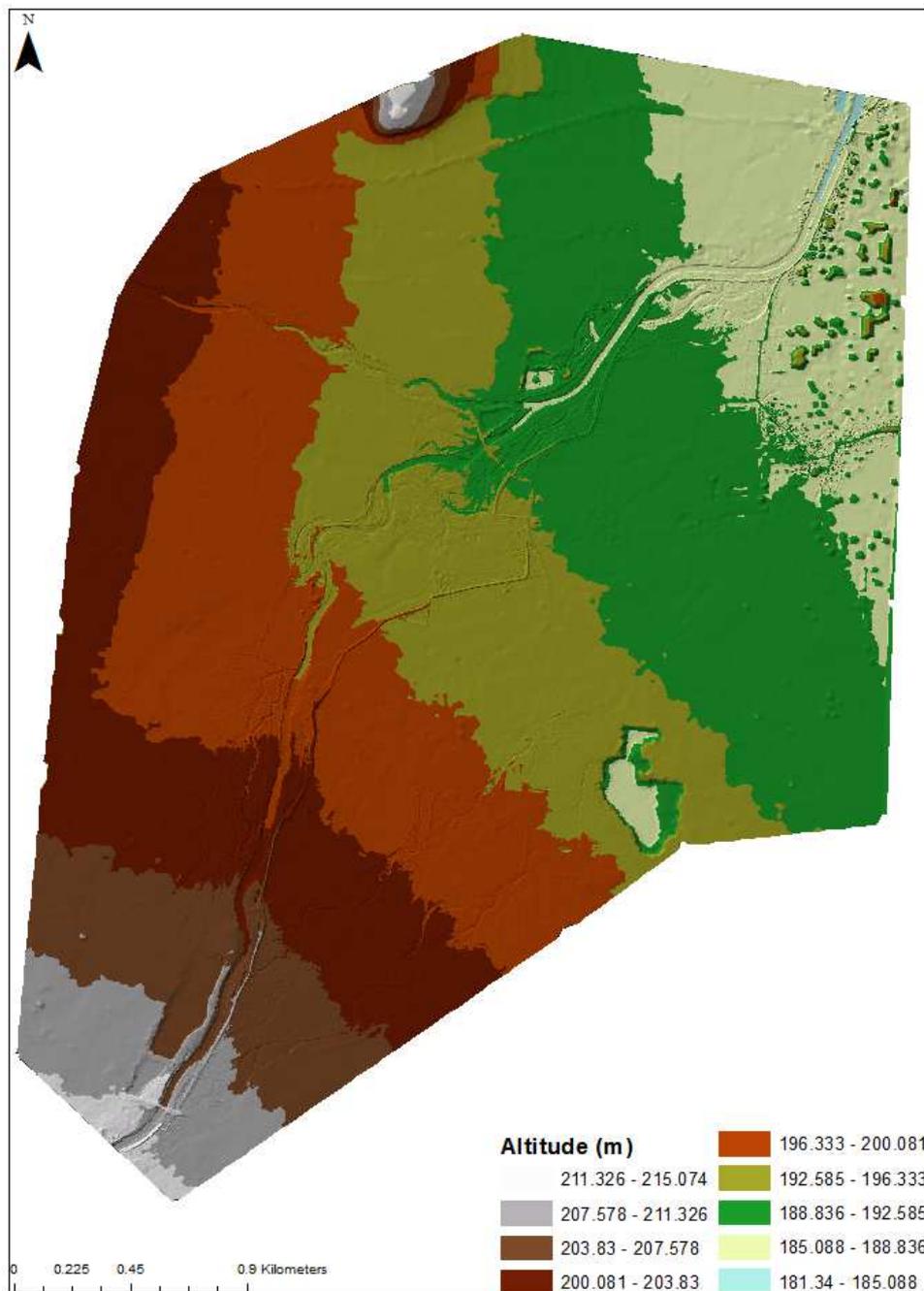
Annexe 6 : Exemple de résultats pour l'évolution morphologique du fond du lit obtenue avec SISYPHE (Source : De Linares, 2007)



Annexe 7 : Cartographie des contraintes critiques

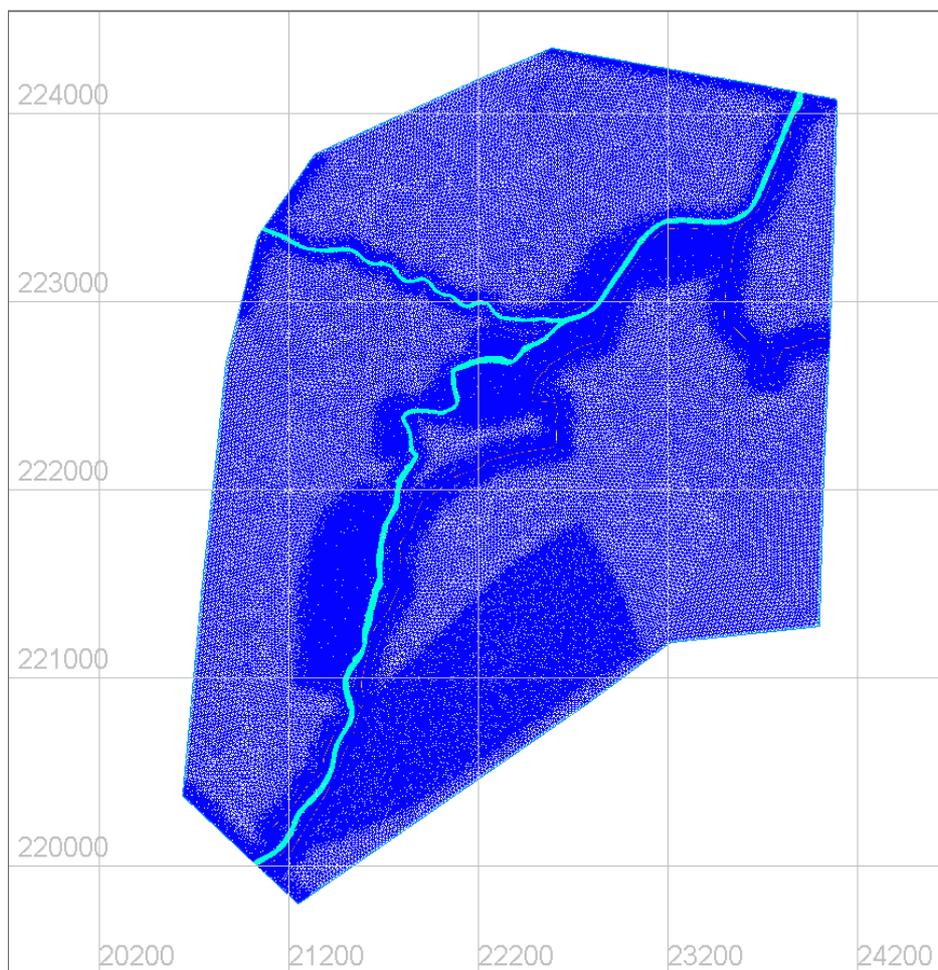


Annexe 8 : Topographie du modèle pour la situation actuelle

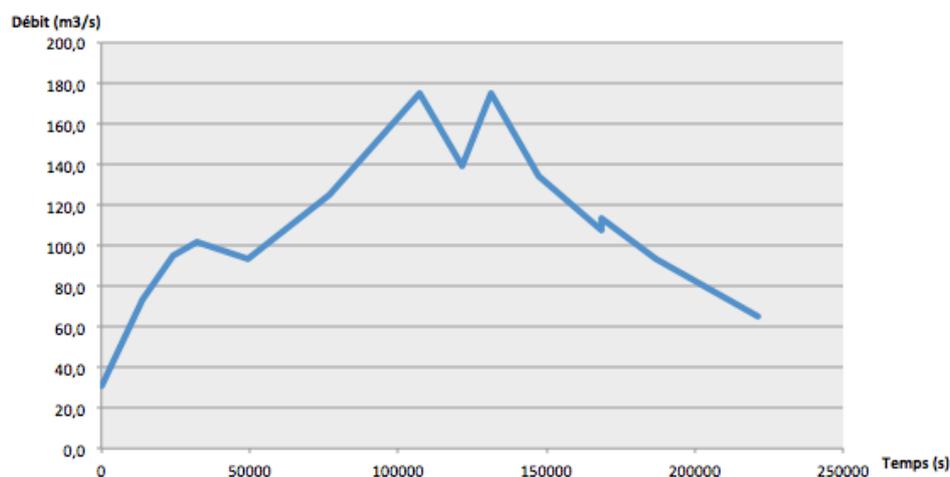


Annexe 9 : Maillage du modèle hydraulique pour la situation actuelle

Les coordonnées sont en Lambert Conformal Conic, décalés pour réduire la taille des nombres et garder de la précision lors du passage sous TELEMAC 2D. Le logiciel gère en effet mal les coordonnées trop longues.

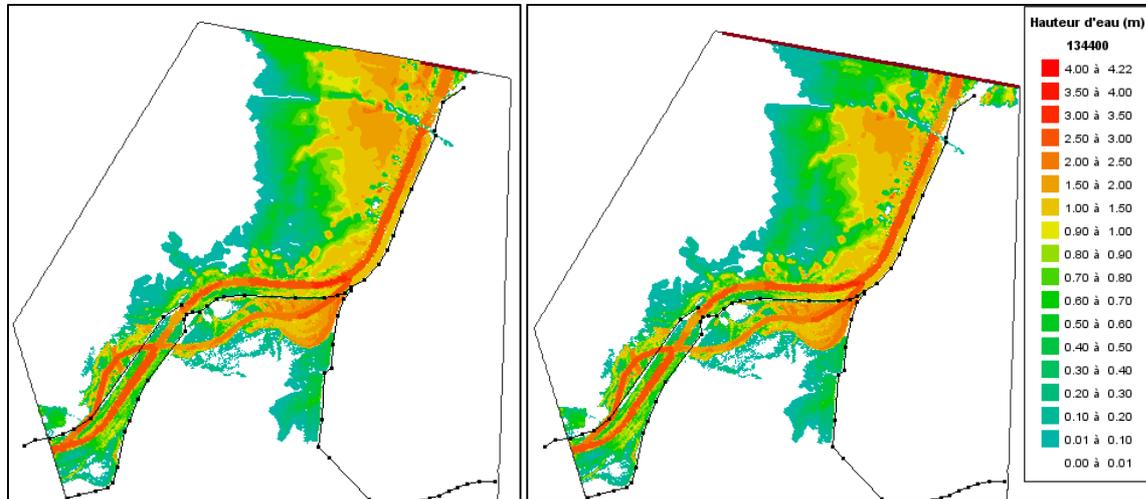


Annexe 10 : Hydrogramme pour la crue centennale utilisé en entrée du modèle

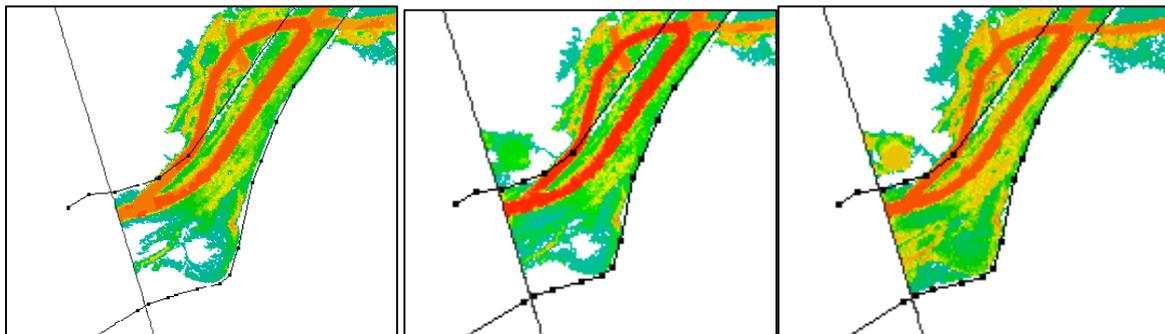


Annexe 11 : Impact de la taille de frontières liquides sur la qualité des résultats

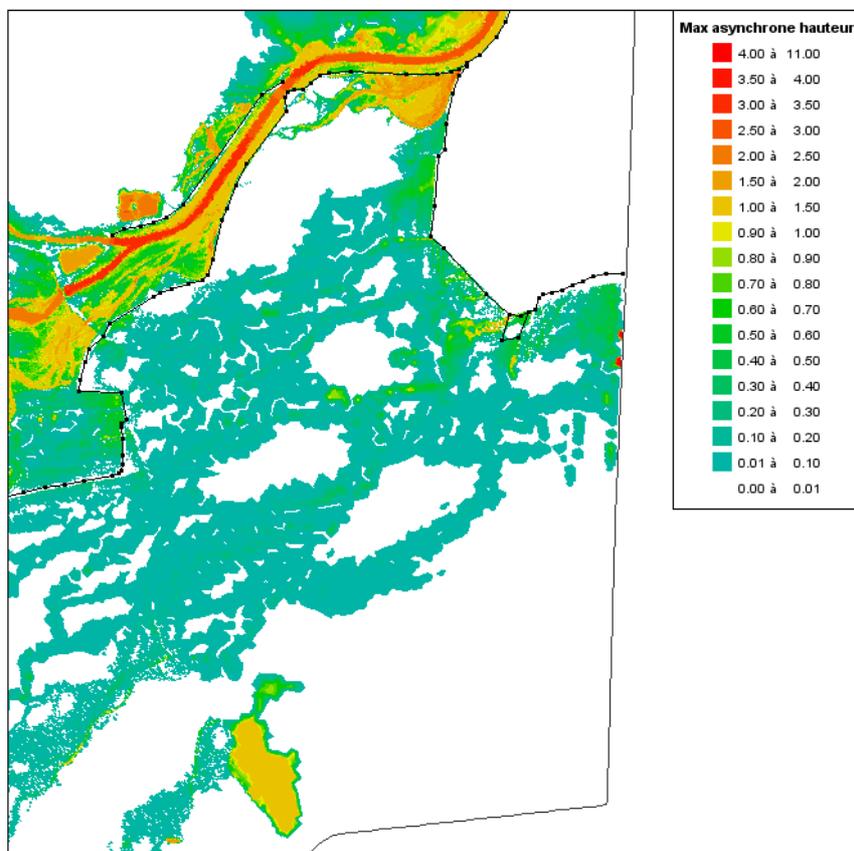
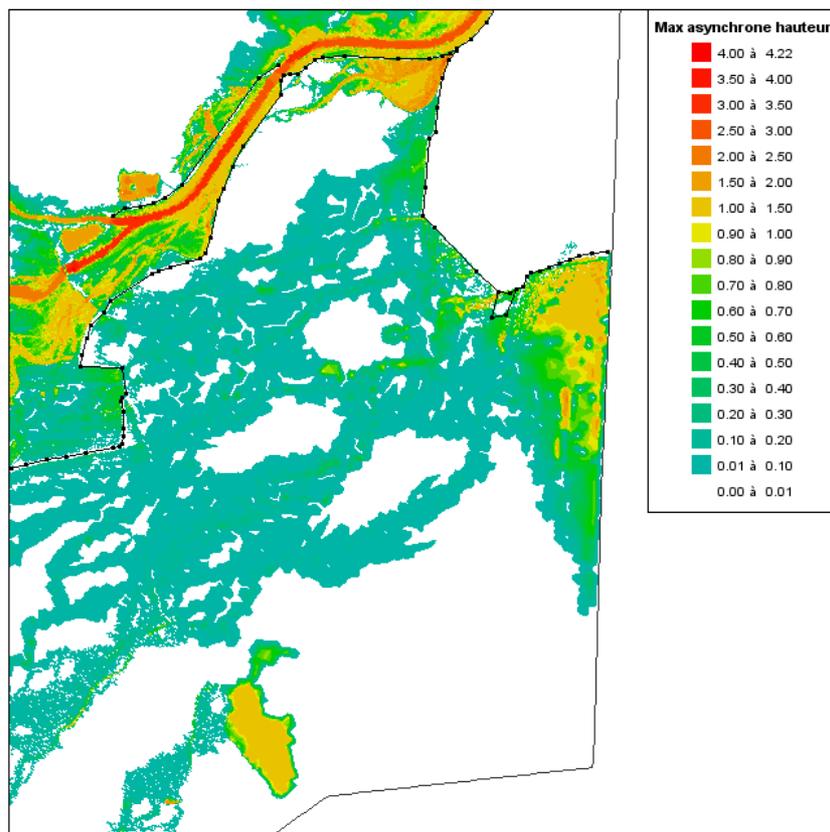
Exemple sur la frontière aval. a) Bord trop étroit b) Bord adapté à l'inondation ou plus large, en marron



Exemple sur la frontière amont. a) Bord limité au lit mineur b) Bord ouvert sur toute la section entre les digues c) Bord large avec injection d'un débit supplémentaire dans le chenal rive droite

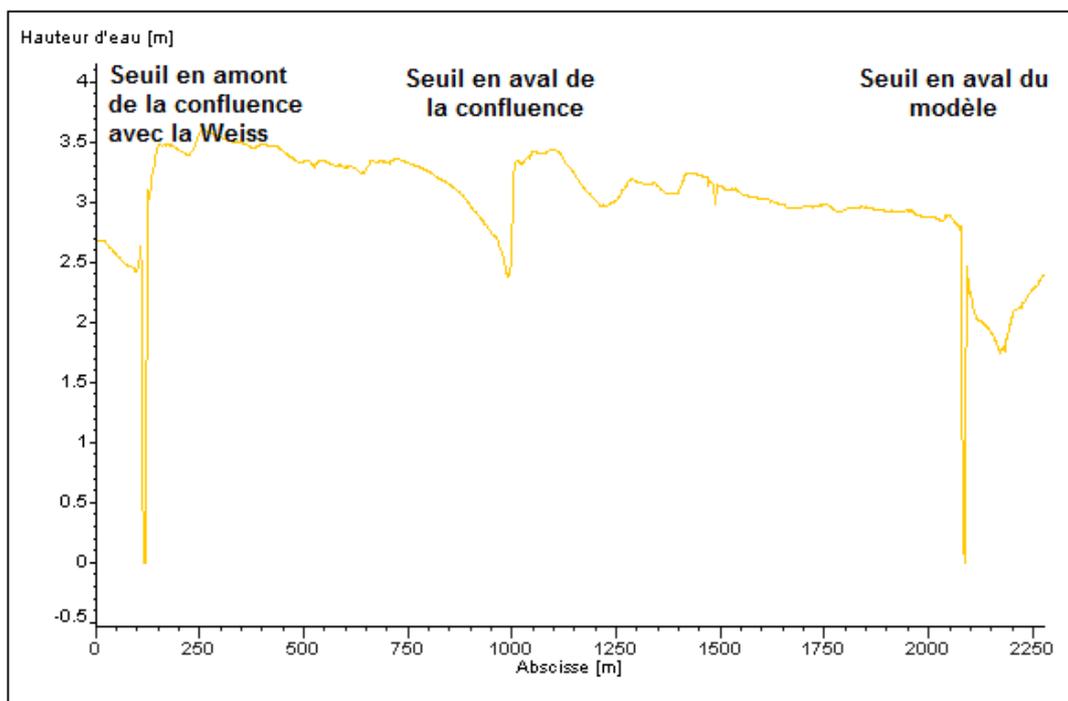


Annexe 12 : Impact du choix de la frontière pour représenter les écoulements après la voie ferrée. a) Bord solide b) Bord liquide sortie libre

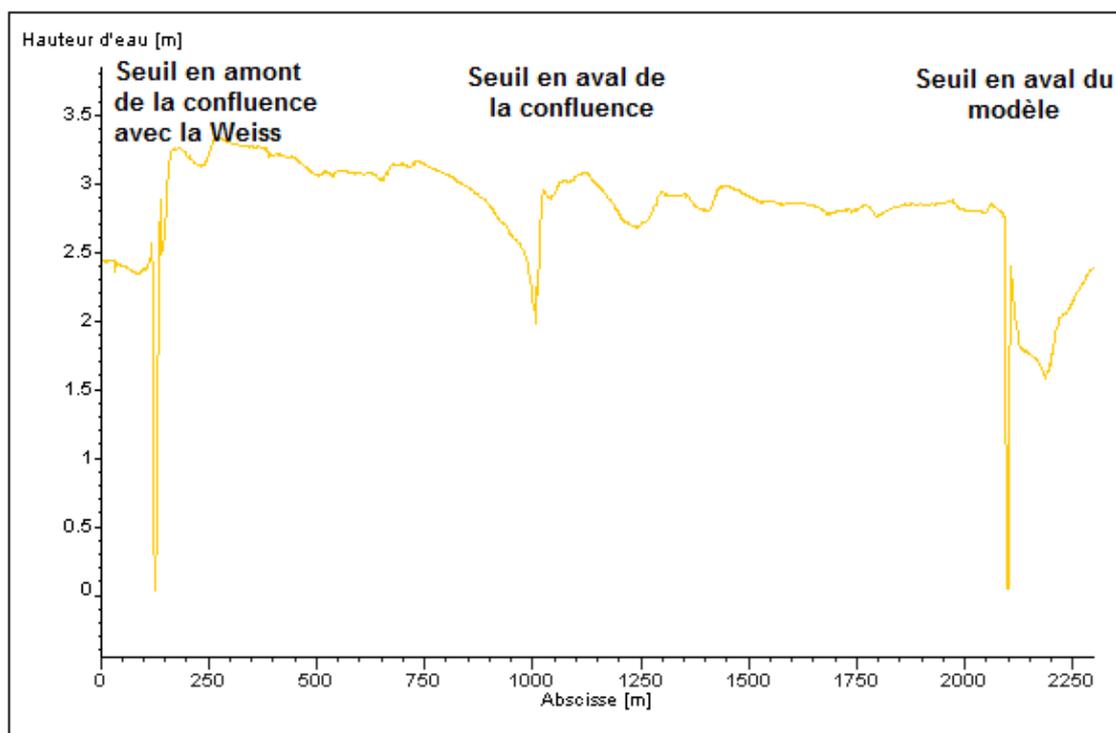


Annexe 13 : Impact du choix du coefficient de Strickler sur les lignes d'eau dans le lit mineur

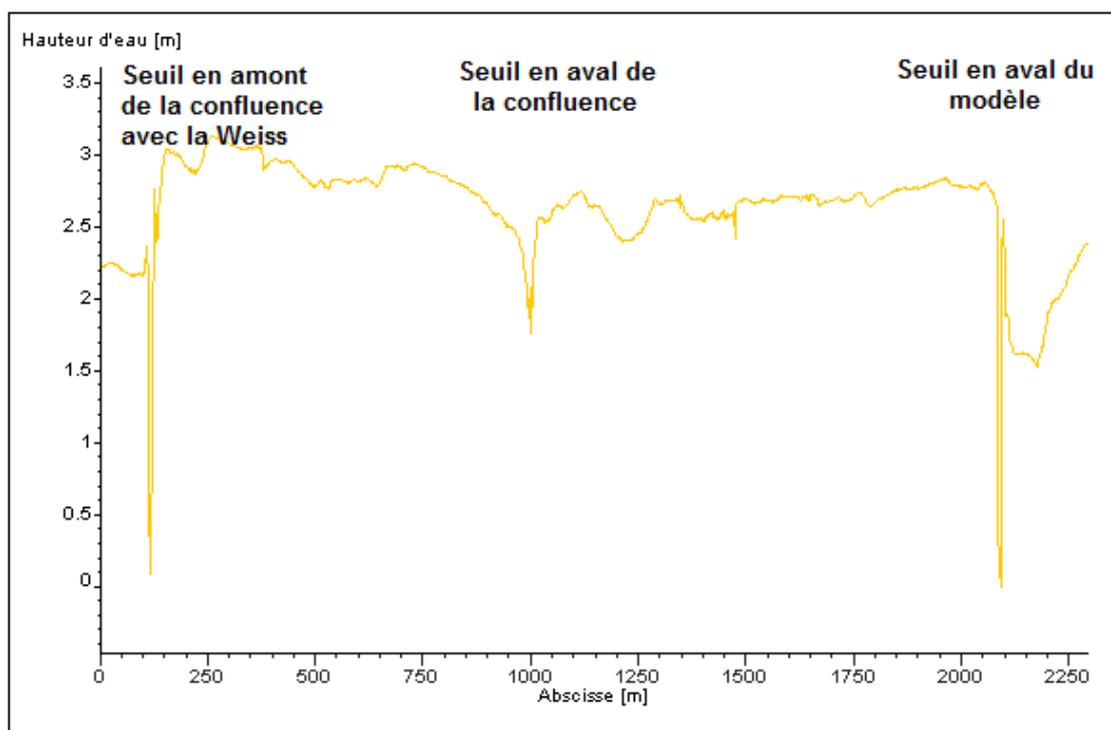
A. Ligne d'eau pour la simulation avec Ks-10



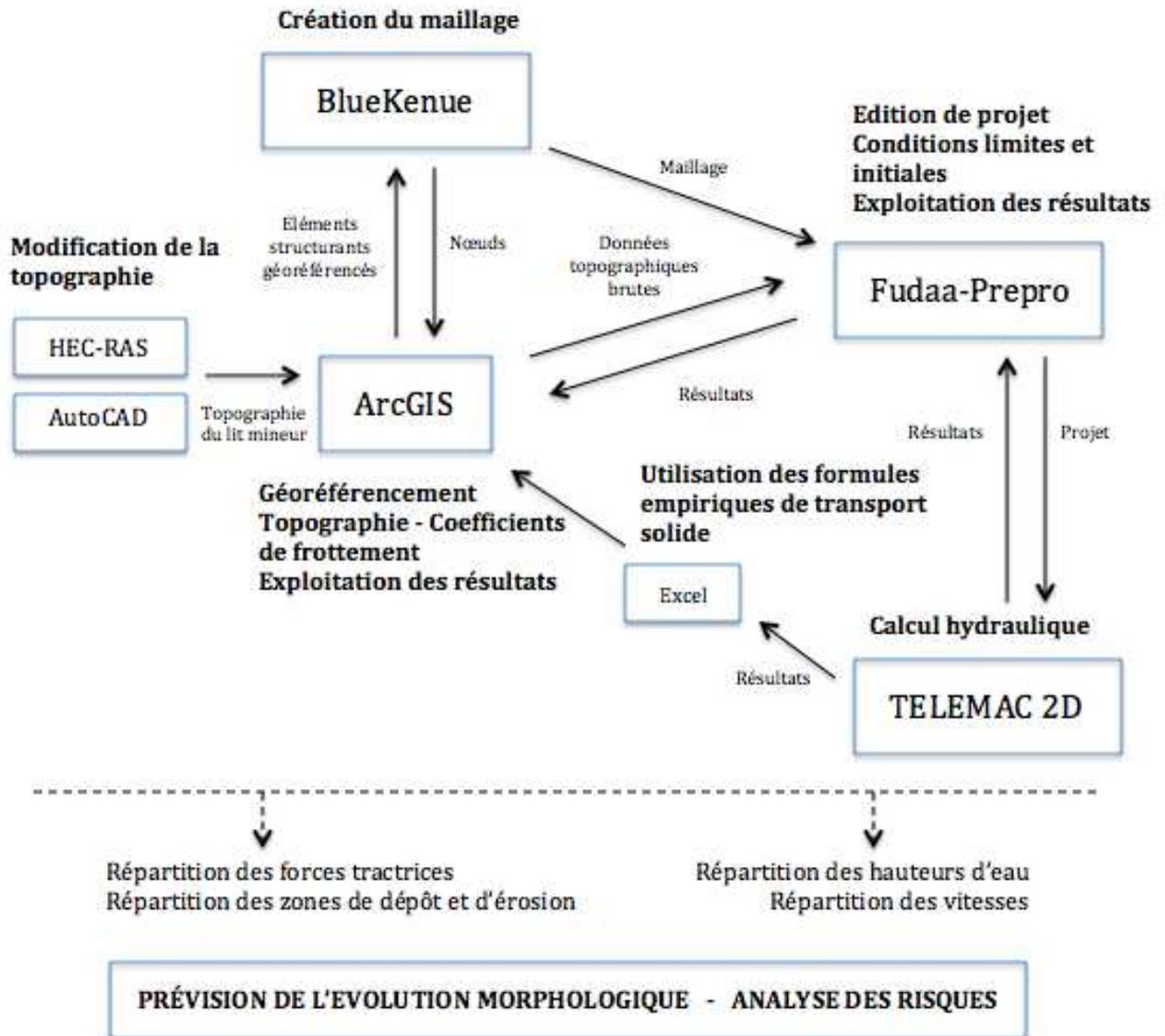
B. Ligne d'eau pour la simulation du modèle final



C. Ligne d'eau pour la simulation avec Ks+10

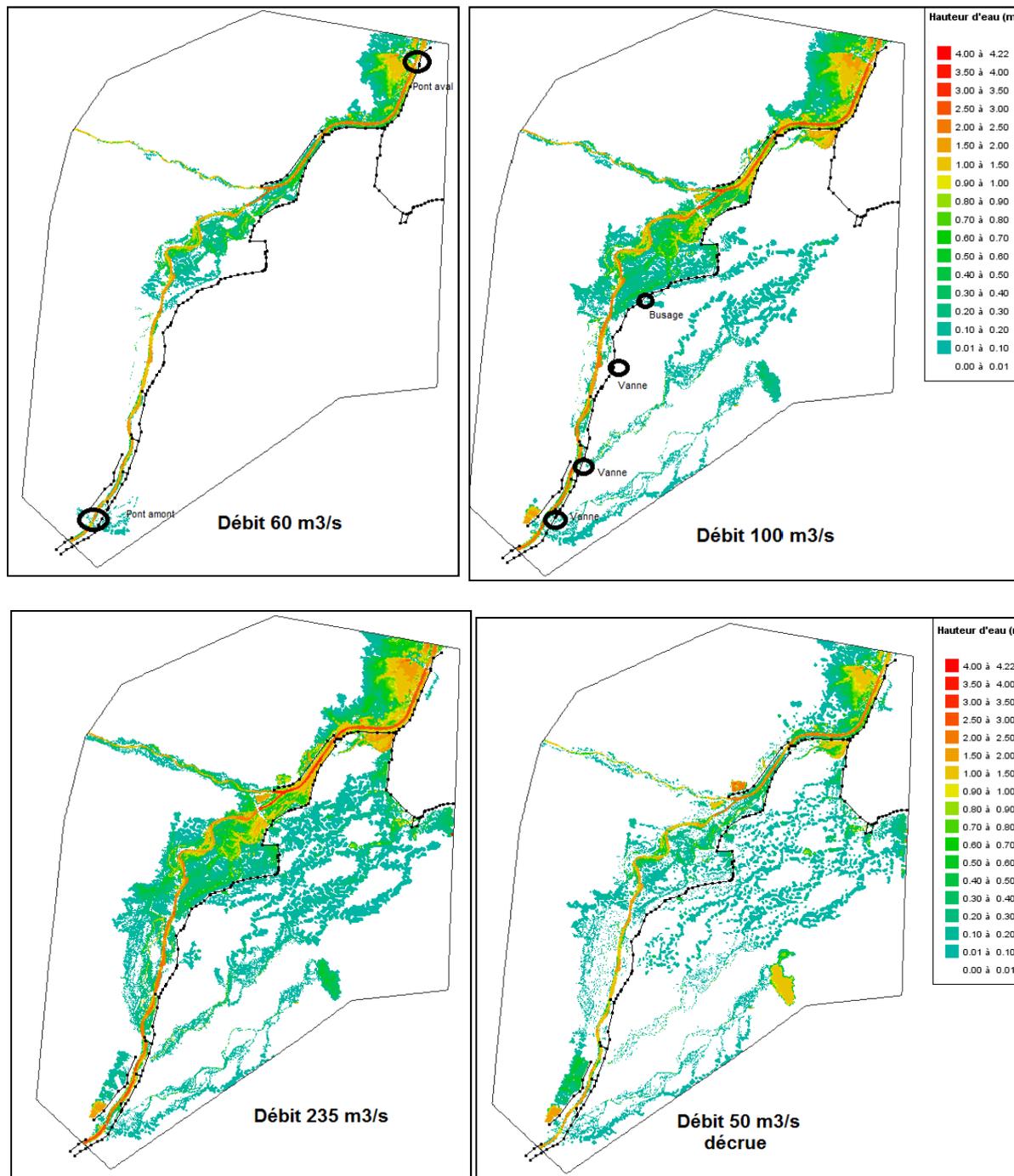


Annexe 14 : Schématisation de la démarche

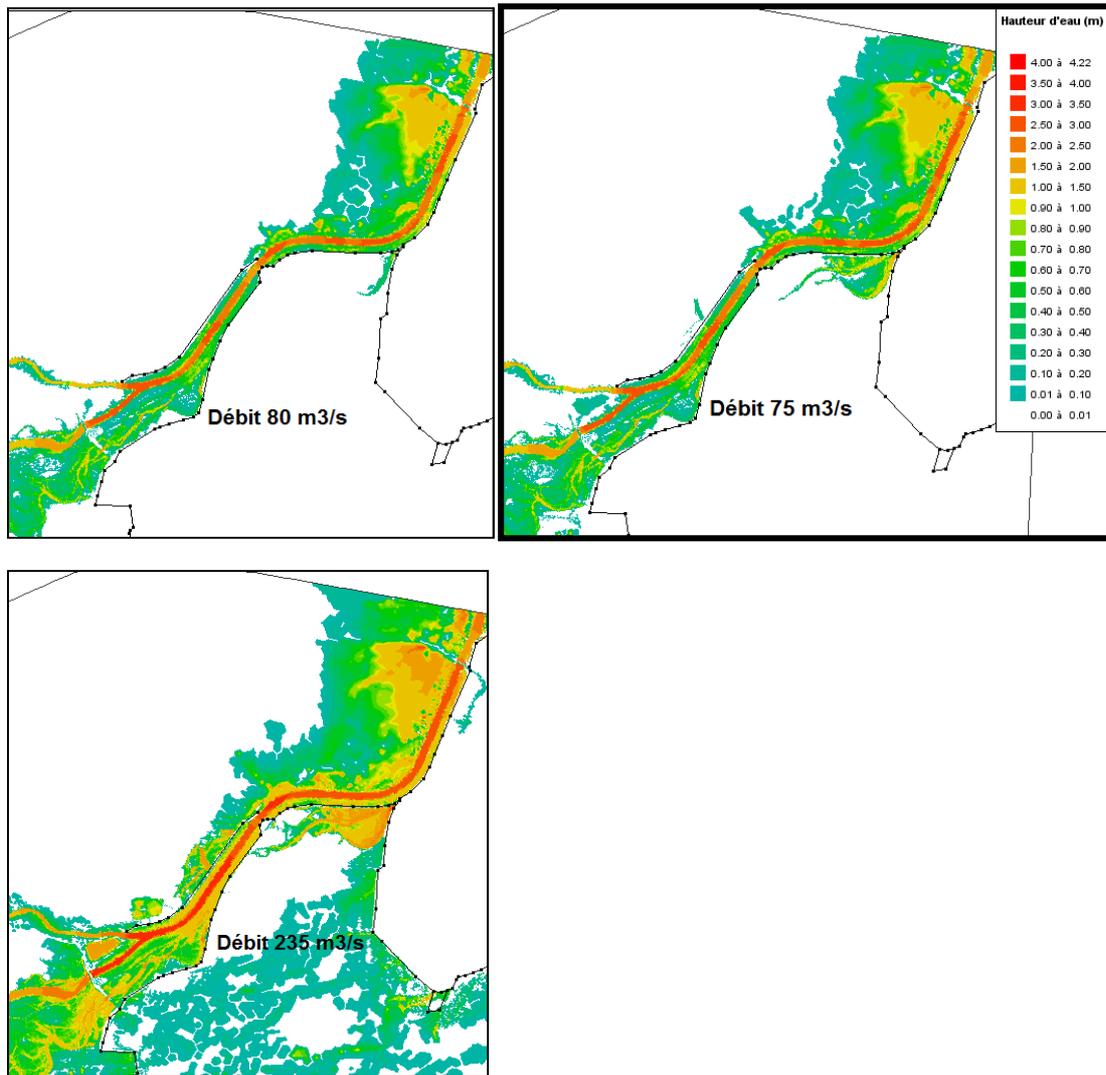


Annexe 15 : Fonctionnement hydraulique de la zone pour la situation actuelle

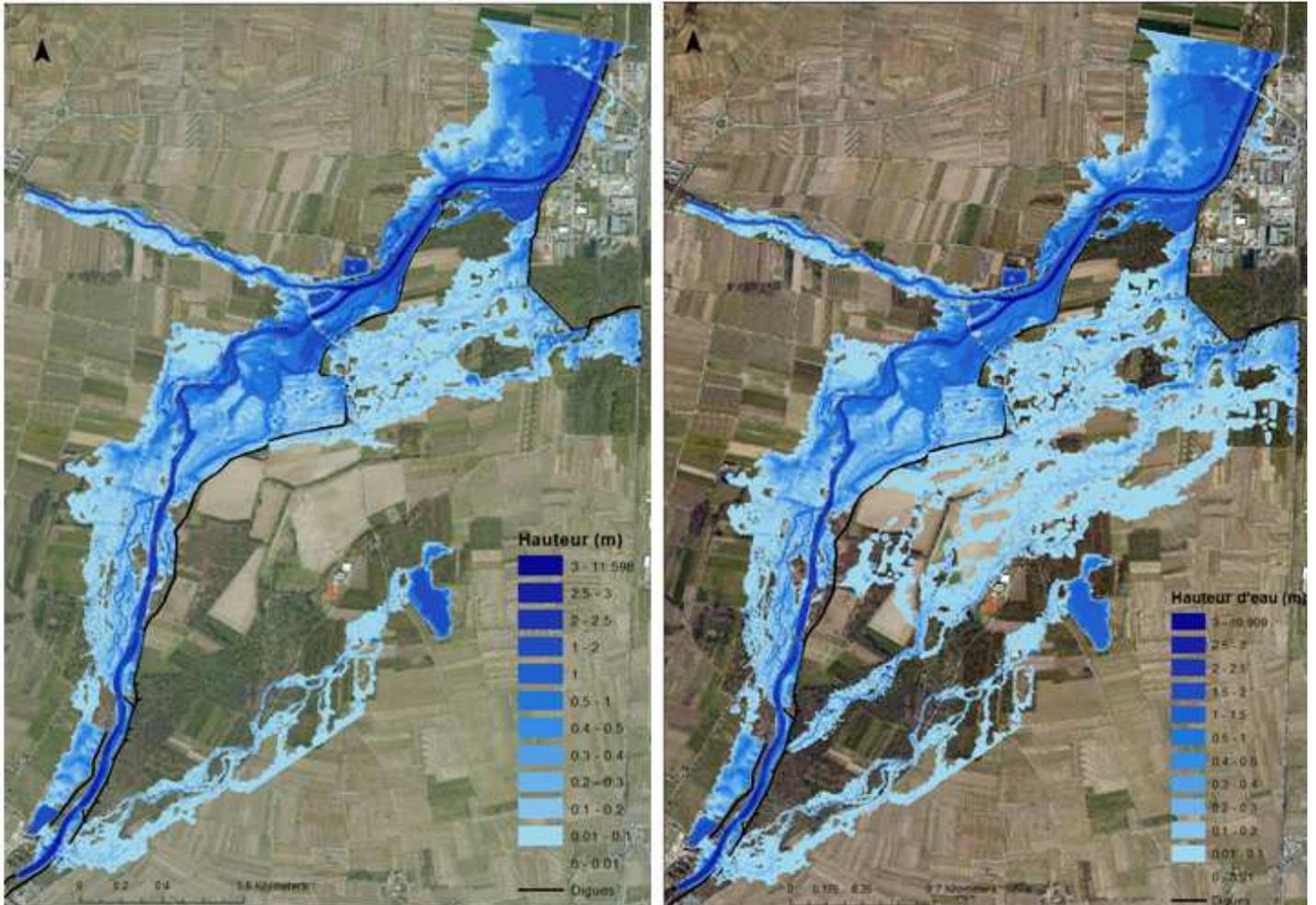
A. Sur la superficie du modèle



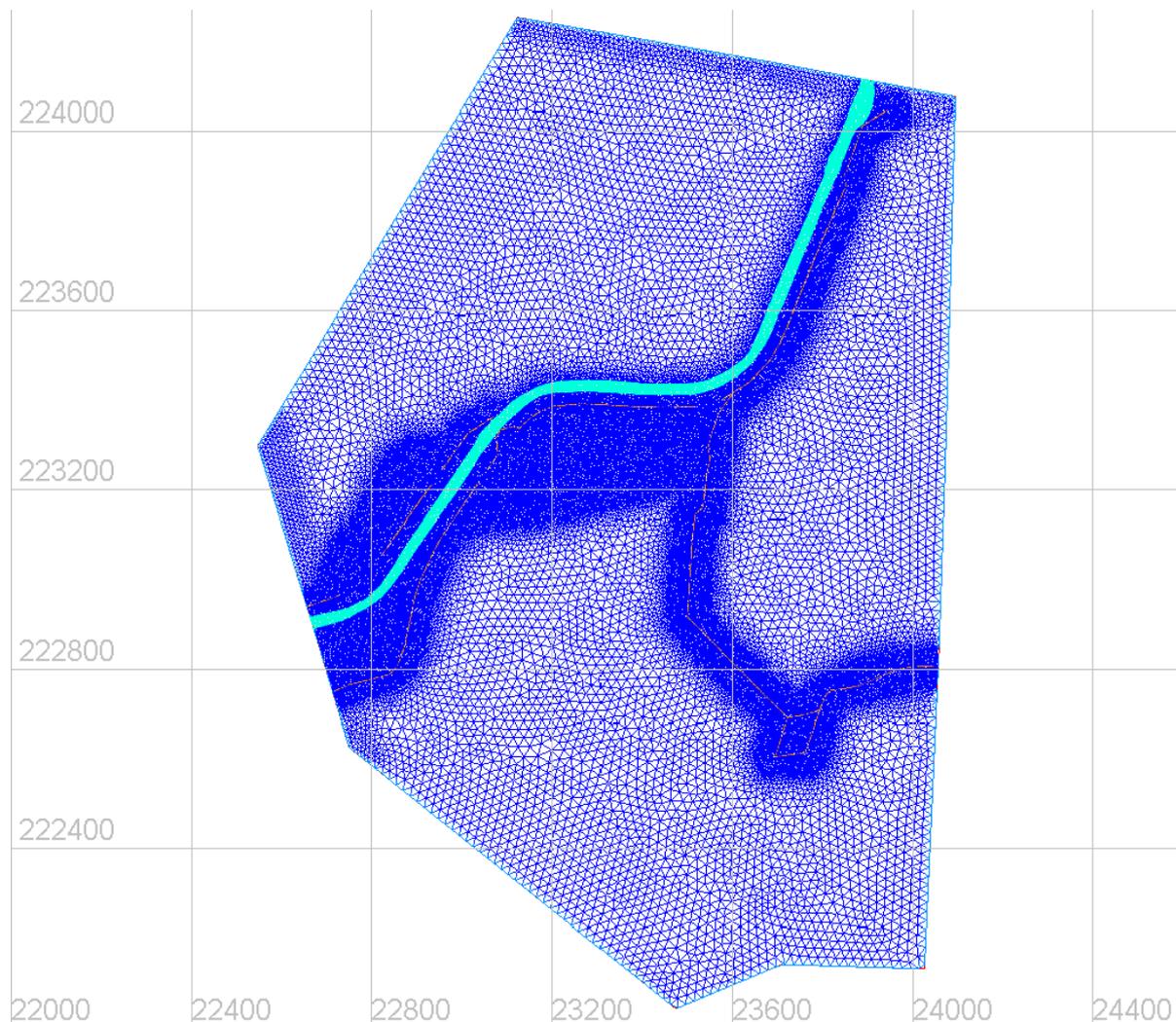
B. Pour la zone restaurée



Annexe 16 : Comparaison en termes d'expansion de l'inondation entre les situations avec et sans fonctionnement du système de laminage et mise en évidence du fonctionnement hydraulique de ce système

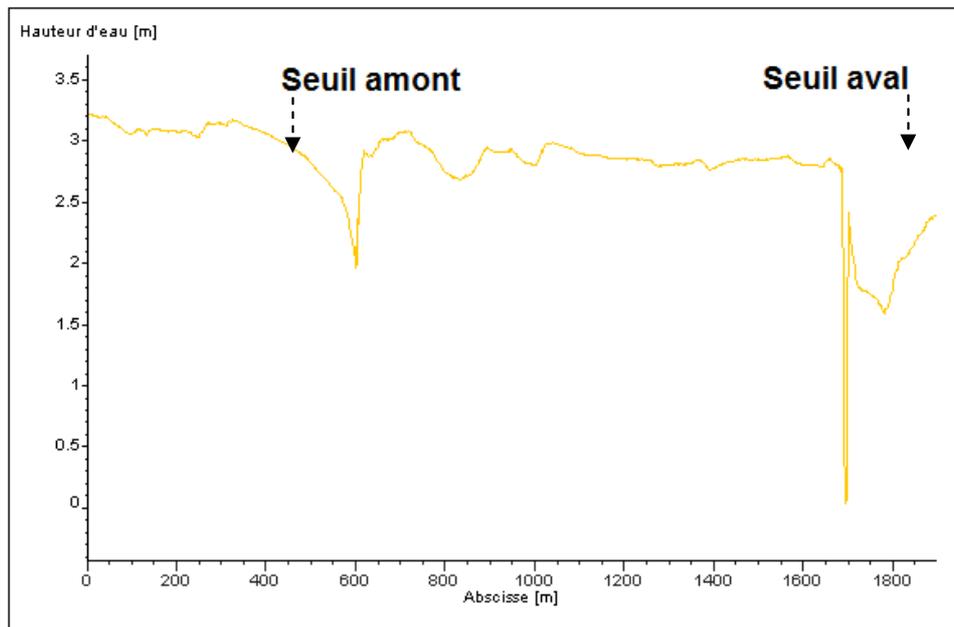


Annexe 17 : Maillage du modèle hydraulique réduit

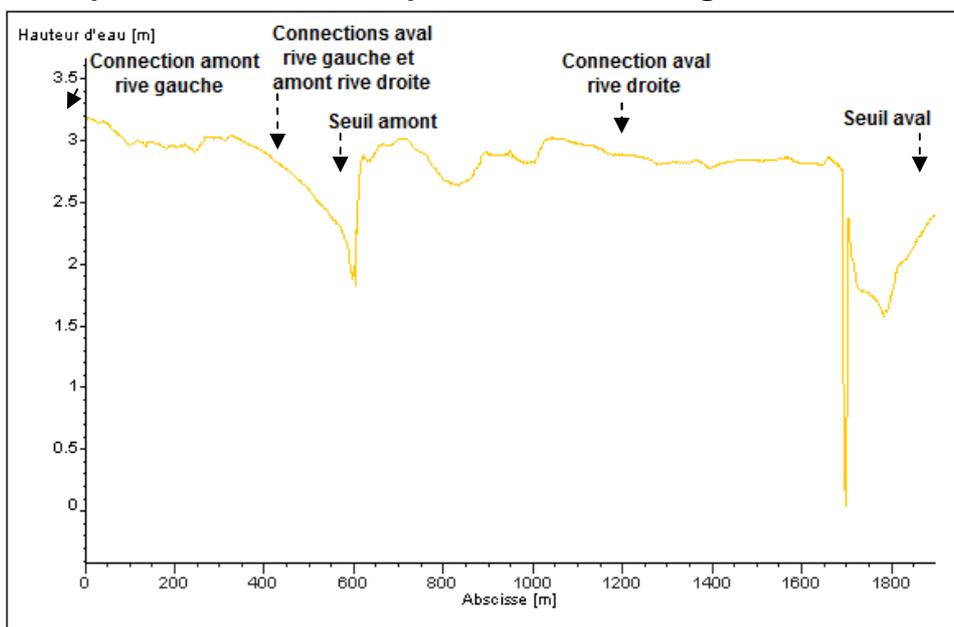


Annexe 18 : Comparaison des lignes d'eau dans le lit mineur avant et après intervention

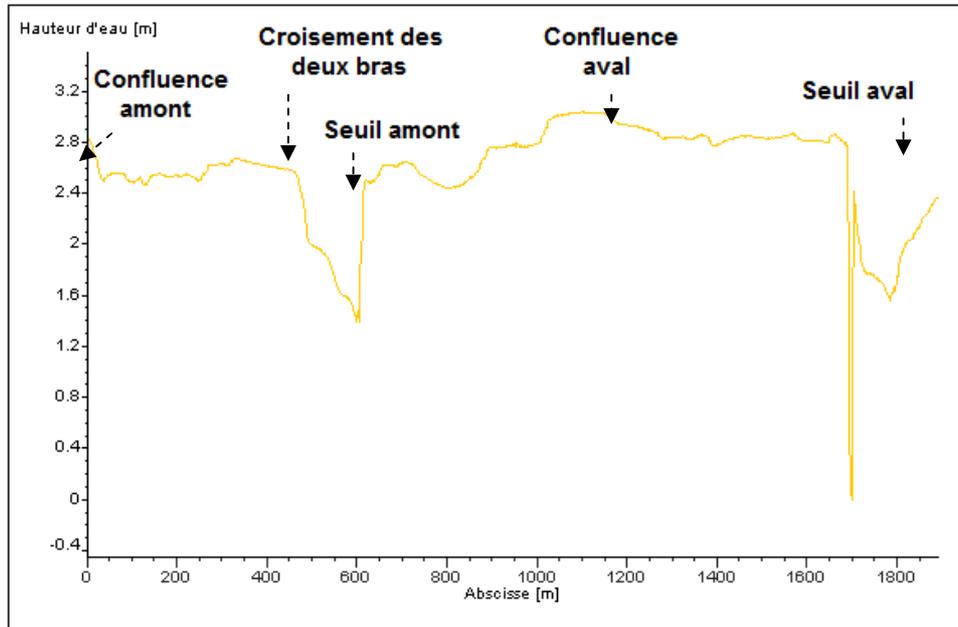
A. Ligne d'eau pour la situation actuelle



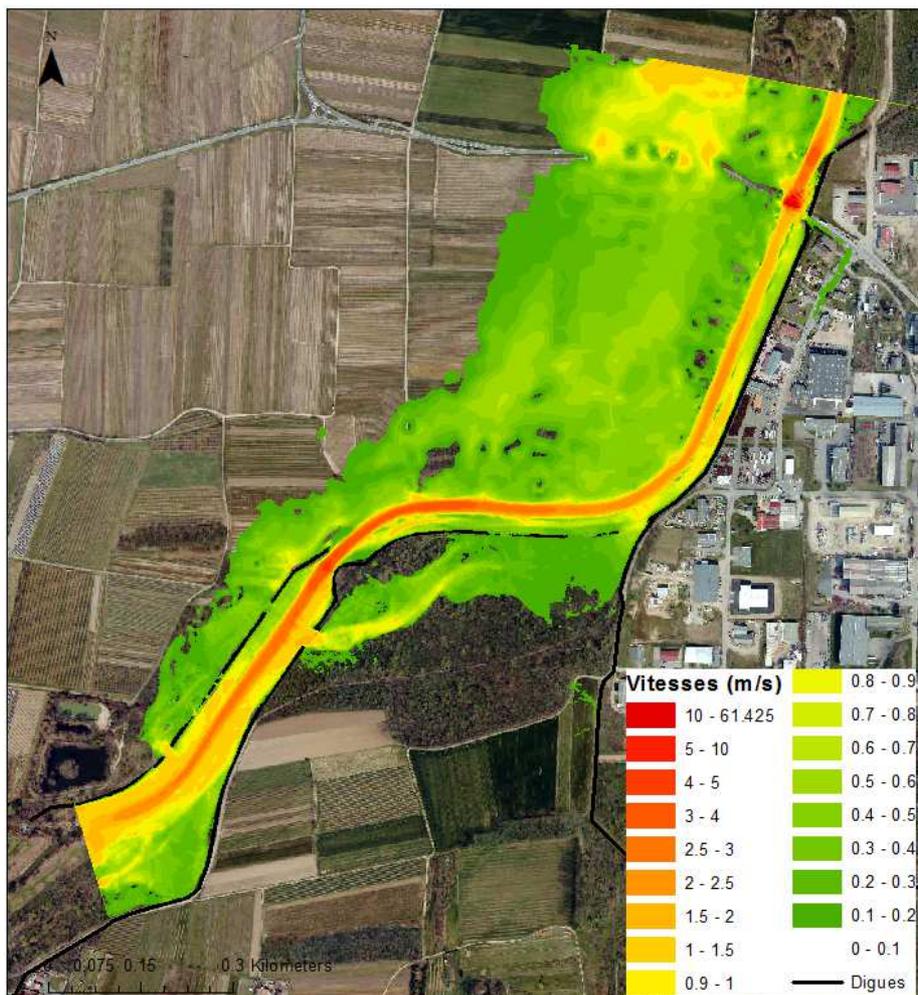
B. Ligne d'eau pour la reconnexion par ouverture de digues



C. Ligne d'eau pour la création d'un bras secondaire

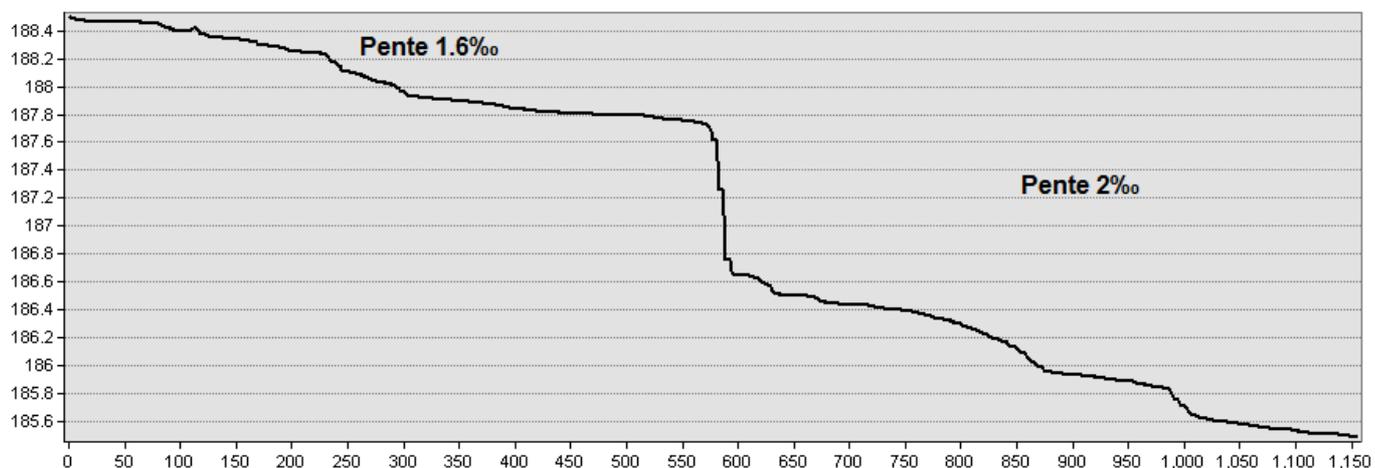


Annexe 19 : Résultats en termes de vitesses pour la situation test avec reconnexion des chenaux par ouverture des digues

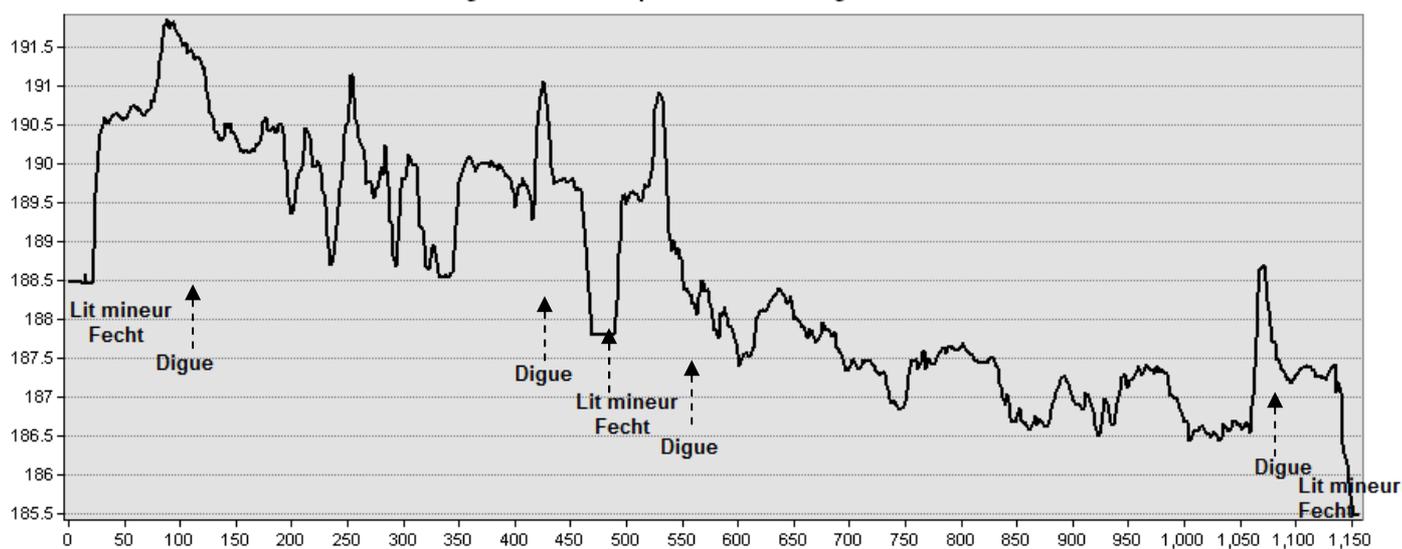


Annexe 20 : Profils en long comparés du lit mineur actuel et de l'emplacement envisagé pour le second bras

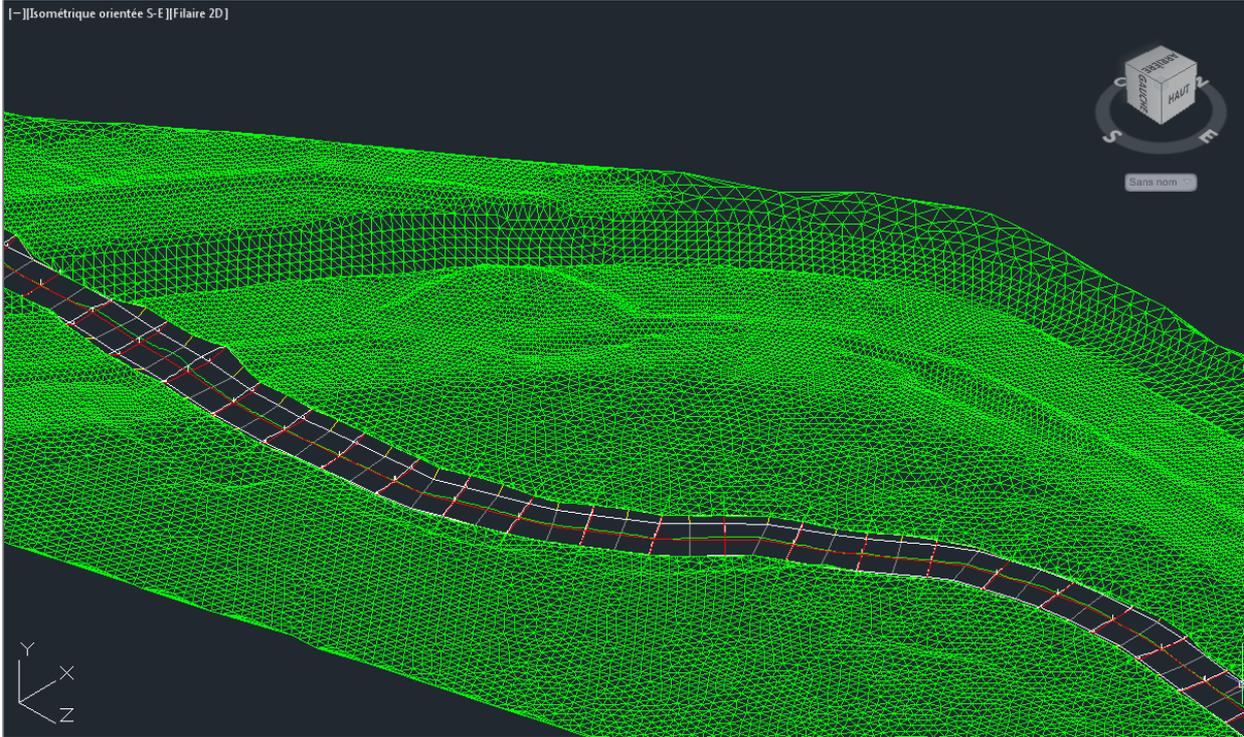
Profil en long du lit mineur actuel de la Fecht



Profil en long actuel de l'emplacement envisagé du second bras

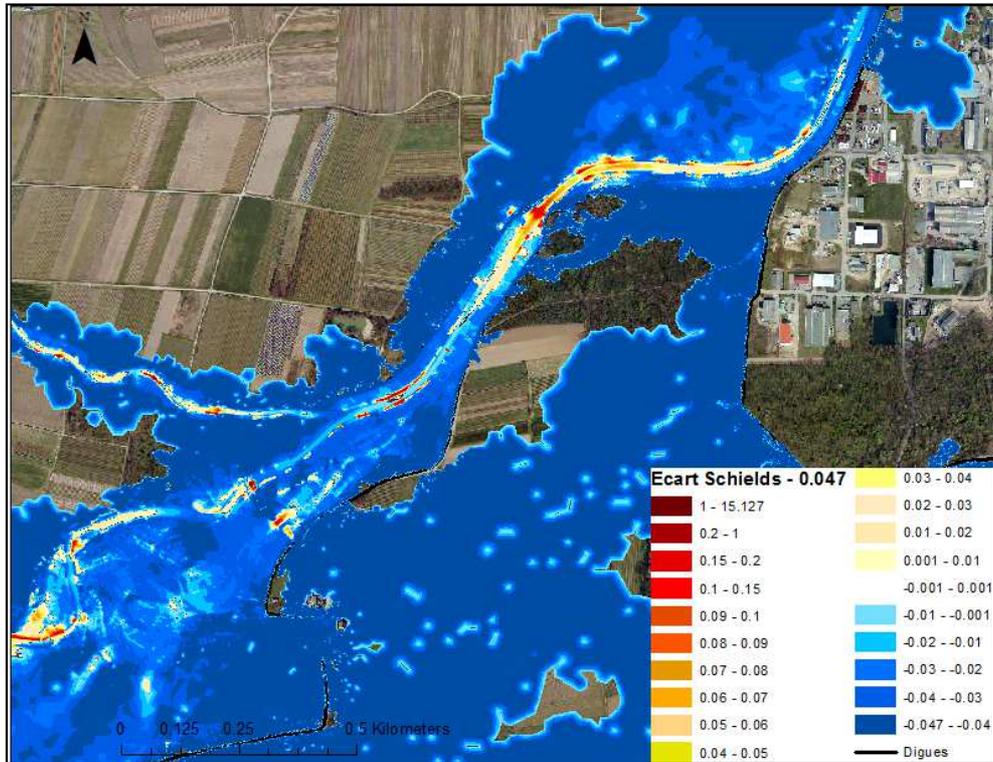


Annexe 21 : Vue isométrique 3D de la topographie avec visualisation du tracé et de la construction du nouveau chenal sous AutoCAD

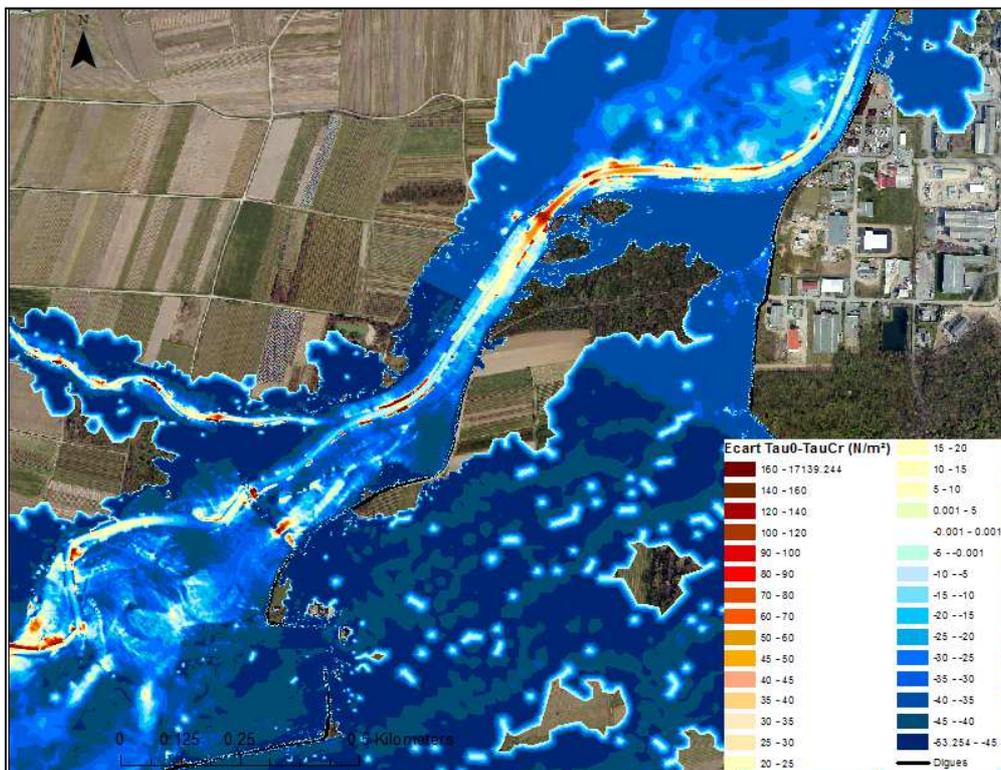


Annexe 22 : Comparaison de deux méthodes pour mettre en évidence la répartition des zones de dépôt et d'érosion au regard des résultats obtenus

A. Ecart entre le paramètre de Shields et la valeur de référence 0.04



B. Ecart entre la contrainte tractrice et la contrainte critique





MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme(s) : Ingénieur de l'ENGEES

Spécialité : Gestion Durable de l'Eau dans les Territoires (GEDET)

Auteur : Anne WATTEAUX

Année :

2015

Titre :

Modélisation bidimensionnelle d'un projet de restauration hydromorphologique sur la Fecht

Nombre de pages : 99 (texte 60 annexes 23)

Nombre de références bibliographiques : 19

Structure d'accueil : Conseil départemental du Haut-Rhin / Colmar / France

Maître de stage : Nicolas KREIS

Résumé :

Cette étude s'inscrit dans le programme d'études globales de restauration hydromorphologique des cours d'eau, élaboré par le Conseil départemental du Haut-Rhin. Elle a pour but de tester les possibilités de la modélisation hydraulique 2D en tant qu'outil à la décision en matière de restauration. Une démarche a été mise en place, consistant à utiliser les résultats du calcul hydraulique pour obtenir les modifications des paramètres sédimentaires, et l'évolution morphologique associée, induites par des interventions de renaturation.

Mots-clés : Restauration, renaturation, hydromorphologie, modélisation 2D, transport solide, continuité écologique latérale, évolution morphologique, risque inondation, hydraulique fluviale, TELEMAR 2D