

École Polytechnique Fédérale de Lausanne  
*Sciences et ingénierie de l'environnement*  
Projet de master

---

## Évaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

---



Professeur  
Encadrant externe  
Étudiant

Giovanni de Cesare  
Quentin Theiler  
Cédric Délèze

**EPFL**

  
sd ingénierie  
Dénériaz & Pralong Sion SA

18 mars 2022

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le directeur opérationnel de la plateforme de constructions hydrauliques, le professeur Giovanni De Cesare, pour son approbation de représenter l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) pour ce travail et pour son accompagnement tout au long du projet.

Je tiens aussi à remercier la succursale de Sion de l'entreprise *sd ingénierie* pour leur accueil chaleureux lors de mon stage et de mon projet de master. Un grand merci à son directeur, Pierre-François Décoppet, de m'avoir permis de poursuivre ma collaboration avec le bureau au travers de ce travail. Je remercie aussi la section hydraulique pour leur aide durant ces derniers mois et plus spécifiquement, je remercie Quentin Theiler, mon encadrant au sein de l'entreprise, pour sa disponibilité, ses réflexions et ses conseils.

Je remercie également les personnes avec qui j'ai pris contact durant ce projet ainsi que les différentes entreprises citées dans ce rapport pour l'utilisation de leurs données.

Finalement, je remercie ma famille et mes amis qui ont toujours été présents lors de mes années d'étude au sein de l'EPFL et garde une douce pensée pour ma sœur, Pauline.

## Résumé

Ce travail s'inscrit dans le projet de la 3<sup>ème</sup> correction du Rhône. Le bureau *sd ingénierie dénériaz et pralong SA* a été mandaté par l'Etat du Valais afin de définir les aménagements nécessaires à la mesure prioritaire de la région à proximité de la ville de Sion. L'intention de cette correction est de parvenir à une protection contre les crues durable dans la plaine, en augmentant la valeur écologique du Rhône.

L'objectif principal de ce projet de master est de parvenir à définir une variante optimale de confluence pour la connexion de la Borgne et de la Lienne avec le Rhône. Ces deux embouchures font partie de la mesure prioritaire de Sion et devront remplir leurs fonctions sécuritaires et écologiques.

Pour ce faire, une modélisation 3D de plusieurs variantes sera effectuée afin de définir les diverses configurations de confluences possibles. La création de ces dernières est faite sur la base d'une recherche bibliographique relative aux embouchures. Dans un premier temps, les aménagements prévus pour les confluences sont modélisés à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) en 3D. Ces configurations sont ensuite transformées en maillage, nécessaire pour procéder à une simulation morphodynamique à l'aide du logiciel de calcul hydro-morphodynamique 2D Basement. Cette modélisation consiste en une concomitance de crues entre le Rhône et ses affluents avec du transport solide. L'objectif de cette étape est de pouvoir quantifier l'impact du charriage sur le fond du lit du cours d'eau principal et de ses affluents. Cette modification du fond du lit est reprise pour la création d'un nouveau maillage, nécessaire à l'étape suivante. Ensuite, une modélisation hydrodynamique est effectuée sur la base de ce terrain modifié avec un débit annuel, sans transport solide. Les hauteurs d'eau, les vitesses et la modification du terrain vont être évaluées à l'aide d'une matrice comparative. Cette dernière est composée d'indicateurs écomorphologiques et hydrauliques, où chaque variante se verra attribuer une valeur en fonction de son impact bénéfique ou non sur la confluence.

Finalement, le total de points obtenus par chaque variante sera comparé afin de déterminer quelles variantes sont les plus adéquates, en fonction de l'affluent.

## Table des matières

<b>1. Introduction</b> .....	7
1.1 Contexte de la 3ème correction du Rhône .....	7
1.2 Caractérisation des affluents.....	9
1.3 State of the art .....	13
1.4 Questions de recherches.....	18
1.5 Méthodologie .....	18
<b>2. Type d'aménagements d'embouchure</b> .....	20
2.1 Buts de revitalisation des embouchures .....	20
2.2 Cadre légal.....	24
2.3 Exemples en Suisse.....	26
<b>3. Données de base</b> .....	28
3.1 Données existantes .....	28
3.2 Paramètres pour la Borgne .....	28
3.3 Paramètres pour la Lienne .....	29
3.4 Paramètres pour le Rhône .....	31
<b>4. Etude de variantes</b> .....	32
4.1 Présentation des catégories.....	32
4.2 Contraintes et objectifs considérés.....	34
4.3 Variantes de la Borgne .....	35
4.4 Variantes de la Lienne .....	40
<b>5. Modélisations numériques 2D</b> .....	44
5.1 Programme de calcul.....	44
5.2 Modélisation morphodynamique trentennale et centennale .....	44
5.2.1 Résultats secteur Borgne.....	45
5.2.2 Résultats secteur Lienne.....	53
5.3 Modélisation hydrodynamique annuelle .....	57
5.3.1 Résultats secteur Borgne.....	57
5.3.2 Résultats secteur Lienne.....	65
<b>6. Analyse et discussion</b> .....	70
6.1 Présentation de la matrice comparative.....	70
6.2 Résultats de la confluence de la Borgne .....	73
6.3 Résultats de la confluence de la Lienne .....	76
<b>7. Synthèse et conclusion</b> .....	78
<b>8. Bibliographie</b> .....	82
<b>Annexes</b> .....	86



## Nomenclature

$\mu_P$  : Moyenne des profondeurs d'eau

$\mu_V$  : Moyenne des vitesses d'écoulement

$B_A$  : Largeur de l'affluent

$B_E$  : Largeur de l'élargissement

$B_R$  : Largeur du cours d'eau principal

$d_m$  : Diamètre moyen des grains

DTAP : Conférence suisse des directeurs cantonaux des travaux publics, de l'aménagement du territoire et de l'environnement

$g$  : Constante de gravité

HADES : Atlas Hydrologique de la Suisse

HMID : Indice hydro-morphologique de la diversité

HZP : Hunziker, Zarn & Partner

$J$  : Pente

$k/kr$  : Facteur de structure de la section

$L_A$  : Longueur de l'affluent

LACE : Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau

LAT : Loi fédérale sur l'aménagement du territoire

$L_E$  : Longueur de l'élargissement

Leaux : Loi fédérale sur la protection des eaux

Lfo : Loi fédérale sur les forêts

LFSP : Loi fédérale sur la pêche

$B_{P-C}$  : Largeur de la zone post-confluence

LPN : Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage

$L_R$  : Longueur du cours d'eau principal

MNT : Modèle numérique de terrain

MP : Mesure prioritaire

$M_r$  : Ratio des moments

OACE : Ordonnance sur l'aménagement des cours d'eau

Oeaux : Ordonnance sur la protection des eaux

OFEG : Office fédéral des eaux et de la géologie

OFEV : Office fédéral de l'environnement

Opair : Ordonnance sur la protection de l'air

OPAM : Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs

OPB : Ordonnance sur la protection contre le bruit

Osites : Ordonnance sur l'assainissement des sites pollués

Osol : Ordonnance sur les atteintes portées aux sols

OTD : Ordonnance sur le traitement des déchets

PA-R3 : Plan d'Aménagement de la 3ème correction du Rhône

$Q$  : Débit liquide

$Q_1$  : Débit annuel

$Q_{100}$  : Crue centennale

$Q_{100A}$  : Crue centennale de l'affluent

$Q_{100R}$  : Crue centennale du Rhône

$Q_{1A}$  : Débit annuel de l'affluent

$Q_{1R}$  : Débit annuel du Rhône

$Q_{30}$  : Crue trentennale

$Q_{30A}$  : Crue trentennale de l'affluent

$Q_{30R}$  : Crue trentennale du Rhône

$Q_A$  : Débit liquide de l'affluent

$Q_r$  : Ratio des débits

$Q_R$  : Débit liquide du cours d'eau principal

$Q_s$  : Capacité de transport solide

$q_s$  : Débit solide

$R_h$  : Rayon hydraulique

$s$  : Rapport de la densité des sédiments sur la densité de l'eau

SIG : Système d'information géographique

UTO : Usine de traitement des ordures

$V_A$  : Vitesse de l'affluent

$VC_P$  : Coefficient de variation des profondeurs d'eau maximales

$VC_V$  : Coefficient de variation des vitesses d'écoulement

$V_{Q_{100}}$  : Volume charrié pour une crue centennale

$V_{Q_{30}}$  : Volume charrié pour une crue trentennale

$V_R$  : Vitesse du cours d'eau principal

VS-SPCR : Service de la protection contre les crues du Rhône

$\alpha$  : Angle de la confluence

$\rho$  : Densité de l'eau

$\sigma$  : Coefficient de gradation

$\sigma_P$  : Ecart-type des profondeurs d'eau

$\sigma_V$  : Ecart-type des vitesses d'écoulement

$\tau_{*,cr}$  : Contrainte de cisaillement critique

# 1. Introduction

## 1.1 Contexte de la 3<sup>ème</sup> correction du Rhône

Les travaux de 1<sup>ère</sup> (1863-1894) et 2<sup>ème</sup> (1936-1961) correction du Rhône avaient pour but d'améliorer la sécurité dans la plaine et aussi d'augmenter la surface agricole disponible. Avant la 1<sup>ère</sup> correction, le Rhône naviguait d'un côté à l'autre de la vallée dans la forme d'un fleuve en tresses. Ce développement en tresse faisait de la plaine une zone marécageuse et présentait un danger sécuritaire, avec des inondations fréquentes et un danger sanitaire lié à la présence de maladie, comme la malaria. Les opérations effectuées lors de ces corrections ont permis un développement de l'agriculture intensive, des zones industrielles et d'habitations en procédant à un endiguement du Rhône et un assèchement des zones humides (Etat du Valais, n.d.).

De nos jours, le Rhône ne remplit plus les critères attendus pour un cours d'eau de son calibre. Il souffre de plusieurs problèmes que nous allons expliciter ci-après. Tout d'abord réside un problème sécuritaire. La crue du 15 octobre 2000 a mis en avant ce danger. Avec une valeur avoisinant une crue centennale, cette dernière a recouvert plus de 1'000 hectares d'eau et de débris. Le Rhône ne permet plus le passage de telles crues. Les digues présentes sur son tracé datent au mieux de la 2<sup>ème</sup> correction. Elles sont hautes, avec la plaine qui se situe parfois 4 mètres en dessous, mais surtout vieilles et fragiles. Une grande partie de ces digues est menacée par un danger de rupture là où la capacité hydraulique est suffisante. Le danger sécuritaire est donc double avec une capacité insuffisante et un risque de rupture de digues. Actuellement, la zone inondable par une crue centennale correspondrait à une surface de 12'400 hectares, dont 3'300 en zone bâtie, là où les dégâts potentiels sont les plus importants. Une estimation de ces dégâts a été évaluée à plus de 10 milliards de francs. Dans les années futures, à cause du réchauffement climatique, il faudra s'attendre à une augmentation des précipitations sous forme de pluie et une diminution des précipitations sous forme de neige (Etat du Valais, 2016). Ces éléments doivent être pris en compte lors de la réalisation des travaux sur le Rhône. Afin de parer à ce problème, le canton du Valais utilise l'outil MINERVE (Modélisation des Intempéries de Nature du Rhône Valaisan et de leurs Effets). Ce système permet de prévoir les crues et ainsi d'optimiser le fonctionnement des barrages. Il contribue donc à la sécurité de la plaine et permettra la gestion du risque résiduel après la fin des travaux de la 3<sup>ème</sup> correction (VS-SPCR, 2015).

A ce problème sécuritaire s'ajoute un déficit écologique le long du cours d'eau. Premièrement, d'un point de vue morphologique, le Rhône est cloîtré entre 2 digues en une section trapézoïdale avec un lit figé et ne suit plus qu'un tracé morne et rectiligne avec de grandes courbes, forme donnée par les deux précédentes corrections. Pour améliorer ce manquement morphologique, il faut redonner au Rhône son espace nécessaire. Deuxièmement, le Rhône est fortement influencé dans ces débits par l'exploitation hydroélectrique, spécialement lors des variations de turbinage. Celles-ci entraînent des changements abrupts du niveau d'eau. Troisièmement, un déficit de biodiversité en son sein est à déclarer. Les faunes benthique et piscicole ont vu leurs populations drastiquement diminuer du fait de la disparition des différentes vitesses d'eau et de substrats qui constituaient la zone habitable précédemment. Le régime d'éclusées constitue aussi un problème lors de l'assèchement du lit de régime où des espèces se retrouvent bloquées à l'air libre. Un autre problème lié au régime d'éclusée est le déversement des eaux glaciaires retenues dans les barrages, phénomène augmentant fortement la turbidité de l'eau. De plus, au lieu des confluences, la présence de seuils est parfois constatée. Ces seuils empêchent la migration piscicole pour les espèces nécessitant une zone de frai hors fleuve. Un exemple de ce manquement de biodiversité est la présence de seulement 7 espèces de poissons le long du cours d'eau. Quatrièmement, les milieux riverains se trouvent déconnectés du Rhône. Cette déconnexion entre milieu terrestre et aquatique ne permet pas de connectivité latérale pourtant

nécessaire à certains organismes pour leur survie. Seulement quelques tronçons ont conservé cette liaison biologique, par exemple au travers du Bois de Finges.

Le projet de 3<sup>ème</sup> correction du Rhône s'inscrit aussi dans une ambition de développement de la plaine. En sécurisant la plaine contre les inondations, l'implantation de nouvelles zones bâties (habitations/industries) sera possible ce qui constitue un intérêt économique évident. L'augmentation de la production hydroélectrique est également possible avec la création de centrales au fil de l'eau. L'aspect social est aussi pris en compte en rendant le Rhône plus naturel et permettant la création de zones de détente, essentielles au bien-être et au tourisme.

A la vue de ces problématiques, les gouvernements valaisans et vaudois ont validé le Plan d'Aménagement de la 3<sup>ème</sup> correction du Rhône (PA-R3) en 2016 (Etat du Valais, n.d.). Ce dossier fixe l'emprise, la variante ainsi que la priorité secteurs par secteurs. Avec 160 kilomètres de cours d'eau (dont 30 en commun avec le Canton de Vaud) et 64 communes impliquées, ce projet devient le plus important projet de protection contre les crues en Suisse. Les mesures prioritaires (MP) sont estimées d'après les dégâts potentiels et les déficits sécuritaires. Dans les variantes retenues, nous retrouvons un élargissement minimal sur de grands linéaires correspondant à environ 1.5 fois la largeur actuelle du fleuve pour la sécurité. Mais également des élargissements ponctuels de 2 à 3 fois la largeur actuelle permettant d'améliorer la gestion des matériaux et apportant une plus-value environnementale avec une diversification des vitesses d'eau et pour les espèces nécessitant une grande exigence spatiale (un espace plus adapté pour certaines espèces piscicoles et benthiques). A noter que dans les lieux où un élargissement ne peut être envisagé (zones fortement bâties), un abaissement du lit est prévu. Un renforcement des digues est aussi prévu sur l'ensemble du tracé. Le projet présentera à terme une plus grande diversité avec un paysage varié et plus ouvert sur le fleuve (VS-SPCR, 2014).

En résumant, le projet veut assurer de manière durable la sécurité, l'environnement et l'aspect socio-économique de la plaine du Rhône.

La thématique du présent travail de master s'inscrit dans le cadre de 3<sup>ème</sup> correction du Rhône. Elle consiste en l'évaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne. Ces deux embouchures se trouvent dans la MP Sion. L'objectif principal est de définir une variante optimale pour ces deux embouchures, car le PA-R3 a été fourni à l'échelle 1 : 10'000 et aucune mesure détaillée d'aménagement n'a été définie pour les zones de confluences. Ce projet de master constitue donc un travail de recherche porté sur les jonctions entre le Rhône et ses affluents.

## 1.2 Caractérisation des affluents

Comme mentionné précédemment, les zones d'étude se situent en Valais central dans la région Est de la commune de Sion et correspondent à la confluence de la Lienne et du Rhône ainsi que la confluence de la Borgne et du Rhône. Pour le Rhône, la jonction avec la Lienne se situe sur sa rive droite au kilométrage 70.9 (du Lac Léman jusqu'à sa source) et la jonction avec la Borgne se trouve sur sa rive gauche au kilométrage 67.6. Le plan d'aménagement de la troisième correction a défini l'espace nécessaire à un développement durable du fleuve. Une vue en situation des zones des deux confluences est proposée à la Figure 1.



Figure 1 : Vue en situation des confluences de la Borgne et de la Lienne

Les données concernant les caractéristiques géographiques et l'hydrologie de ces deux cours d'eau sont tirées de l'Atlas Hydrologique de la Suisse (HADES, n.d.). La surface du bassin versant, la pente moyenne, l'altitude moyenne, maximale et minimale, ainsi que la couverture glaciaire de ces deux affluents sont disponibles au Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques géographiques et hydrologiques des affluents

Affluent	Surface bassin versant [km <sup>2</sup> ]	Altitude [m.s.m]			Pente moyenne [°]	Couverture glaciaire [%]	Débit annuel (Q1) [m <sup>3</sup> /s]
		Moyenne	Maximale	Minimale			
Lienne	92.5	1'914	3'207	488	22	2	4.08
Borgne	386.0	2'393	4'272	485	26	15	11.96

Nous observons des différences notables sur la surface du bassin versant ainsi que sur la couverture glaciaire. Ces dernières expliquent en partie la différence de débit entre les deux cours d'eau. La pente moyenne de ces deux affluents correspond aux valeurs des cours d'eaux qui descendent les vallées pour rejoindre le Rhône en plaine.



### Historique et description de la zone d'étude

Les divers travaux effectués sur la plaine du Rhône pour contenir les cours d'eau, gagner du terrain agricole ou encore se prévenir de maladies ont engendré sa transformation physique. La succession de diverses cartes met en lumière cette adaptation.

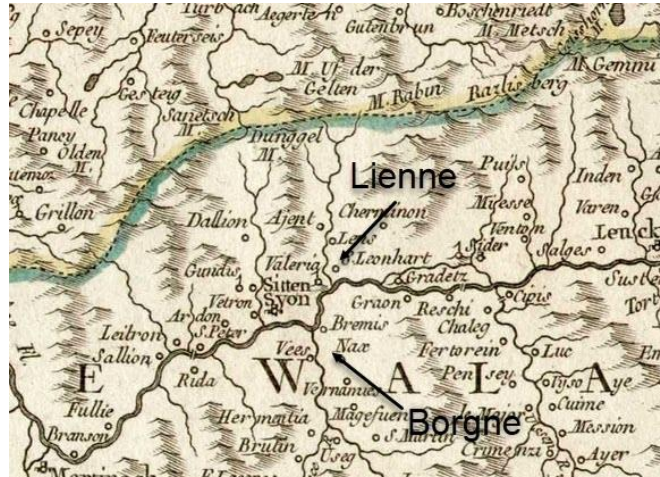


Figure 2 : Carte de 1756



Figure 3 : Carte Dufour (1844)

Ainsi, la comparaison entre la carte partielle du Valais de 1756 et celle de Dufour de 1844 démontre l'effet des travaux sur les affluents qui ont étendu leur tracé au travers de la plaine du Rhône, les poussant vers l'autre côté de la vallée. Ces aménagements ont permis le gain de terre agricole le long de la plaine du Rhône.

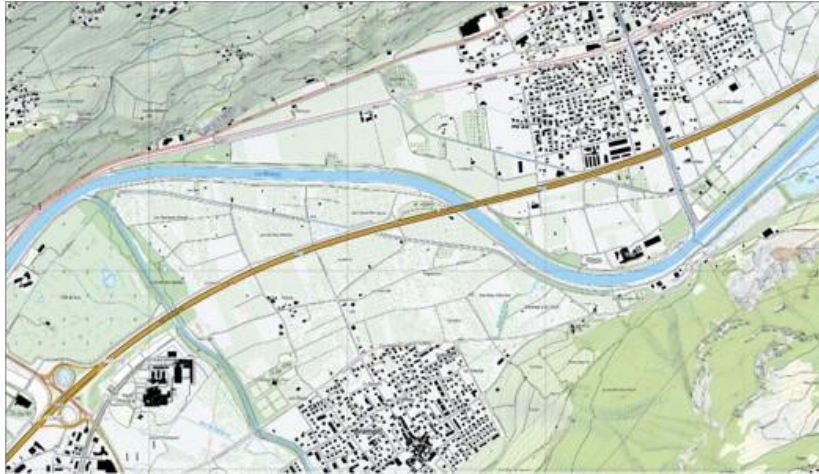


Figure 4 : Carte nationale actuelle (1:10'000)

La comparaison entre la carte de 1844 et la carte nationale actuelle (1 :10'000) démontre quant à elle l'impact de la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> correction du Rhône. Ces deux corrections ont figé le tracé du Rhône, passant d'un cours d'eau à tresses à un cours d'eau rectiligne avec de grandes courbures.

Concernant les confluences, ces dernières ont aussi été grandement impactées. D'après Bourgeois (2006), les zones de confluence peuvent être grandement améliorées d'un point de vue écomorphologique. La Figure 5 reprend le classement des affluents de la plaine du Rhône selon la somme des scores des 4 domaines qui sont la connectivité, l'écoulement, l'écomorphologie et la qualité de l'eau. La connectivité prend en compte la connectivité latérale permettant la migration piscicole par exemple. L'écoulement est évalué selon le régime hydrologique de l'affluent. La variation des débits et le transport solide peuvent être perturbés par des aménagements présents sur le tracé (gravières, barrages, ...). L'écomorphologie s'intéresse à l'impact des travaux anthropiques réalisés sur ces rivières et leurs berges dans un objectif sécuritaire ou territorial. Finalement, la qualité de l'eau considère les impacts du rejet d'eaux usées, les apports diffus dus à l'agriculture et le ruissellement sur l'état de l'eau.

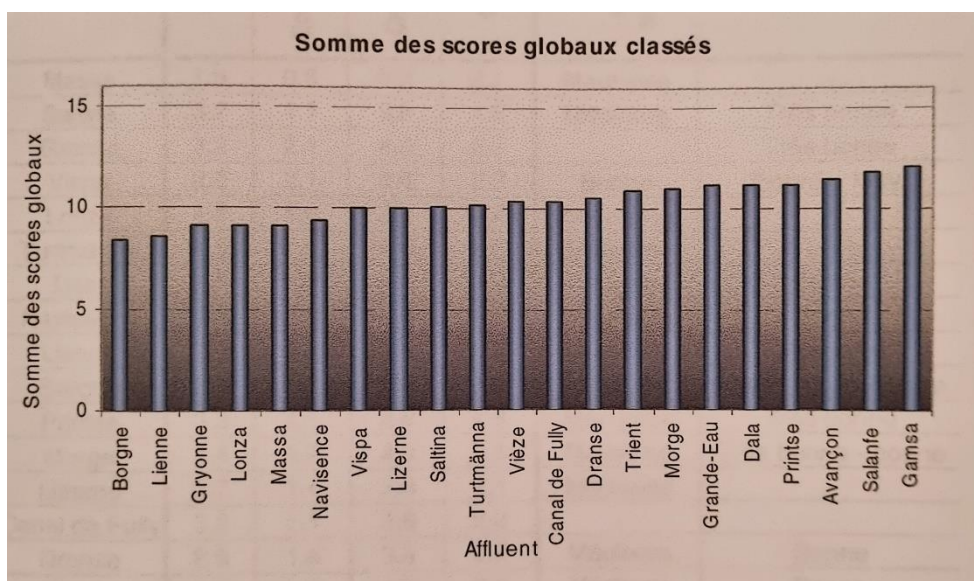


Figure 5 : Somme des scores globaux classés (Bourgeois, 2006)



Ainsi, la jonction de la Borgne et celle de la Lienne correspondent aux états les plus atteints sur les 21 affluents étudiés. Une visite effectuée sur le terrain le 8 octobre 2021 confirme cette analyse.

Pour la Lienne, il y a peu d'interaction entre l'eau et la rive due à la présence en rive gauche de cette dernière d'un mur de 2 mètres. Sur sa rive droite, nous notons à proximité du cours d'eau la présence d'arbustes qui laissent rapidement leur place à des arbres de taille moyenne. En s'intéressant à l'importance des cours d'eaux latéraux pour la reproduction de la truite et la diversité de la faune piscicole en Valais, Küttel (2001) observait peu de zones d'abris pour les poissons mais un potentiel pour les zones de frai jugé bon.



Figure 6 : Situation actuelle de l'embouchure de la Lienne et du Rhône

Pour la Borgne, il y a à nouveau peu d'interactions entre les berges et l'eau du fait des rives construites. Nous retrouvons quelques arbustes qui à l'instar de la confluence de la Lienne s'amenuisent et sont remplacés par la présence de grands arbres. La migration piscicole au travers de cette confluence est rendue impossible par la présence d'un seuil de plus de 2 mètres à proximité du Rhône.

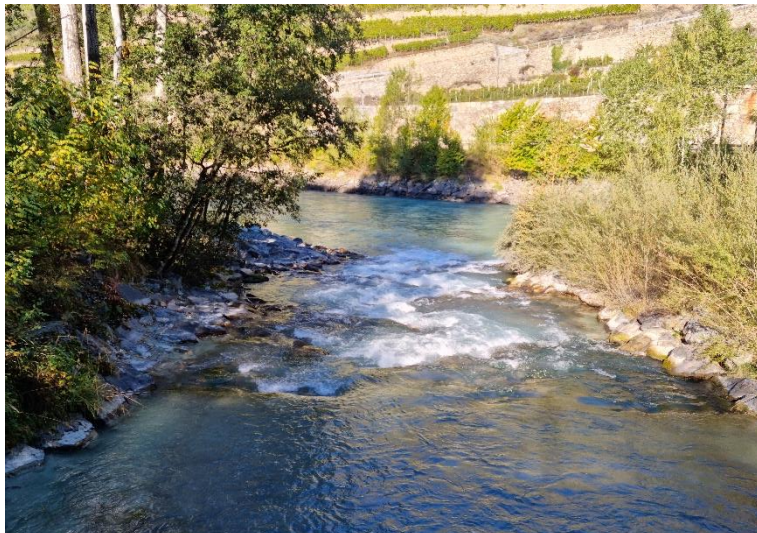


Figure 7 : Situation actuelle de l'embouchure de la Borgne et du Rhône



### 1.3 State of the art

Une embouchure, ou confluence, est la zone de rencontre entre plusieurs cours d'eau résultant en la formation d'un seul. Ces confluences jouent un rôle important dans la compréhension du mouvement de l'écoulement de l'eau et des sédiments le long du réseau fluvial (Gutierrez et al., 2014). Les configurations d'embouchure sont aussi diverses que variées, qu'elle soit naturelle ou artificielle. Cette diversité de configuration est due au fait que divers paramètres, propres à chaque cours d'eau, influencent de manière hydrodynamique et morphodynamique la confluence. Parmi ces observables, nous trouvons le débit ( $Q$ ) et les ratios de moment ( $M_r$ ), l'angle de confluence ( $\alpha$ ) ou encore la capacité de transport solide ( $Q_s$ ), par exemple (Guillén-Ludeña et al., 2017). La plupart des travaux portant sur les embouchures ont été réalisés sur des confluences de plaine et peu de travaux concernent les affluents de montagne (Leite Ribeiro et al., 2012b). Ces rivières de montagne sont généralement caractérisées par un tracé étroit et pentu qui amène au cours d'eau principal une importante charge sédimentaire alors que ce dernier procure la majeure partie du débit. Les différences notables entre ces confluences de plaine et de montagne sont au nombre de trois. Il s'agit en premier lieu d'un régime critique dans l'affluent qui transporte de grandes quantités de sédiments au cours d'eau principal, en deuxième lieu la consolidation du lit due à l'importante mixité des diamètres de grains présents dans la charge sédimentaire et finalement, la différence d'élévation entre le lit de l'affluent et celui du cours d'eau principal (Guillén-Ludeña et al., 2017).

Best (1987) a étudié l'écoulement de l'eau dans les zones de confluence. Ses travaux ont été menés dans une configuration simple avec les lits de l'affluent et du cours d'eau principal à la même hauteur, des sections rectangulaires et sans transport sédimentaire, il est parvenu aux résultats suivants. Il a pu distinguer six structures hydrodynamiques dans l'espace de confluence.

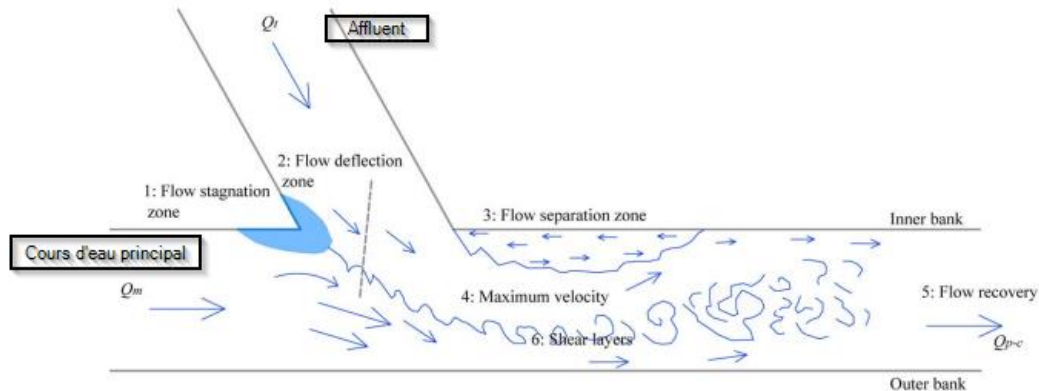


Figure 8 : Modèle descriptif de la dynamique d'écoulement dans une zone de confluence avec des lits concordants (Best, 1997)

1. Une zone de stagnation à l'amont de la zone de confluence. Une augmentation de pression et d'hauteur d'eau ainsi qu'une diminution de pression et de contrainte de cisaillement induisent sa création à la rencontre des deux cours d'eau.
2. Une zone de déflexion du cours d'eau principal due à l'arrivée de l'affluent, changeant son orientation.
3. Une zone de séparation avec une recirculation possible de l'eau à son intérieur, conduite par le détachement de l'écoulement le long de la rive intérieure à la sortie de la confluence (Best and Reid, 1984). Cette zone influence grandement l'écoulement car elle réduit la section disponible pour les débits accumulés de l'affluent et du cours d'eau principal. C'est en son

intérieur que la sédimentation est favorisée du fait de la recirculation et de la réduction de pression.

4. Une zone de vitesses maximales est induite par la réduction de section causée par la zone de séparation, ainsi que par l'apport de l'affluent et du cours d'eau principal en eau (Biron, Best and Roy, 2016).
5. Une zone de recouvrement où l'écoulement reprend un régime classique après la turbulence engendrée par la rencontre des deux cours d'eau.
6. Une zone de cisaillement, engendrée le long de l'espace de contact entre la zone de séparation et la zone de vitesses maximales. Des couches de cisaillement sont formées et caractérisées par de hautes intensités de turbulence et de cisaillement. La présence de structures d'écoulement organisées est aussi dénotée (Biron et al., 1993 ; Rhoads and Sukhodolov, 2004).

Dans ces zones de confluences, nous retrouvons un écoulement tri-dimensionnel qui est souvent caractérisé par la présence de cellules à flux hélicoïdal. Le sujet de leur nature et caractéristiques a été largement débattu (Rhoads and Kenworthy, 1995 ; Bradbrook et al., 2000 ; Lane et al., 2000 ; Biron and Lane, 2008). La présence ou absence de ces cellules dépend des caractéristiques de la confluence (Leite Ribeiro et al., 2012b).

D'un point de vue morphologique, deux structures sont présentes. Une zone d'affouillement en aval de la confluence vers la rive extérieure (Biron et al., 2002) ainsi que des bancs d'alluvions le long de la rive intérieure à nouveau en aval de la confluence. Ces derniers réduisent la section d'écoulement, entraînant une accélération de l'eau le long du banc et poussant le flux vers la berge extérieure, engendrant ainsi la formation de la zone d'affouillement. Un premier banc est formé juste à la sortie de la confluence et induit la recirculation de l'écoulement juste derrière lui, permettant le dépôt de sédiments pour créer un deuxième banc en aval de ce dernier (Rhoads and Kenworthy, 1995).

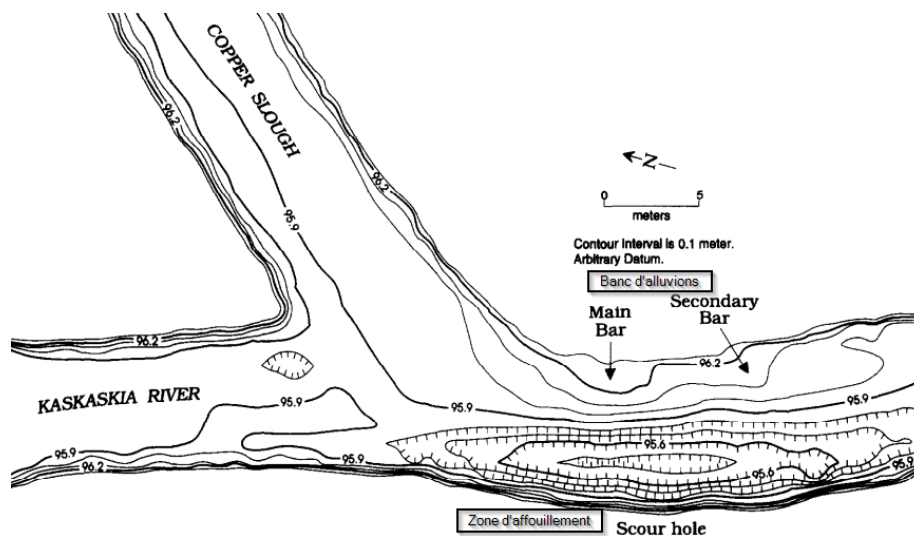


Figure 9 : Structure morphologique post-confluence (Rhoads and Kenworthy, 1995)

Par la suite, Leite Ribeiro (Leite Ribeiro et al., 2012b ; Leite Ribeiro et al., 2012c ; Leite Ribeiro et al., 2015) et Guillén-Ludeña (Guillén-Ludeña et al., 2015a ; Guillén-Ludeña et al., 2016 ; Guillén-Ludeña et al., 2017) se sont spécialement concentrés sur les confluences de montagne. Ces différents travaux ont permis une meilleure compréhension des confluences situées dans le Rhône à l'amont du Léman, avec un affluent pentu chargé de sédiments joignant le cours d'eau principal de faible pente.

## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

L'expérience proposée par Leite Ribeiro (2012b) est définie comme suit : la confluence est schématisée selon un cours d'eau principal de 8.5 m de long et de 0.5 m de largeur et un affluent de 4.9 m de long et 0.15 m de largeur. Les rives sont des murs verticaux et la jonction entre les deux cours d'eau se déroule à 3.60 m de l'entrée du cours d'eau principal avec un angle ( $\alpha$ ) de 90°. Le ratio des largeurs de l'affluent et du cours d'eau principal ( $B_A/B_R$ ) est de 0.3 et celui du cours d'eau principal et la largeur post-confluence ( $B_R/B_{P-C}$ ) est de l'unité. Concernant les débits de l'expérience, le débit de l'affluent est de 2 l/s et celui du cours d'eau principal de 18 l/s, conduisant à un ratio de débit ( $Q_A/Q_R$ ) de 0.11. Le ratio des moments ( $M_T = \rho Q_A V_A / \rho Q_R V_R$ ) est de 0.2. Le transport de sédiments est seulement effectué par l'affluent avec un débit solide de 0.3 kg/min avec une pente comprise de 0.05 % et une granulométrie reprenant les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.8$  mm,  $d_m = 2.3$  mm,  $d_{90} = 5.7$  mm et un coefficient de gradation ( $d_{84}/d_{50} + d_{50}/d_{16}$ )  $\sigma = 4.15$ . A noter que la granulométrie du fond des deux cours d'eau reprend ces valeurs. L'arrêt de la simulation physique est effectué 23 h après le début de l'expérience, lorsque les conditions d'équilibre ont été atteintes.

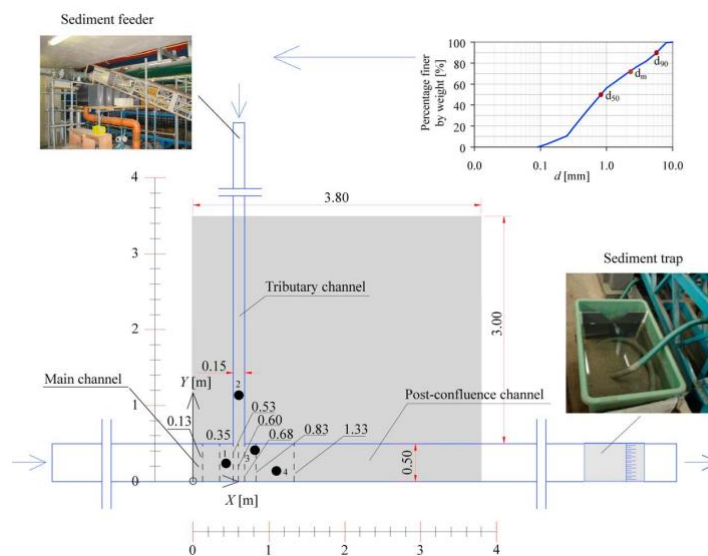


Figure 10 : Configuration de l'expérience proposée par Leite Ribeiro (2012b)

Cette expérience met en lumière différents processus hydro-morpho-sédimentaires, discutés par Leite Ribeiro (2012b). Un modèle conceptuel reprenant les résultats observés est disponible à la Figure 11.

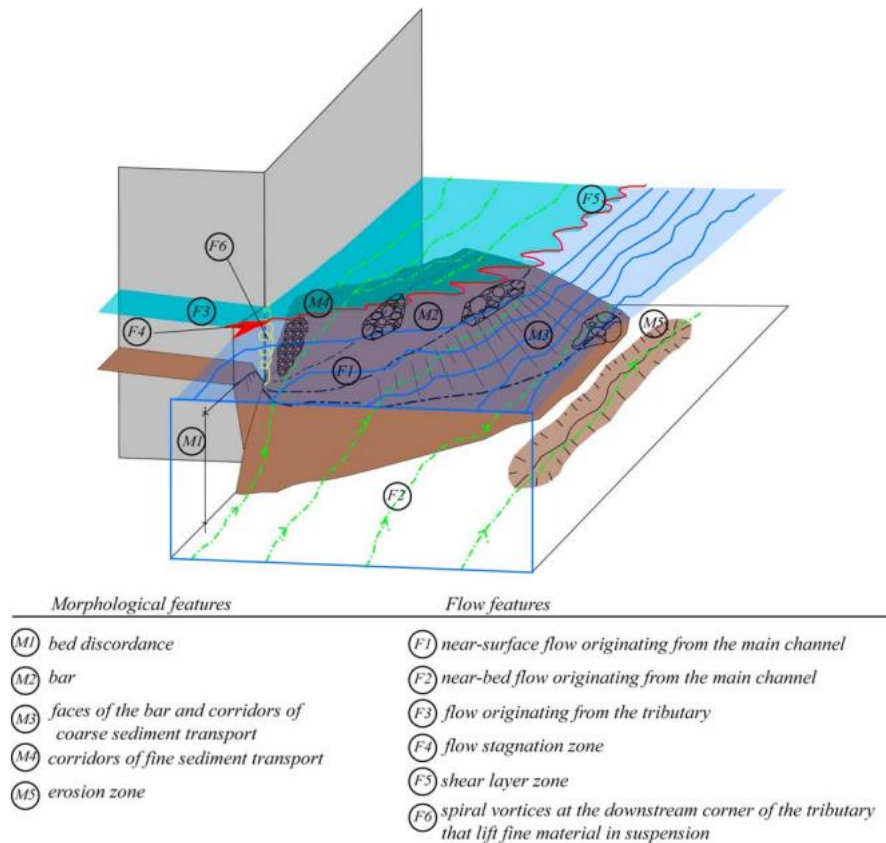


Figure 11 : Modèle conceptuel des processus hydro-morpho-sédimentaires proposé par Leite Ribeiro (2012b)

La première caractéristique décrite est la différence d'élévation entre le lit de l'affluent et celui du cours d'eau principal (M1). Ce mécanisme est en premier lieu attribué à la différence de débits et de transport sédimentaire des deux cours d'eau (Leite Ribeiro et al., 2012b). Cette observation illustre les propos de Kennedy (1984) qui avançait que la différence d'élévation des deux lits étaient plutôt induite par les conditions physiographiques des deux bassins versants plutôt que la dynamique à l'intérieur de la confluence elle-même. Les différences notables concernant l'écoulement entre l'expérience proposée par Best (1987) et celle de Leite Ribeiro (2012b) sont :

- L'absence de la zone de séparation le long de la rive intérieure à la sortie de la confluence. La différence d'élévation entre les deux lits permet à l'eau provenant de la partie profonde du cours d'eau principal de se déplacer sans entrave vers l'aval, empêchant ainsi la recirculation de l'eau (Leite Ribeiro et al., 2012b).
- L'absence de cellules à flux hélicoïdal. L'augmentation de la différence d'élévation entre les lits réduit l'effet de frottement du fond qui influence fortement la formation de cellules à flux hélicoïdal (Blanckaert and de Vriend, 2004).

Du point de vue morphologique, nous retrouvons la formation d'un banc le long de la rive (M2) et un faible affouillement vers la rive extérieure post-confluence (M5). La différence d'élévation entre les deux lits est l'observation morphologique la plus notable avec les conséquences qu'elle engendre.

L'interaction entre la diversité des débits et des charges sédimentaires entre les deux cours d'eau semble être un facteur important régissant la morphologie de la confluence avec l'apparition des bancs et de la zone d'affouillement ainsi que leur emplacement, de même pour la différence d'élévation entre les deux lits. Le transport sédimentaire est surtout présent le long du banc et influencé par

l'écoulement profond du cours d'eau principal. L'espace préférentiel de transport concorde avec la zone de cisaillement, engendré par la connexion des deux cours d'eau (Leite Ribeiro et al., 2012b).

Guillén-Ludeña (2015b) a, par la suite, voulu poursuivre l'expérience décrite précédemment, cette fois-ci en ajoutant du transport sédimentaire dans le cours d'eau principal. En reprenant la même disposition d'expérimentation ( $L_R = 8.5\text{m}$ ,  $L_A = 4.9\text{m}$ ,  $B_R = 0.5\text{m}$ ,  $B_A = 0.15\text{m}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ), il a cependant modifié les débits et les caractéristiques granulométriques qui sont repris au Tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques de l'expérience de Guillén-Ludeña (2015)

	$\sigma$ [-]	$d_{30}$ [mm]	$d_{50}$ [mm]	$d_{65}$ [mm]	$d_{90}$ [mm]	Q [l/s]	$Q_s$ [kg/min]	$Q_r$ [-]	$M_r$ [-]
Affluent	4.51	0.4	0.8	1.4	3.0	3.0	0.3	0.11	0.16
Cours d'eau principal	3.15	0.4	0.8	2.3	5.7	27.0	0.5		

L'augmentation des débits a été effectuée dans l'optique de permettre le transport sédimentaire dans le cours d'eau principal. Nous dénotons aussi que le ratio des débits est identique au modèle de Leite Ribeiro (2012b) tandis que le ratio des moments a diminué du fait de l'élévation des débits.

Les différences notables entre les deux expériences sont les suivantes :

- L'équilibre est atteint plus rapidement (23h pour Leite Ribeiro, 14h pour Guillén-Ludeña).
- Une zone d'affouillement plus profonde vers la rive extérieure.
- Un banc plus étroit et plus élevé le long de la rive intérieure.

Ces changements sont liés à l'augmentation des débits qui, dans la même configuration que l'expérience précédente, induisent des vitesses plus élevées et une accélération plus forte dans la zone de confluence. De plus, l'ajout de transport solide dans le cours d'eau principal maintient constante la proportion de particules fines dans les sédiments du lit, et celle-ci réduit la contrainte de cisaillement critique pour le mouvement des grains, favorisant ainsi l'érosion du lit. (Guillén-Ludeña et al., 2015a).

Le paragraphe suivant s'intéresse à un autre projet portant sur l'influence des ratios de moments ( $M_r$ ) et de débits ( $Q_r$ ), de l'angle de confluence ( $\alpha$ ), du coefficient de gradation des sédiments ( $\sigma$ ), du ratio des largeurs entre l'affluent et le cours d'eau principal ( $B_A/B_R$ ), ainsi que l'élargissement de l'affluent (Guillén-Ludeña et al., 2015b ; Guillén-Ludeña et al., 2016). Pour ce faire, 24 tests expérimentaux ont été réalisés en variant les valeurs des paramètres d'intérêt. Trois ratios de débits ont été analysés avec des valeurs de  $Q_r = 0.11, 0.15$  et  $0.23$ . Les angles de confluence proposés sont de  $70^\circ$  et  $90^\circ$ . Le coefficient de gradation reprend les valeurs du Tableau 2 pour une partie des simulations puis est réduit à une valeur de 1.40. Le ratio des largeurs de l'affluent et le cours d'eau principal varie de 0.15 à 0.30. La valeur de 0.15 est obtenue en doublant la largeur du cours d'eau principal. Finalement, la présence d'élargissement correspond à une augmentation de la largeur de l'affluent de 0.15 m à 0.45 m, sur une longueur de 0.60 m juste avant la confluence. Les résultats des expériences ont permis de constater que :

- L'augmentation du ratio des débits entraîne une augmentation de l'érosion et une diminution de la déposition dans le cours d'eau principal.
- L'angle de confluence joue un rôle dans le type de régime que l'affluent va adopter. Pour un angle de  $90^\circ$ , le régime est supercritique alors que pour un angle de  $70^\circ$ , le régime est subcritique et le lit de l'affluent pénètre plus loin dans le cours d'eau principal.
- Le colmatage du lit est supprimé pour des valeurs faibles du coefficient de gradation. La formation de dunes dans le lit des deux cours d'eau est observée pour ces faibles valeurs.

- L'élargissement de l'affluent conduit à de plus grandes zones d'affouillement et de déposition dans le cours d'eau principal, augmentant sa diversité morphologique.
- L'augmentation du ratio des largeurs induit une plus profonde zone d'affouillement due à une augmentation de l'écoulement entre le banc à proximité de la rive intérieure et la rive extérieure du cours d'eau principal.

Ce chapitre permet de mettre en lumière les différents processus que nous retrouvons à l'intérieur des zones de confluences.

#### 1.4 Questions de recherches

Le but principal de ce projet de master réside en la réponse à trois questions principales listées ci-dessous :

1. Quels sont les rôles de régulateur de dynamique du Rhône et de ses affluents ? En quoi la Borgne est-elle différente de la Lienne vis-à-vis du Rhône ?

Cette première question permettra de mettre en lumière les différents rôles que le Rhône et l'affluent endossent et de déterminer leur impact respectif dans la zone de confluence.

2. En fonction de la variante choisie, quel type de dynamique naturelle pourra se développer ? En quoi le cas de la Borgne est-il similaire / différent de celui de la Lienne ?

Cette seconde question définira la dynamique naturelle de l'eau à moyen terme, à l'intérieur de la zone de confluence, afin d'avoir une vue d'ensemble du tracé que prendra le cours d'eau.

3. Quel est l'impact du choix de la variante de projet sur le développement morphodynamique des embouchures ? Quelle variante est plus adaptée en fonction du régime de charriage de l'affluent ?

Cette troisième et dernière question relèvera les différences notables que les diverses variantes proposent. Elle permettra dès lors une comparaison entre ces dernières.

#### 1.5 Méthodologie

La méthode de travail employée est proposée comme suit. Dans un premier temps, une recherche bibliographique est établie. Celle-ci sert de base théorique pour ce projet et permet une découverte du fonctionnement des zones de confluences, de leur importance dans le réseau fluvial, des mécanismes physiques qu'ils s'y passent, ainsi que les différents travaux déjà réalisés en matière de confluence. Cette recherche bibliographique aboutira sur une modélisation de plusieurs variantes, présentant chacune des spécificités. Dans un second temps, les modélisations en 3D des variantes sont réalisées. Celles-ci sont élaborées à l'aide du logiciel ArcGIS Pro d'Esri qui permet une visualisation en 3D des différents aménagements prévus sur les berges, ainsi que du tracé défini pour l'affluent et le Rhône. Ces variantes d'aménagements, ayant des coordonnées spatiales dans les trois dimensions, serviront à la création d'un modèle numérique de terrain (MNT), propre à chacune d'elles. Ce dernier permettra l'élaboration d'un maillage sur le logiciel Surface-water Modelling System. d'Aquaveo. Par la suite, ce maillage est implanté, avec les données hydrologiques et sédimentaires, dans le logiciel de modélisation hydro-morphodynamique Basement du Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich. Ce programme permet le

calcul de divers paramètres tels que la vitesse, la hauteur d'eau, le transport sédimentaire au travers d'équations d'hydrodynamique et de morphodynamique (Vanzo et al., 2021). Finalement, la visualisation des résultats produits se déroule sur le logiciel SIG en libre accès Qgis.

Afin de répondre aux questions posées dans le chapitre précédent, la méthodologie est la suivante. Tout d'abord, une concomitance de crues est simulée sur les différentes variantes avec du transport solide. La modélisation débute avec une crue de temps de retour de 100 ans ( $Q_{100R}$ ) pour le Rhône et une crue de temps de retour de 30 ans pour l'affluent ( $Q_{30A}$ ). Elle se poursuit par une crue de temps de retour de 30 ans pour le Rhône ( $Q_{30R}$ ) et une crue de temps de retour de 100 ans pour l'affluent ( $Q_{100A}$ ). Ce cycle est répété deux fois ( $Q_{100R}/Q_{30A} - Q_{30R}/Q_{100A} - Q_{100R}/Q_{30A} - Q_{30R}/Q_{100A}$ ) et se déroule sur une durée d'environ 200 heures. L'effet du transport sédimentaire modifie le fond des cours d'eaux avec des zones d'érosion et de déposition. Ce fond modifié est ensuite utilisé pour créer un nouveau maillage. Ce dernier sert de base pour la modélisation d'une crue annuelle du Rhône ( $Q_{1R}$ ) et de l'affluent ( $Q_{1A}$ ) d'une durée de 5 heures. La crue annuelle est utilisée afin d'avoir une vue d'ensemble de la zone de confluence lors d'un écoulement stationnaire. Les résultats de ces deux modélisations permettent la comparaison entre les différentes variantes au travers d'une matrice comparative (présentée au chapitre 6) se basant sur des indicateurs hydrauliques et morphodynamiques. La démarche présentée permettra de répondre aux interrogations suscitées par ce projet.



## 2. Type d'aménagements d'embouchure

### 2.1 Buts de revitalisation des embouchures

Les aménagements réalisés sur les cours d'eau ces siècles passés, voire décennies, ont fortement impacté la dynamique naturelle de ces derniers. Les travaux exécutés sur ces rivières dans un but de sécurité ou de gain de territoire les ont largement appauvris, écologiquement parlant. Seulement 10 % des fleuves les plus importants de la région des Alpes sont dans un état quasi-naturel (Rohde et al., 2005). Le Rhône et ses confluences ne font, bien entendu, pas exception à la règle. Les travaux anthropiques ont artificialisé le lit et les berges des cours d'eau, conduisant à une perte de biodiversité. Dans l'optique d'une gestion des crues optimale et pour retrouver une dynamique naturelle, il est nécessaire de prendre en compte l'aspect environnemental pour assurer un développement durable du cours d'eau.

Les zones de confluence sont le point de rencontre entre deux cours d'eau pouvant présenter des différences autant bien physiques que chimiques. La rencontre des caractéristiques diverses des deux cours d'eaux tels que le substrat, les débits, la charge sédimentaire et la morphologie fait de ces zones un lieu d'une extrême hétérogénéité, constituant un habitat unique, nullement trouvé ailleurs dans le système fluvial. La création et la destruction des habitats en fonction des crues font de ces embouchures et des cours d'eau en général, des espaces en constante évolution. Ces zones remplissent d'importantes fonctions écosystémiques en structurant le cours d'eau principal, offrant des refuges locaux et en diversifiant le réseau fluvial (Rice et al., 2008).

Les confluences jouent un rôle important dans la connectivité du réseau fluvial. Hydrauliquement et écologiquement, elles sont des lieux extrêmement influents. Le point de vue hydraulique a été abordé lors du chapitre précédent. D'un point de vue écologique, elles sont une zone charnière pour la connectivité latérale et longitudinale, mais aussi pour l'approvisionnement en substrat, nécessaires aux populations aquatiques. La connectivité latérale désigne l'interactivité entre les habitats aquatiques et terrestres, entre le cours d'eau et ses rives, ses bancs. Cette zone est particulièrement importante pour les organismes dont les stades de vie nécessitent différents habitats comme les amphibiens, les arthropodes ou encore les insectes aquatiques. Une interruption de cette connectivité entraîne également des impacts négatifs aussi bien pour les espèces prédatrices (poissons, oiseaux) que pour celles s'alimentant de la végétation des berges. La végétation en bordure de cours d'eau offre aussi un effet de régulateur de température, en apportant de l'ombre sur des zones du tracé. La connectivité longitudinale quant à elle s'intéresse aux échanges entre l'amont et l'aval, donc entre le cours d'eau principal et ses affluents dans notre cas. Une continuité longitudinale maintenue permet la diffusion de divers groupes d'organismes tel que les poissons avec la migration piscicole ou les plantes avec la dispersion de leurs graines. Elle assure aussi la survie de certaines espèces lors de crue à l'intérieur d'un cours d'eau en permettant le déplacement temporaire des populations dans l'autre cours d'eau, non-sujet à la crue. La connectivité longitudinale est donc essentielle pour le renouvellement des populations et assure un flux génétique entre ces dernières (Werth et al., 2012). A noter aussi que les zones de confluences ont leur impact paysager. Elles sont facilement repérables au sein du système fluvial et lorsque leur état est conservé ou restauré, elles forment des zones de détente appréciées (Leite Ribeiro et al., 2012a). L'état actuel des confluences de la Borgne et la Lienne comme présenté au chapitre 1.1 ne permet plus ces connectivités. En effet, la présence du seuil à l'amont de la confluence empêche la connectivité longitudinale tandis que les digues présentes le long du tracé des deux affluents réduisent fortement la connectivité latérale.

Pour parvenir à une dynamique plus naturelle de ces zones de confluences, le concept de revitalisation vise à redonner au cours d'eau l'espace dont il a besoin afin de retrouver la faune et flore diversifiées



qui s'y trouvaient à l'état naturel. Le tout sans impacter la sécurité contre les crues. Un critère essentiel à la réussite écologique d'un projet de revitalisation est la conservation ou restauration des connectivités latérale et longitudinale (Lake et al., 2007). Dans cette optique, une expérience sur l'impact d'un élargissement de l'affluent dans la zone de confluence a été effectuée (Leite Ribeiro et al, 2015). La configuration de référence de l'expérience reprend les caractéristiques schématisées à la Figure 10. Un affluent de 0.15 m de large et 4.9 m de longueur et un cours d'eau principal de 0.5 m de large et de 8.5 m de long, connectés à un angle de 90°, à 3.6 m du début du cours d'eau principal. Trois ratios de débits ont été étudiés et leur valeur sont de  $Q_r = 0.11, 0.15$  et  $0.23$ , en ayant toujours le même débit dans la zone post-confluence. La charge sédimentaire est de 0.3 kg/min et est transportée seulement par l'affluent. S'agissant de l'élargissement, trois scénarios différents ont été analysés :

- Un petit élargissement : la largeur de l'affluent est doublée à 0.3 m sur une longueur de 0.45 m, juste à l'amont de la confluence. ( $L_E = 3 * B_A$  et  $B_E = 2 * B_A$ )
- Un élargissement moyen : la largeur de l'affluent passe à 0.45 m sur une longueur de 0.45 m. ( $L_E = 3 * B_A$  et  $B_E = 3 * B_A$ )
- Un grand élargissement : la largeur de l'affluent est de 0.45 m sur une longueur de 0.60 m. ( $L_E = 4 * B_A$  et  $B_E = 3 * B_A$ )

Le choix de la configuration des confluences est basé sur deux critères. En premier, l'élargissement de l'affluent doit exercer une influence d'élargissement sur le cours d'eau principal, sans modifier les processus de l'affluent et de la zone de confluence. En deuxième, si l'élargissement de l'affluent se déroule sur une trop longue distance, l'écoulement de ce dernier s'adapterait le long du tracé et rencontrerait le cours d'eau principal de manière symétrique. Ce critère permet de garantir l'interaction entre l'écoulement de l'affluent élargi et celui du cours d'eau principal.

Les figures suivantes présentent les résultats de ces différents sets d'expériences.

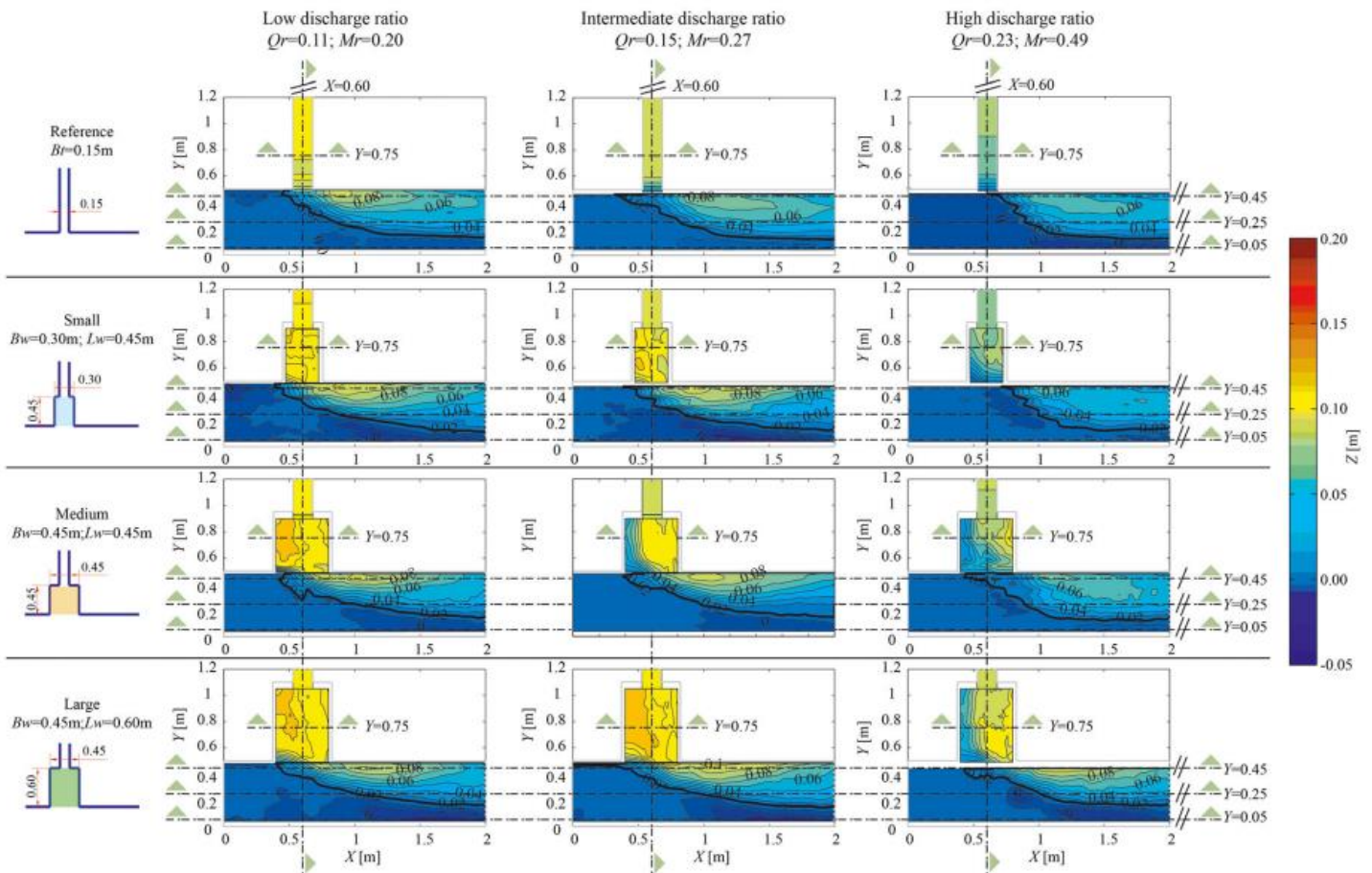


Figure 12 : Différentes configurations d'élargissement pour l'affluent et résultat de la modification du lit (Leite Ribeiro et al., 2015)

La visualisation des résultats permet les conclusions suivantes. L'augmentation des ratios de débits élève le niveau d'eau dans l'affluent, réduisant ainsi la différence d'élévation entre le lit de l'affluent et celui du cours d'eau principal. Cette diminution de discordance limite les processus hydro-morpho-sédimentaires, en abaissant la hauteur du banc rattaché à la rive intérieure à la sortie de la confluence ainsi qu'en réduisant la zone d'affouillement en rive extérieure. Dans la zone de post-confluence, les principales caractéristiques morphologiques et d'écoulement sont qualitativement similaires, car cet espace est prioritairement défini par le débit et la charge sédimentaire qui sont les mêmes pour toutes les expériences. L'impact morphologique de l'élargissement est limité à la portion de l'affluent élargi et à la zone de confluence, sans affecter la partie amont de l'affluent.

## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

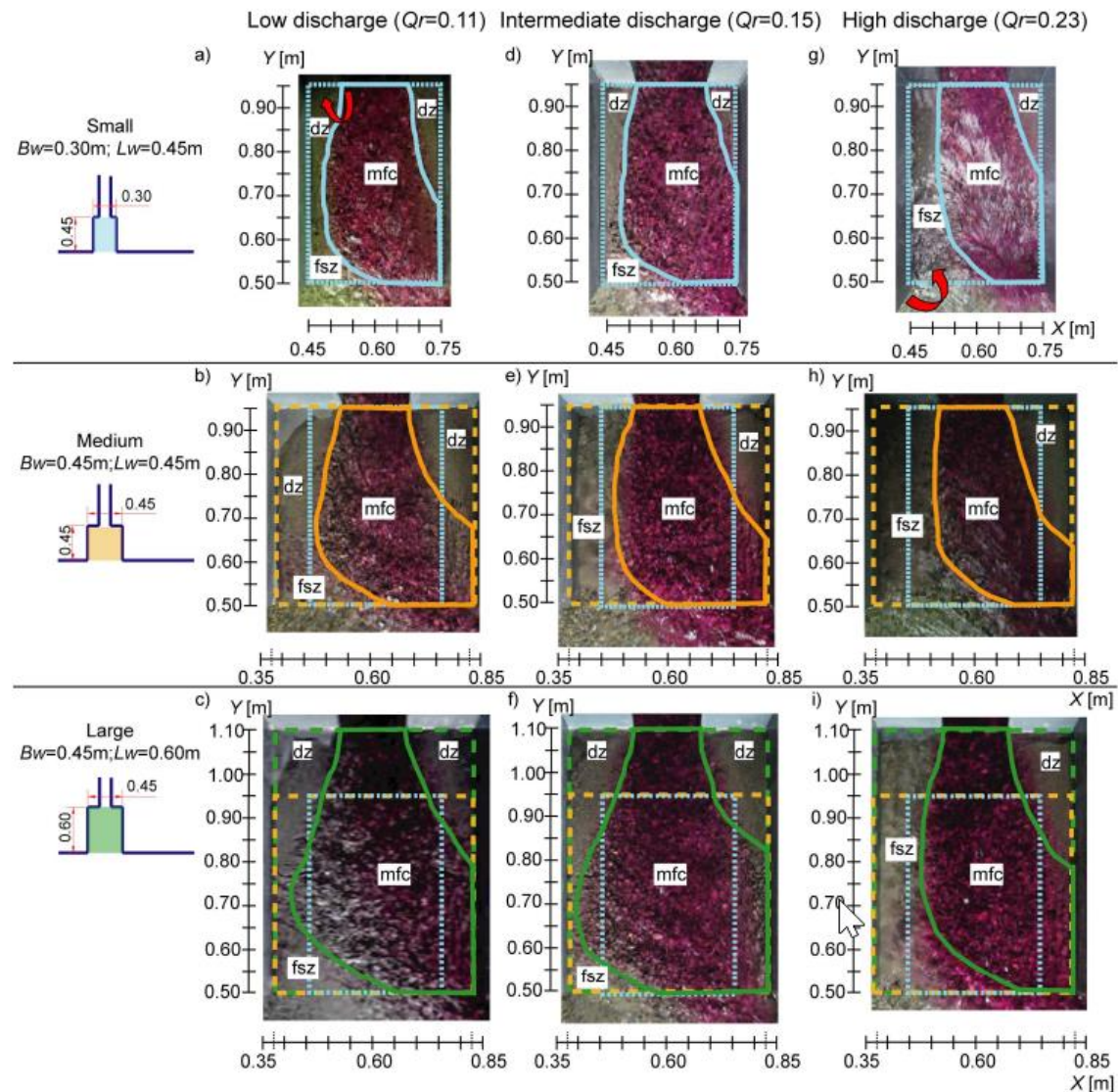


Figure 13 : Visualisation de l'écoulement grâce à l'ajout d'encre. mfc correspond à l'écoulement préférentiel, dz aux zones sèches et fsz aux zones de stagnation

En entrant dans la zone élargie, l'écoulement de l'affluent s'étend et des zones sèches et de stagnation se forment à sa proximité. En entrant dans la zone de confluence, cet écoulement est rétréci et dévié vers l'aval en raison de la présence d'une zone de stagnation, générée par la rencontre entre les flux du cours d'eau principal et de l'affluent. Le chenal principal de l'affluent est caractérisé par une élévation de son lit, les zones sèches par des hauteurs d'eau faibles et la zone de stagnation par des vitesses faibles. Ces trois zones ont leur taille et leur location définies par le ratio de débit et la configuration de l'élargissement. Le fait de retrouver ces trois espaces différents dans la confluence offre des habitats divers pour de nombreuses espèces, habitats non retrouvés dans le cas de référence. De plus, l'impact de l'élargissement n'affecte en rien la protection contre les crues, car les hauteurs d'eau présentes dans la zone n'augmentent aucunement. Un élargissement de l'affluent offre donc la possibilité d'offrir un habitat plus diversifié, sans impacter la sécurité (Leite Ribeiro et al., 2015).

## 2.2 Cadre légal

La 3<sup>ème</sup> correction du Rhône s'inscrit comme le plus grand projet de protection contre les crues de Suisse (Etat du Valais, n.d.). Pour parvenir aux objectifs escomptés sans dépasser le cadre légal, il faut s'intéresser à ce dernier. Pour les projets d'une telle ampleur, la liste de lois et d'ordonnances rentrant en vigueur est abondante. Le présent chapitre expose dans les grandes lignes la législation relative à un projet de cette importance.

D'un point de vue fédéral, la loi définissant le mieux les objectifs de la 3<sup>ème</sup> correction du Rhône est la Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau (LACE du 21 juin 1991). Cette dernière fixe comme objectif la protection des biens et personnes contre les dégâts liés aux crues (inondations, érosions, alluvionnements). L'objectif écologique du Rhône est assuré par l'art. 4 al. 2 qui stipule :

« Lors d'interventions dans les eaux, leur tracé naturel doit être autant que possible respecté ou, à défaut, reconstitué. Les eaux et l'espace réservé aux eaux doivent être aménagés de façon à ce que :

- a) elles puissent accueillir une faune et une flore diversifiées,
- b) les interactions entre eaux superficielles et eaux souterraines soient maintenues autant que possible,
- c) une végétation adaptée à la station puisse croître sur les rives. »

Avec une exception pouvant être faite dans les zones bâties, où les aménagements ne peuvent être réalisés sans la destruction des structures existantes. Cette loi fixe entre autres la stratégie d'intervention se basant sur l'analyse des dangers, la distinction des objectifs de protection, l'entretien, l'aménagement territorial, l'exécution des mesures d'aménagements nécessaires et la limitation des risques résiduels.

A celle-ci s'ajoute l'Ordonnance sur l'aménagement des cours d'eau (OACE du 2 novembre 1994) qui fixe les prestations financières de la Confédération, la définition des zones dangereuses par les cantons et la prise en compte de l'espace réservé aux eaux dans leurs plans directeurs et plans d'affectation.

L'espace réservé aux eaux est défini dans la Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux du 24 janvier 1991). Cet espace est déterminé par les cantons afin de garantir la fonction naturelle des cours d'eau, la protection contre les crues et son utilisation. Dans l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux du 28 octobre 1998), cet espace est déterminé ainsi que son utilisation. La Figure 14 reprend la méthode d'évaluation de l'espace nécessaire au cours d'eau en fonction de la largeur naturelle du fond du lit. Elle propose deux largeurs de rive pour parvenir soit à un maintien de la biodiversité, soit au maintien de ses fonctions écologiques et de la protection contre les crues. Le maintien de la biodiversité demande davantage d'espace pour favoriser le développement et la conservation de différentes espèces, faune et flore confondus (DTAP, 2019).

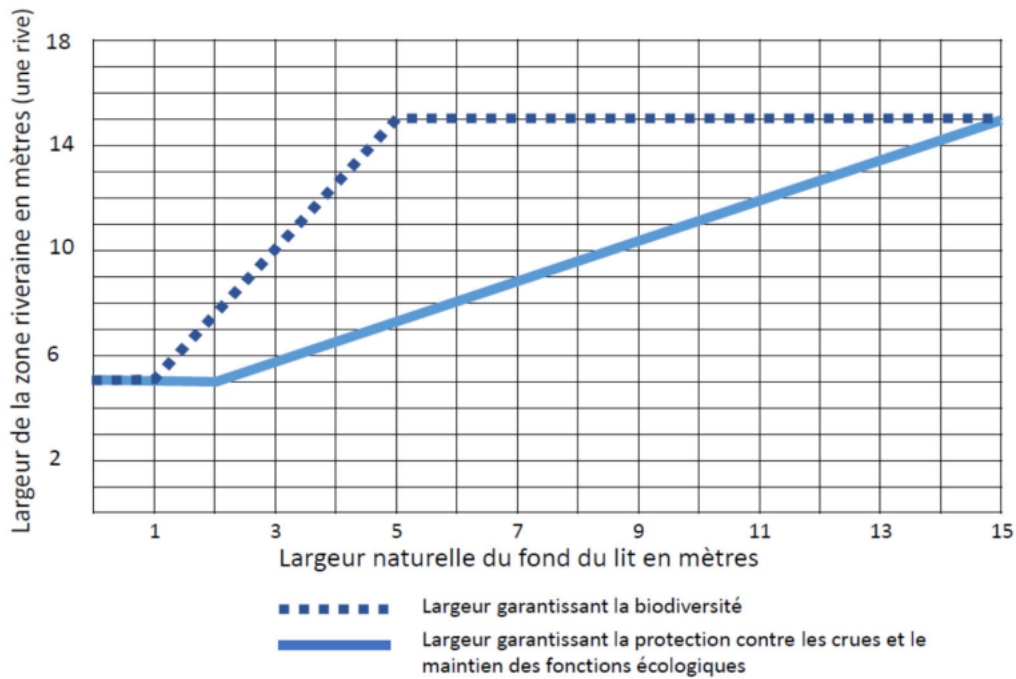


Figure 14 : Graphique permettant de définir la largeur de la zone riveraine en fonction de la largeur naturelle du fond du lit des cours d'eau (DTAP, 2019)

Cet espace de liberté était déjà mentionné quelques années auparavant afin de permettre au cours d'eau de remplir ses fonctions de dynamique fluviale et de dynamique écologique. Une réduction de cet espace de liberté peut entraîner des conséquences importantes sur l'hydrologie (augmentation des pointes de crues), sur l'hydraulique (changement du régime de transport solide) et sur l'écologie (assèchement de la forêt alluviale remplacée par des espèces à bois durs, arrêt du processus de rajeunissement des formes alluviales et de leur végétation). Ces effets entraînent une perte de biodiversité du fait de l'homogénéité des milieux (Malavoi and Souchon, 1996).

Les travaux projetés de la 3<sup>ème</sup> correction du Rhône entraînent une conséquence sur la surface forestière en abord du fleuve. L'art. 7 al. 1 de la Loi fédérale sur les forêts (LFo du 4 octobre 1991) que : « Tout défrichement doit être compensé en nature dans la même région, avec des essences adaptées à la station ». L'art. 7 al. 3b de cette même loi permet toutefois de : « [...] renoncer à la compensation du défrichement pour assurer la protection contre les crues et la revitalisation des cours d'eaux ». Un bilan forestier doit toutefois être établi afin de déterminer l'impact du projet sur l'aire forestière.

D'autres lois fédérales entrent en compte comme la Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT du 22 juin 1979) pour l'expropriation de parcelles nécessaires à l'aménagement du Rhône par exemple, la Loi fédérale sur la pêche (LFSP du 21 juin 1991) pour préserver et accroître la diversité naturelle des organismes et protéger leur biotope, on encore la Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage (LPN du 1<sup>er</sup> juillet 1966) pour protéger l'aspect caractéristique du paysage et assurer la protection de la faune et de la flore. A cela s'ajoutent des ordonnances fédérales se préoccupant de la phase de travaux du projet. Comme illustration, l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair du 16 décembre 1985), l'Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB du 15 décembre 1986), l'Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD du 10 décembre 1990), l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol du 1<sup>er</sup> juillet 1998), l'Ordonnance sur l'assainissement des sites pollués (OSites du 26 août 1998) ou encore l'Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM du 27 février 1991) peuvent être citées. L'application de ces différentes lois et ordonnances est détaillé dans les Directives sur la protection contre les cours d'eau (OFEG, 2001).



Ces lois fédérales sont précisées par les lois cantonales. La 3<sup>ème</sup> correction du Rhône étant bi-cantonale, les législations des deux cantons ne seront pas reprises lors de ce chapitre.

### 2.3 Exemples en Suisse

Les exemples de projet de revitalisation en Suisse augmentent au fil des années. La motivation de la Confédération à protéger ou restaurer le tracé naturel des cours d'eau est clairement établie dans la LACE. Un exemple de revitalisation est l'élargissement de la Thur, à proximité d'Andelfingen. En 2002, 1 km de digues latérales a été ôté afin que le cours d'eau puisse s'étendre de manière naturelle.

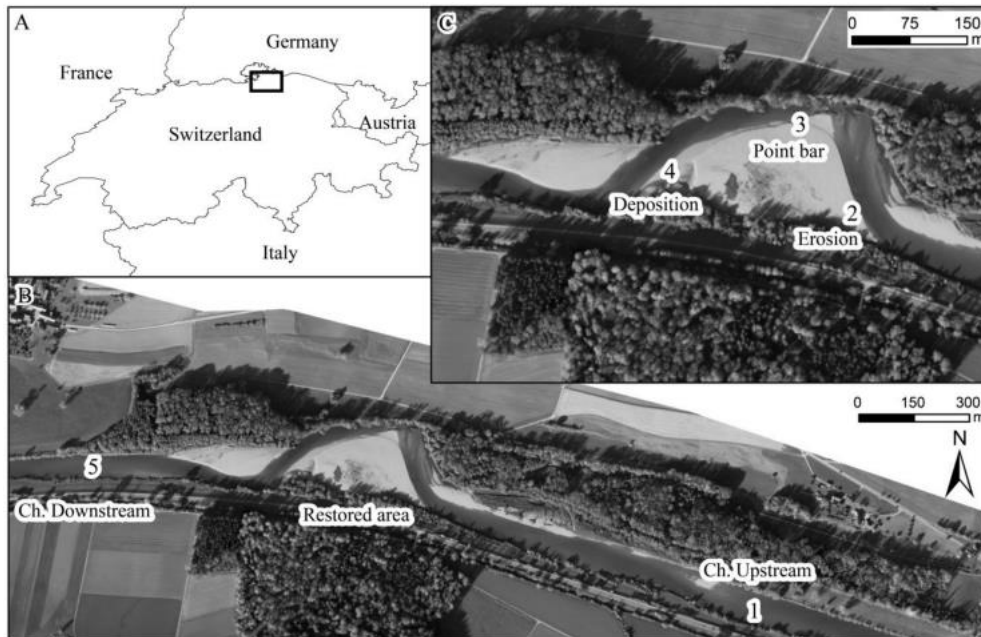


Figure 15 : Présentation de la zone d'étude de Martín et al. (2018)

Une comparaison entre le tronçon restauré et ceux non-restaurés a été effectuée 12 ans après la suppression des digues. L'objectif était d'évaluer l'influence de cet élargissement sur l'écosystème. Les trois constats principaux de cette étude ont démontré que :

- L'interaction entre l'écoulement et la restauration conduisait la variation spatio-temporelle de la respiration des sédiments (valeur reprenant la transformation de la matière organique en dessous et à côté du lit) et la diversité des espèces de macroinvertébrés.
- La taille du substrat, la composition de la matière organique ainsi que les échanges entre la nappe phréatique et le cours d'eau évoluaient du fait de la restauration.
- La composition chimique de l'eau, les conditions hydrauliques et la production primaire n'étaient en revanche pas impactées par la revitalisation.

Les résultats de ce travail démontrent que les paramètres abiotiques ne changent que marginalement, sauf pour la morphologie, mais que la structure et la fonction de l'écosystème montrent des réponses complexes dans l'interaction écoulement-restauration. Il faut dès lors pour les projets de revitalisation avoir une vue d'ensemble globale en incluant des mesures biotiques et fonctionnelles sur différentes échelles temporelles (intra- et interannuel) et spatiales (habitats), permettant d'évaluer les résultats d'un projet plus loin que seulement le design avant/après (Martín et al., 2018).

Un autre exemple de restauration prenant en compte une confluence est la revitalisation de l’Inn sur la commune de Bever dans le canton des Grisons. La raison de ce projet était de trouver une solution pour les digues endommagées qui dataient des années 50. Le potentiel écologique d’une mesure d’élargissement a été démontré avec une ancienne zone alluviale n’étant plus connectée à la rivière et n’étant plus soumise aux phénomènes de crues et de décrues. Cet espace, essentiel à la conservation de la biodiversité, risquait de disparaître pour cause d’assèchement et d’atterrissement. Les figures suivantes notent le changement avant/après travaux effectués sur la confluence de la Beverin et de l’Inn.

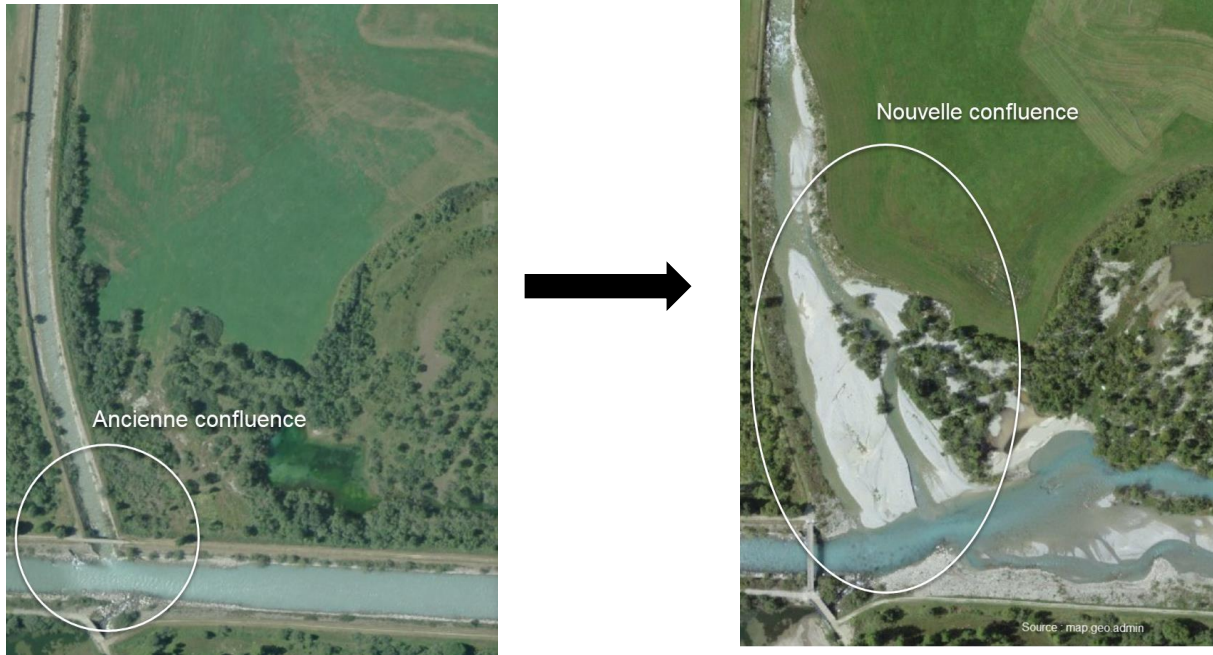


Figure 16 : Travaux effectués sur la confluence de l’Inn et de la Beverin. A gauche, situation en 2011, à droite situation en 2020

L’aménagement du cours d’eau a permis de passer d’un tracé rectiligne, semblable à celui du Rhône, à la création d’une rivière en tresse avec la présence d’une importante zone alluviale. Cette diversité d’habitats offre des conditions de vie optimales pour les différentes espèces vivant dans la région, allant des poissons jusqu’au mammifères, en passant par les insectes.

Ayant pris contact avec le professeur Bruce L. Rhoads et le professeur Mário J. Franca, ces derniers n’avaient malheureusement pas d’exemple concret de mesures de revitalisation ou d’élargissement au niveau international.

### 3. Données de base

#### 3.1 Données existantes

Les données mises à disposition par le bureau *sd ingénierie* pour la base de ce projet sont les aménagements 3D du projet de base, le MNT correspondant à la situation actuelle, ainsi que les débits projetés pour le Rhône lors de sa 3<sup>ème</sup> correction.

Pour la Borgne, les données ont été transmises par la société *HydroCosmos* et sont les hydrogrammes de crues pour Q30, Q100 et la crue extrême ainsi que la granulométrie. De plus, un projet de revitalisation de la Borgne est en cours et la largeur future de cette dernière devrait augmenter à 17 mètres. Cette information a été utilisée pour la réalisation des variantes.

Concernant la Lienne, les données ont été transmises par le bureau *KBM Engineers SA* et sont les hydrogrammes et solidogrammes de crues pour Q30, Q100, Q300 et la crue extrême, la granulométrie au dépotoir ainsi que le volume mobilisable à l'embouchure du Rhône pour des temps de retour de 20, 100 et 300 ans.

Le charriage constitue un des problèmes les plus complexes en matière d'hydraulique. Les théories et formules connues de nos jours sont basées sur des tests en laboratoire et des mesures sur le site. Le charriage à l'intérieur du Rhône n'est calculé qu'après des estimations du fait du nombre important de gravière évitant son exhaussement de lit le long de son tracé. Sur le Rhône français, un article démontre l'effet de l'extraction de graviers et des ouvrages hydroélectriques sur les affluents qui ont divisé par 5 les apports solides par charriage au Rhône (Cortier and Couvert, 2001). Les cas de la Borgne et de la Lienne présentés dans ce rapport s'inscrivent dans cette logique puisque des gravières et des zones de dépôts se trouvent sur le tracé de ces derniers.

#### 3.2 Paramètres pour la Borgne

En premier lieu, la définition de la zone modélisée est effectuée. Elle est observable en Figure 17 et correspond à une surface d'environ 182'800 m<sup>2</sup>.

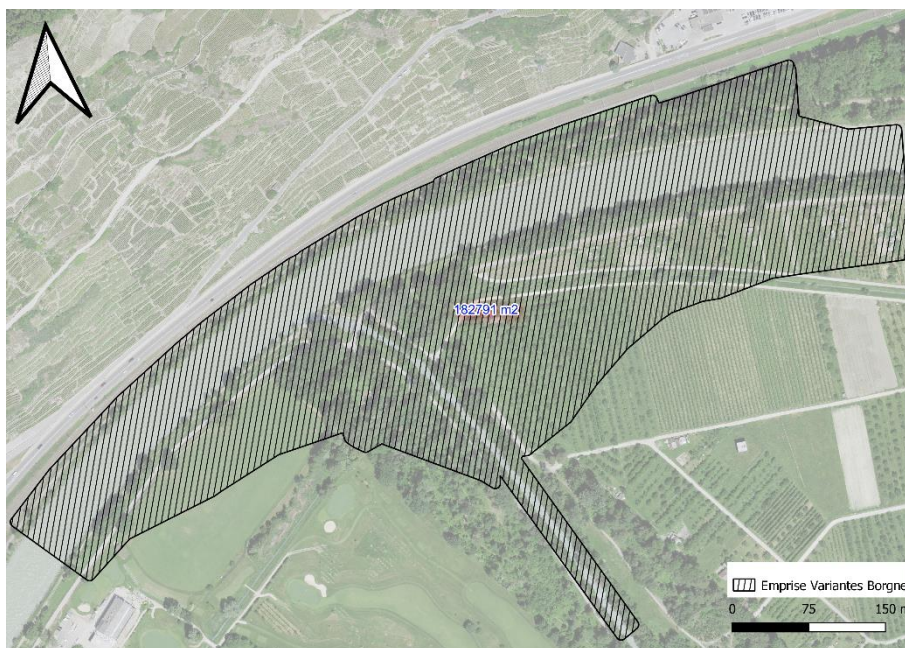


Figure 17 : Zone de modélisation de la Borgne



Le choix se base sur les critères suivants :

- Avoir en premier lieu une vue d'ensemble de la confluence.
- Eviter que les conditions de bord ne viennent perturber l'écoulement à la jonction des cours d'eau. Dans cette optique, une augmentation de surface en amont et aval de la confluence est effectuée.
- S'assurer que les aménagements maintiennent leur but sécuritaire.

Pour la première partie (concomitance des crues), les solidogrammes ont été calculés à partir des hydrogrammes en suivant la formule de Meyer-Peter-Müller (1948).

$$q_s = \frac{8 * \sqrt{g}}{(s - 1)} * \left[ \left( \frac{k}{k_r} \right)^{1.5} * R_h * J - \tau_{*,cr} * (s - 1) * d_m \right]^{1.5}$$

Avec  $q_s$ , le débit solide,  $g$  la constante de gravité (9.81 m<sup>2</sup>/s),  $s$  la densité des grains divisé par la densité de l'eau,  $k/k_r$  un facteur de structure de la section,  $R_h$  le rayon hydraulique,  $J$  la pente,  $\tau_{*,cr}$  la contrainte de cisaillement critique (0.047) et  $d_m$  le diamètre moyen des grains. Ayant la largeur projetée de la future Borgne et la hauteur d'eau étant calculée sur Excel suivant une loi de hauteur uniforme, le débit solide a pu être obtenu. Afin d'avoir le volume charrié à la confluence, le volume total de sédiments a été calculé. L'équivalent du volume réel a été corrigé par la porosité (divisé par 0.7). L'application de la formule de Meyer-Peter-Müller est choisie car elle s'applique bien aux affluents à faible pente (pente inférieure à 2%, contrairement à Smart-Jaeggi (1983) qui est préférable pour les pentes supérieures à 2%) et a déjà été utilisée pour le projet de la mesure anticipée de la Lizerne. La visualisation des hydrogrammes et solidogrammes est disponible en Annexe 1. Le choix du  $d_m$  est effectué ainsi car le logiciel de modélisation hydro-morphodynamique Basement ne permet plus d'avoir des granulométries variées pour les différents cours d'eau et un diamètre moyen unique est défini pour les trois cours d'eau.

Pour la seconde partie (crue annuelle), seulement le débit annuel, provenant de l'Atlas Hydrologique de la Suisse (HADES, n.d.) est pris en compte. Un récapitulatif des valeurs des différents paramètres est disponible au Tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs des paramètres pour la Borgne

Largeur [m]	Pente [-]	Q <sub>1</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>30</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>100</sub> [m <sup>3</sup> /s]	V <sub>Q30</sub> [m <sup>3</sup> ]	V <sub>Q100</sub> [m <sup>3</sup> ]	d <sub>m</sub> [m]
17	0.003	11.96	107	145	473	935	0.031

Nous constatons que le volume charrié à la confluence est relativement faible, conséquence de la faible pente et de l'effet possible de la gravière. A noter qu'une coordination future devra être entreprise entre les bureaux responsables du projet de revitalisation de la Borgne et ceux responsables de la 3<sup>ème</sup> correction du Rhône afin que ces deux projets se basent sur les mêmes paramètres, par souci de réussite des deux mandats.

### 3.3 Paramètres pour la Lienne

A nouveau, en premier lieu, le choix de la zone a été défini selon les mêmes critères que ceux listés précédemment. La surface modélisée correspond à 116'250 m<sup>2</sup> et est observable en Figure 18.

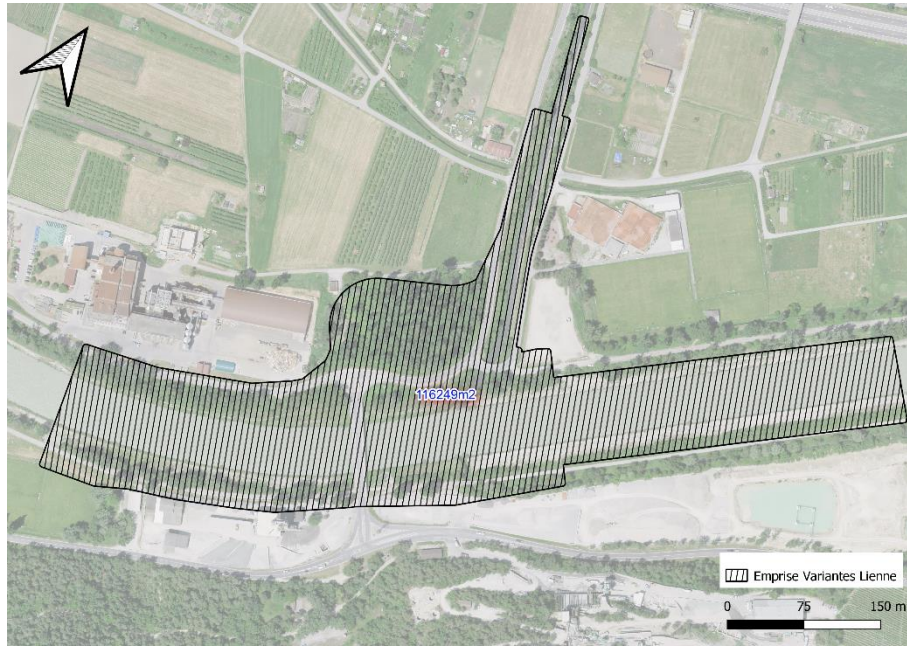


Figure 18 : Zone modélisée pour la Lienne

A noter que pour la variante hors PAR3, la surface s'étend sur 122'150 m<sup>2</sup>.

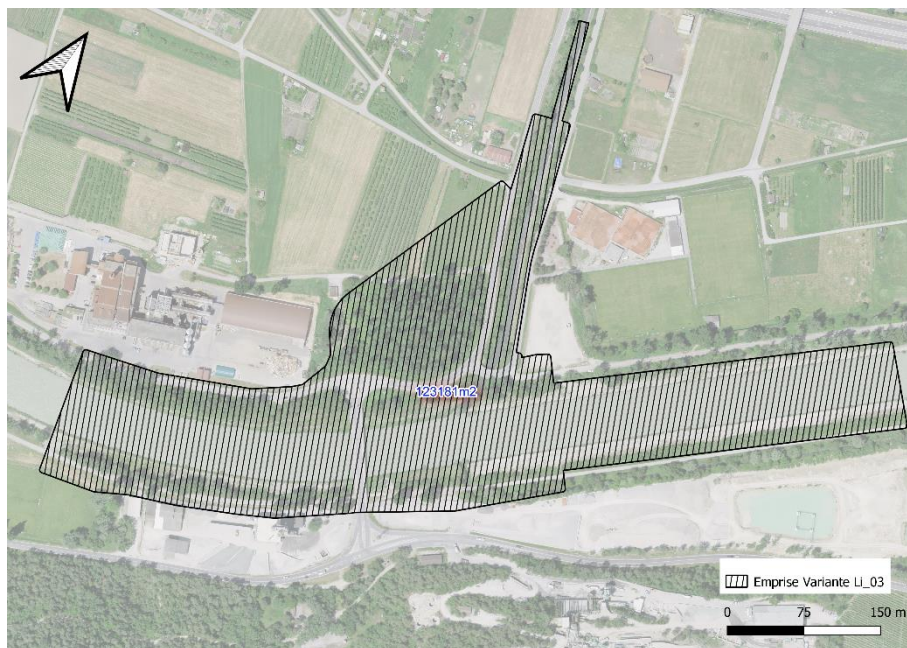


Figure 19 : Zone modélisée pour la variante Li\_03

Concernant le transport solide, la méthodologie employée a été différente de celle utilisée pour la Borgne. La valeur du volume charrié jusqu'à la confluence avec le Rhône pour des temps de retour de 20, 100 et 300 ans était disponible. Afin d'avoir le volume charrié pour un temps de retour de 30 ans, une simple approximation linéaire a été calculée. Cette valeur a été multipliée par la porosité afin d'avoir la quantité réelle de sédiments à la confluence. Ayant les hydrogrammes pour les temps de retour de 30 et 100 ans, le volume charrié a été divisé par le volume total d'eau parvenant à la confluence, résultant en un coefficient de charriage fixe. Les solidogrammes ont été définis en appliquant ce coefficient aux hydrogrammes. Cette approche, bien que simpliste, permet d'avoir des valeurs

réalistes pour la Lienne, en matière de transport solide. Les hydrogrammes et solidogrammes sont en Annexe 2 et les différents paramètres sont repris au tableau suivant.

Tableau 4 : Valeurs des paramètres pour la Lienne

Largeur [m]	Pente [-]	Q <sub>1</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>30</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>100</sub> [m <sup>3</sup> /s]	V <sub>Q30</sub> [m <sup>3</sup> ]	V <sub>Q100</sub> [m <sup>3</sup> ]	d <sub>m</sub> [m]
6	0.003	4.08	39	70	165	270	0.031

Les volumes charriés par la Lienne sont inférieurs à ceux de la Borgne. Cette différence est expliquée par un débit liquide moins important, ainsi qu'une faible pente et la présence d'un dépotoir sur son tracé.

### 3.4 Paramètres pour le Rhône

L'hydrogramme du Rhône pour un Q100 était disponible au sein de l'entreprise. L'hydrogramme pour le Q30 a été repris du rapport « Sohlenlagen Mündung Lizerne » du bureau *Hunziker, Zarn & Partner* (HZP, 2015). L'hydrogramme Q30 était disponible sur une période de plus de 240 heures. Il a donc fallu le découper afin d'avoir une courbe de 50 heures en prenant en compte le pic de la crue. Le transport solide a été calculé en suivant la même méthode que celle appliquée à la Borgne. La largeur du Rhône correspond à celle prévue pour l'élargissement. Le débit annuel correspond au débit hautes eaux pour le projet. Les valeurs utilisées pour les modélisations sont les suivantes.

Tableau 5 : Valeurs des paramètres pour le Rhône

Largeur [m]	Pente [-]	Q <sub>1</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>30</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>100</sub> [m <sup>3</sup> /s]	V <sub>Q30</sub> [m <sup>3</sup> ]	V <sub>Q100</sub> [m <sup>3</sup> ]	d <sub>m</sub> [m]
80	0.003	189	790	1'120	22'000	15'000	0.031

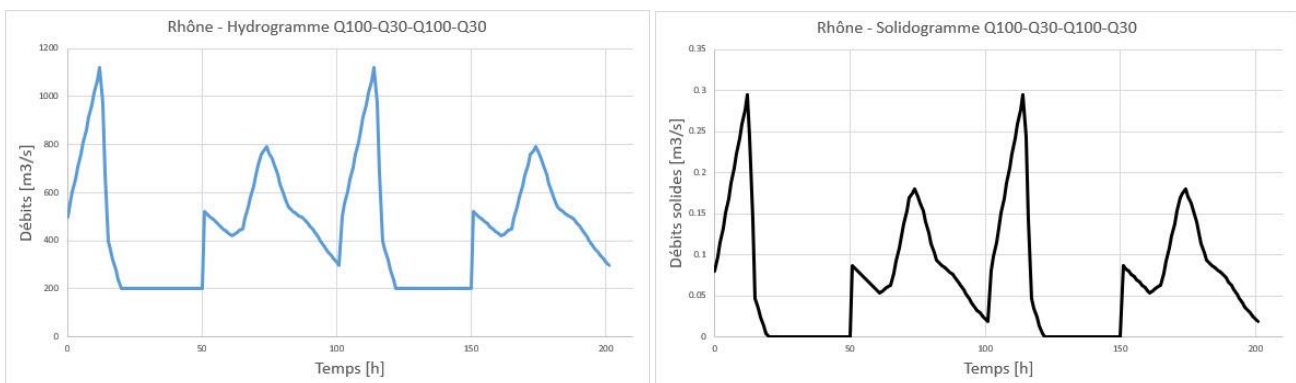


Figure 20 : Hydrogramme et solidogramme du Rhône pour la concomitance des crues

La différence notable entre le volume charrié entre la crue de 30 ans et la crue de 100 ans provient des faibles débits à la fin de la crue centennale qui ne permettent pas le transport des sédiments, tandis qu'il est assuré pour toutes les gammes de débits de la crue de 30 ans. Nous avons une crue longue avec pic faible pour le Q30 et une crue courte avec un haut pic pour le Q100. La prise en compte des crues courtes et longues est faite ainsi. Nous constatons que l'aire sous la courbe de la crue trentennale est plus importante que celle de la crue centennale, induisant un transport solide plus élevé. L'hydrogramme et solidogramme sont disponibles en Annexe 3 en version agrandie.



## 4. Etude de variantes

### 4.1 Présentation des catégories

Les différentes configurations de confluence ont été modélisées en 3D sur le logiciel ArcGis Pro. L'avantage de la modélisation 3D permet la visualisation sous tous les angles des aménagements ainsi que la prise en compte de l'élévation. Cette dernière est essentielle à la création d'un MNT qui sera par la suite extrapolé sur le maillage.

Les différentes configurations étudiées pour la zone de confluence se regroupent sous 5 catégories de sous-variantes, dont une spécifique à la Borgne. Ces classes sont différenciables entre elles et reprennent des éléments théoriques, issus de la littérature. 14 variantes ont été créées pour la Borgne et 8 pour la Lienne, faisant ainsi un total de 22 configurations étudiées. La confluence entre l'affluent et le Rhône est assurée par la connexion de leur lit respectif.

La première classe (sous-variantes « base ») correspond au projet de référence de l'entreprise. Il s'agit du raccord de l'affluent au Rhône au moyen de deux chenaux. Cette configuration reprend la forme de la jonction revitalisée de la Beverin et de l'Inn.

La deuxième catégorie (sous-variante « 0 ») se base sur l'espace nécessaire au cours d'eau. La confluence avec le Rhône est laissée libre, sans aménagement. L'objectif est de permettre au cours d'eau de définir lui-même son tracé en lui donnant le plus de surface possible. Les événements tirés du passé ont démontré que contraindre les cours d'eau dans leur tracé n'est pas la solution optimale (crue de 2000 par exemple).

Le troisième groupe (sous-variante « 1 ») s'inspire d'un modèle physique réalisé pour la confluence du Rhône et de la Borgne. Après le passage d'une crue morphogène dans une Borgne élargie, le débit annuel moyen s'écoulait dans un chenal préférentiel défini sur la rive gauche de l'affluent (Leite Ribeiro et al., 2011).

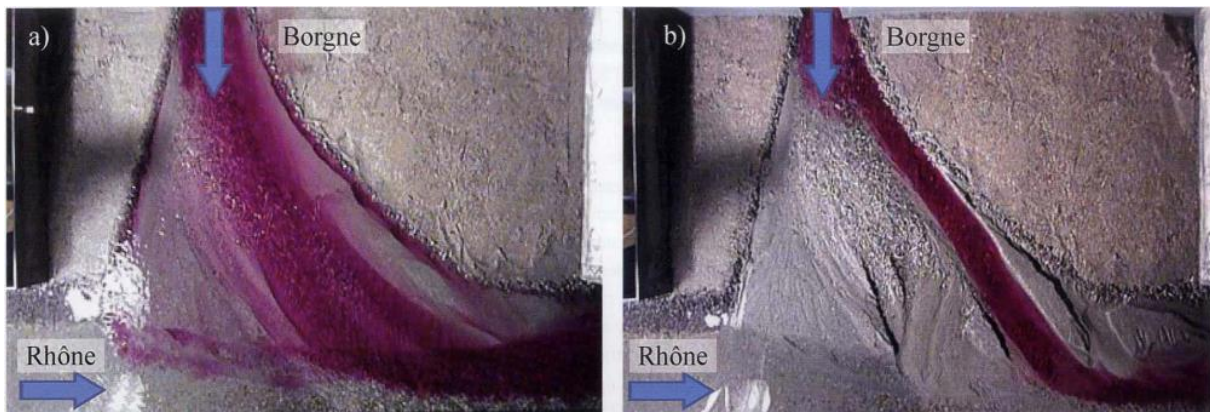


Figure 21 : Modèle physique de la Borgne élargie. A gauche, une crue morphogène, à droite le débit annuel (Leite Ribeiro et al., 2011)

Les sous-variantes « 2 » sont inspirées des travaux de revitalisation exécutés sur l'Aire et le Rhône. La confluence se forme à l'aide de formes géométriques. Ces dernières permettent la déflexion du cours d'eau, dans le but de créer une diversité d'écoulement.



Figure 22 : Exemples de travaux de revitalisation réalisés. A gauche, l'Aire (GE). A droite, le bois de Finges (VS)

La dernière catégorie (sous-variantes « 3 ») concerne exclusivement la Borgne. Il s'agit d'un déflecteur, attaché à la rive extérieure du Rhône à l'amont de la zone de confluence. Le but de ce dernier est d'entraîner et concentrer l'écoulement du Rhône à l'intérieur de la confluence, pour une redynamisation hydraulique de la zone.

A des fins de simplification de lecture et pour éviter de se perdre au milieu de toutes ces différentes variantes, un schéma reprenant de manière simpliste les aménagements prévus est disponible à la Figure 23 pour la Borgne et à la Figure 24 pour la Liègne.

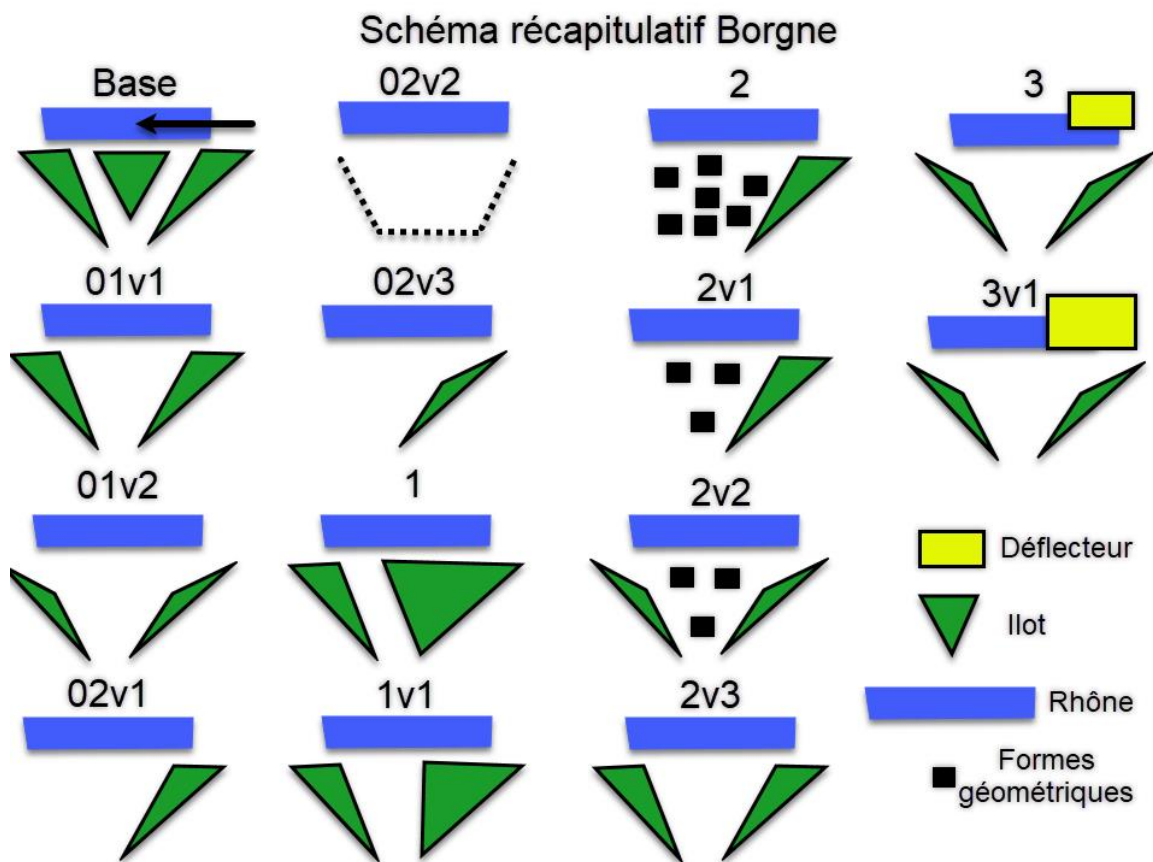


Figure 23 : Schéma récapitulatif des aménagements prévus sur la Borgne

### Schéma récapitulatif Lienne

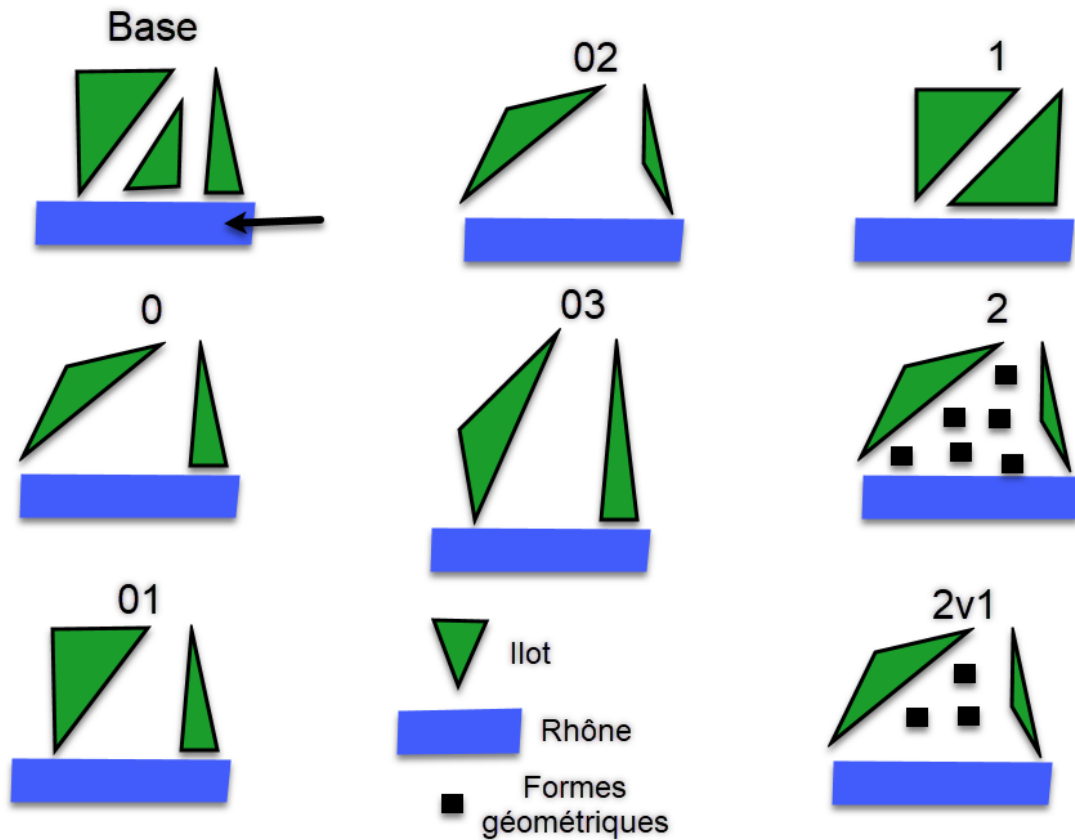


Figure 24 : Schéma récapitulatif des aménagements prévus pour la Lienne

#### 4.2 Contraintes et objectifs considérés

Une des contraintes les plus influentes de ce projet est la ressource en espace. Pour parvenir à retrouver une dynamique naturelle, le cours d'eau a besoin de place. Le contour de la 3<sup>ème</sup> correction du Rhône a été délimité par le PA-R3 et des mesures d'expropriation ont été mises en place pour satisfaire la sécurité de la plaine. Les deux embouchures, se trouvant dans des zones agricoles, permettent d'avoir un impact moindre sur l'aménagement territorial. La réalisation des travaux doit aussi être coordonnée avec les autres projets affectant la Borgne et la Lienne. La topologie du terrain est un élément à prendre en compte lors de la préparation du projet. Du côté de la Borgne, le passage du canal de Bramois sous cette dernière en fait un point dur, ne pouvant être supprimé. Pour la Lienne, sa proximité avec l'usine de traitement des ordures du Valais central (UTO) nécessite une attention particulière. De même pour le pont situé à l'aval de la zone de confluence qui sera déplacé. De plus, pour qu'un projet soit efficace et optimal, il faut que le coût et la réalisation soient abordables.

Les objectifs considérés pour les deux confluences sont les mêmes. Tout d'abord, le but sécuritaire doit être atteint en protégeant la population et les objets des crues. L'objectif nature est aussi important en voulant redynamiser la zone de confluence afin d'augmenter sa biodiversité. Les connectivités latérale et longitudinale doivent être rétablies pour les raisons citées au chapitre 2.1. Une attention particulière est requise pour la Borgne avec la suppression du seuil afin de permettre à



nouveau la migration piscicole au moyen d'une pente adoucie à la confluence. L'augmentation de la valeur paysagère est aussi une ambition de la correction du Rhône.

### 4.3 Variantes de la Borgne

La présentation en images des aménagements imaginés pour la confluence de la Borgne s'effectue au sein de ce chapitre. Pour des raisons de simplicité et de compréhension dans l'explication des variantes, les parties immergées dans la zone de confluence sont dénommées « îlots » et la configuration de la zone de rencontre des deux cours d'eau est qualifiée de « bouche ». Une caractéristique principale des aménagements proposés est le déplacement de la zone de confluence dans la direction amont de la Borgne du fait de l'élargissement du Rhône.

#### Catégorie de « base » :

- **Bo\_BASE** : La variante imaginée au sein de l'entreprise. Elle sert de base pour la comparaison des autres variantes et correspond à la séparation de l'affluent par une pointe en enrochements en deux chenaux principaux d'écoulement.

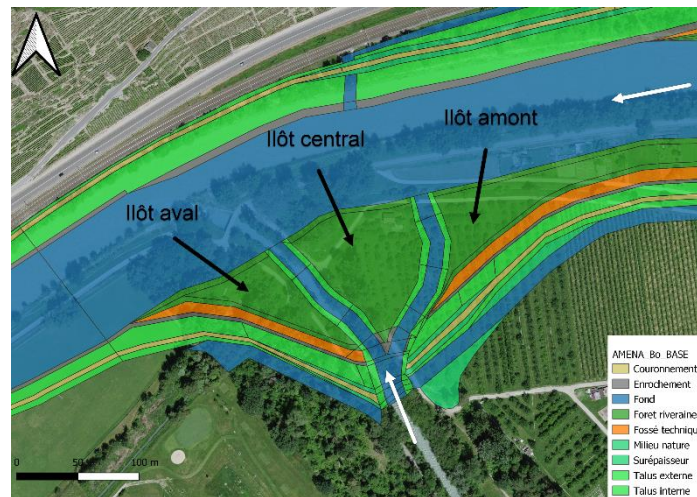


Figure 25 : Variantes Bo\_BASE

#### Catégorie « 0 » :

- **Bo\_01v1** : L'îlot central à l'intérieur de la zone de confluence est supprimé, en comparaison à la variante de base.

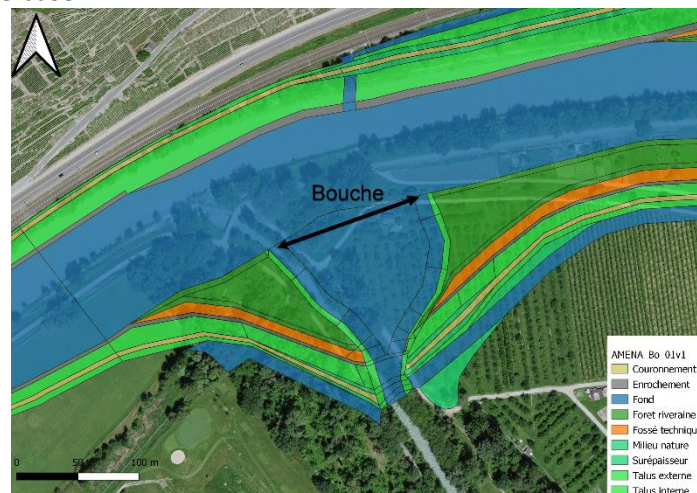


Figure 26 : Variante Bo\_01v1

## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

- **Bo\_01v2** : L'îlot central est aussi supprimé et la bouche est adaptée à l'amont et à l'aval afin d'avoir une rencontre avec le Rhône plus en douceur.

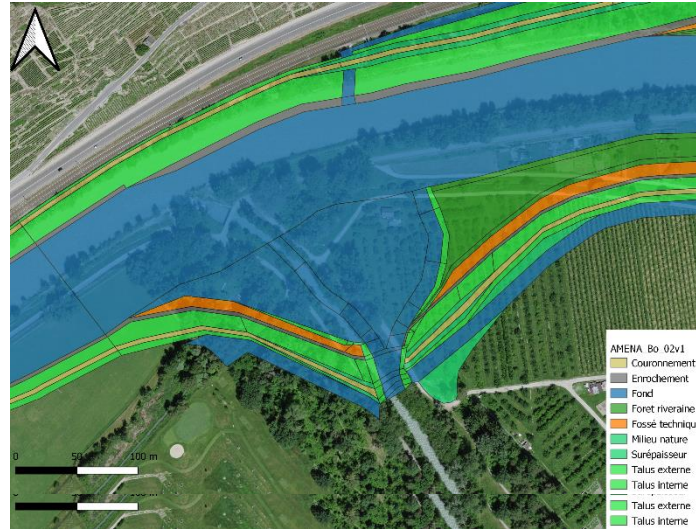


Figure 27 : Variante Bo\_01v2

- **Bo\_02v1** : L'îlot central et l'îlot aval sont supprimés.

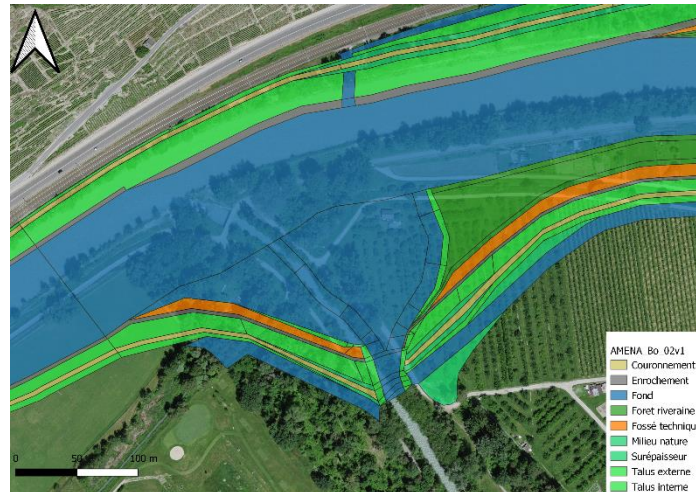


Figure 28 : Variante Bo\_02v1

- **Bo\_02v2** : L'îlot central, l'îlot aval et amont sont supprimés afin de laisser le maximum d'espace au Rhône et à la Borgne.

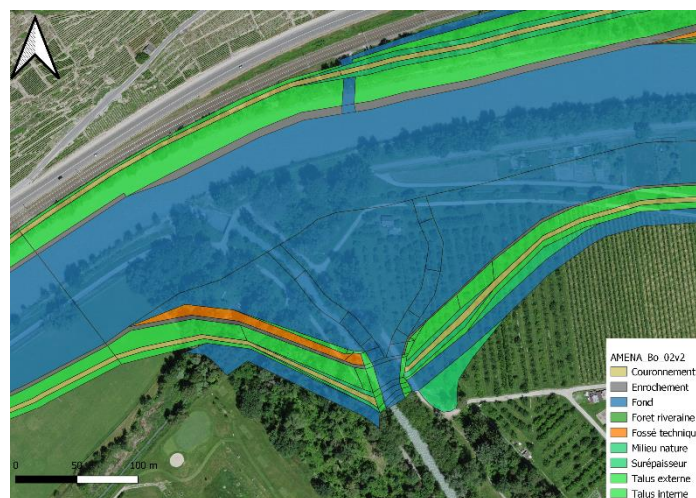


Figure 29 : Variante Bo\_02v2



- **Bo\_02v3** : L'îlot central et celui à l'aval sont supprimés avec une adaptation de la bouche à l'amont.

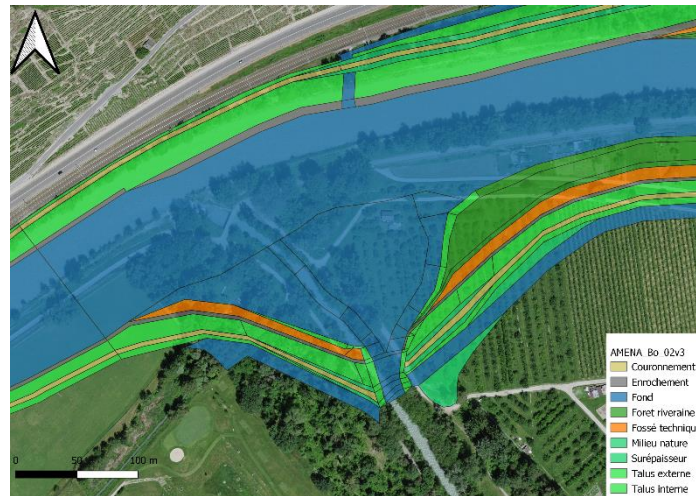


Figure 30 : Variante Bo\_02v3

**Catégorie « 1 » :**

- **Bo\_1** : La présence d'un seul chenal préférentiel pour l'affluent est modélisée.

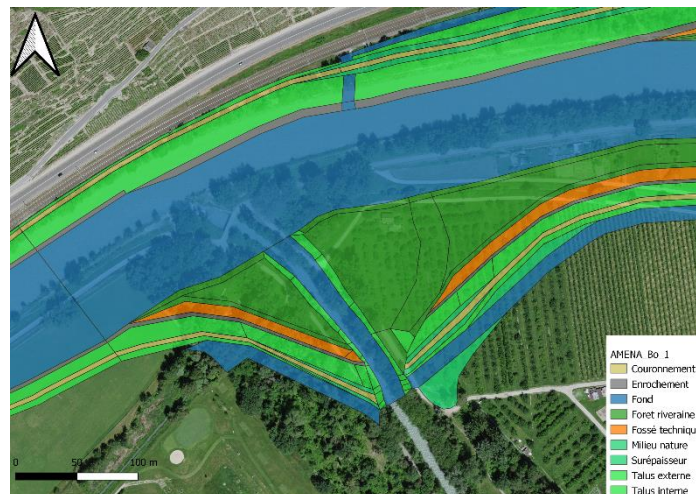


Figure 31 : Variante Bo\_1

- **Bo\_1v1** : A nouveau, un chenal préférentiel élargi de trois fois sa largeur lors de sa jonction avec le Rhône. Cette augmentation d'étendue reprend les valeurs étudiées par Leite Ribeiro ( $3 \cdot B_A$ ) pour l'élargissement de l'affluent.

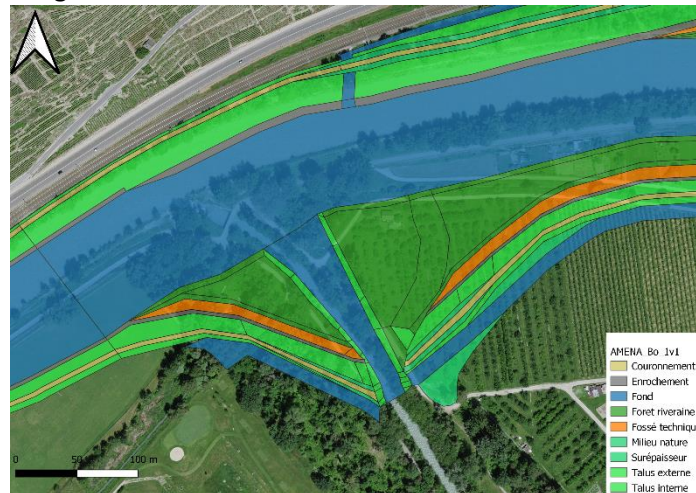


Figure 32 : Variante Bo\_1v1

**Catégorie « 2 » :**

- **Bo\_2** : L'îlot central et aval sont remplacés par une mosaïque de formes géométriques d'une hauteur de 1.5 mètres et d'une surface de 10 mètres par 10 mètres. Dans cette configuration, ces carrés sont placés aléatoirement.

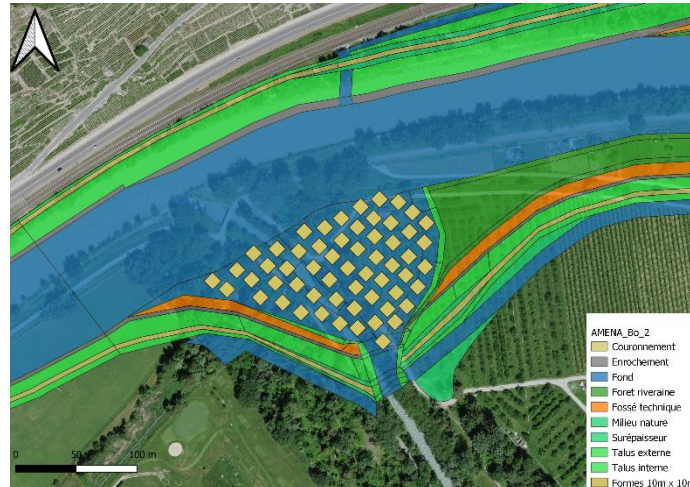


Figure 33 : Variante Bo\_2

- **Bo\_2v1** : L'îlot central et aval sont remplacés par des formes géométriques avec une disposition plus symétrique que Bo\_2.

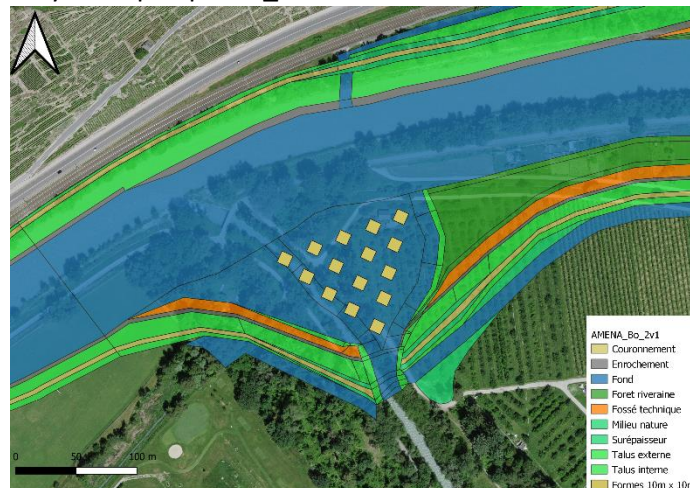


Figure 34 : Variante Bo\_2v1

- **Bo\_2v2** : L'îlot central est remplacé par les carrés et la bouche est adaptée à l'aval et à l'amont.

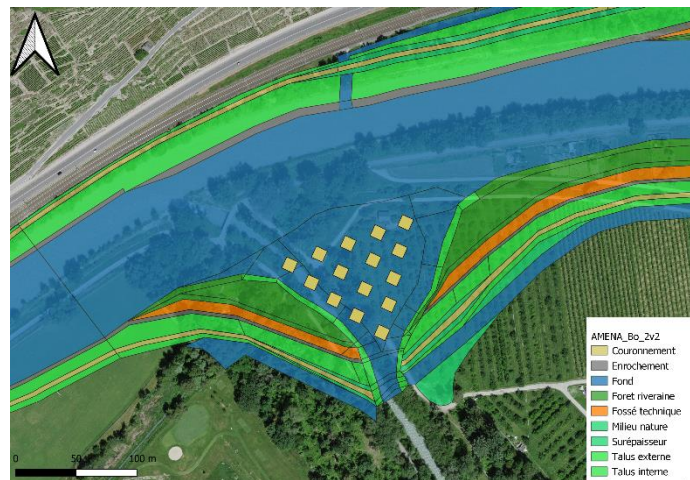


Figure 35 : Variante Bo\_2v2



- **Bo\_2v3** : L'îlot central est remplacé par les losanges.

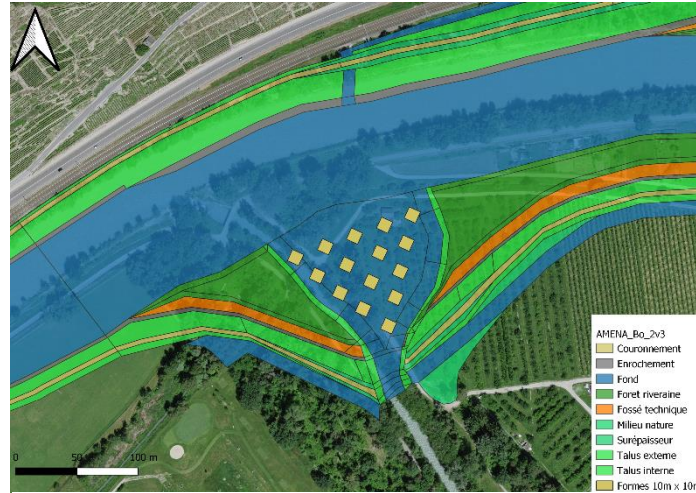


Figure 36 : Variante Bo\_2v3

**Catégorie « 3 » :**

- **Bo\_3** : Un déflecteur est implanté sur la rive extérieure du Rhône, l'îlot central est supprimé et la bouche adaptée à l'amont et l'aval.

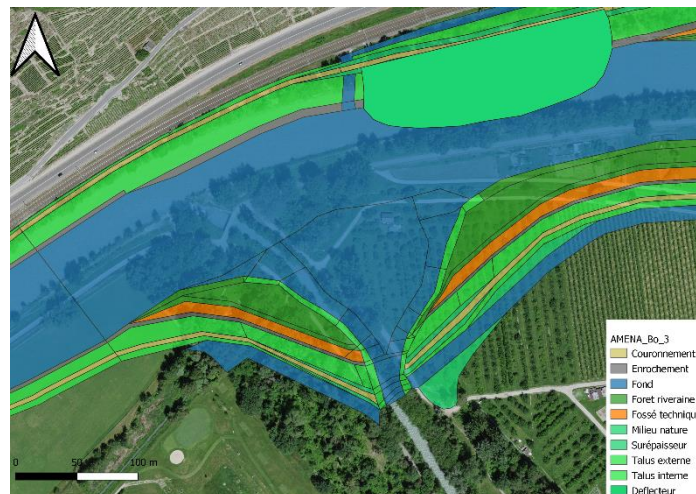


Figure 37 : Variante Bo\_3

- **Bo\_3v1** : Même disposition que Bo\_3 avec un déflecteur plus massif.

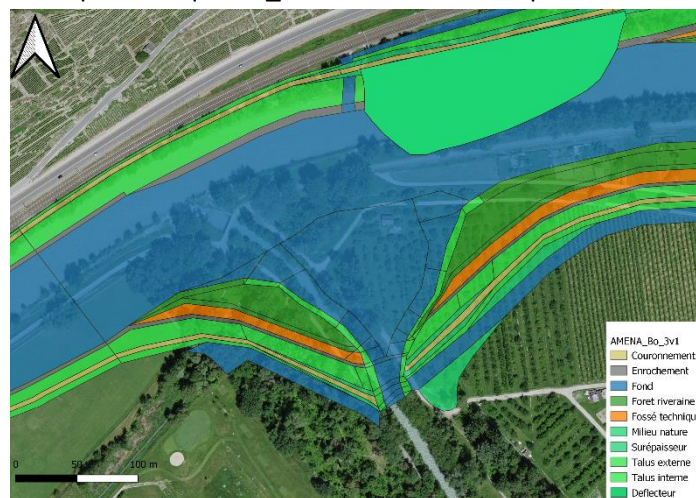


Figure 38 : Variante Bo\_3v1

La présentation des aménagements en 3D avec leur MNT correspondant est disponible en Annexe 4.

#### 4.4 Variantes de la Lienne

Les aménagements de la Lienne reprennent les mêmes concepts que ceux de la Borgne avec la suppression d'îlots et l'adaptation de la bouche.

##### Catégorie de « base » :

- **Li\_BASE** : Un ouvrage de dérivation est utilisé pour mettre le chenal gauche de la Lienne en eau à partir d'un certain débit. Le second chenal peut permettre le passage de la faune piscicole. Cette variante sert de base pour la comparaison avec les autres configurations d'aménagements.

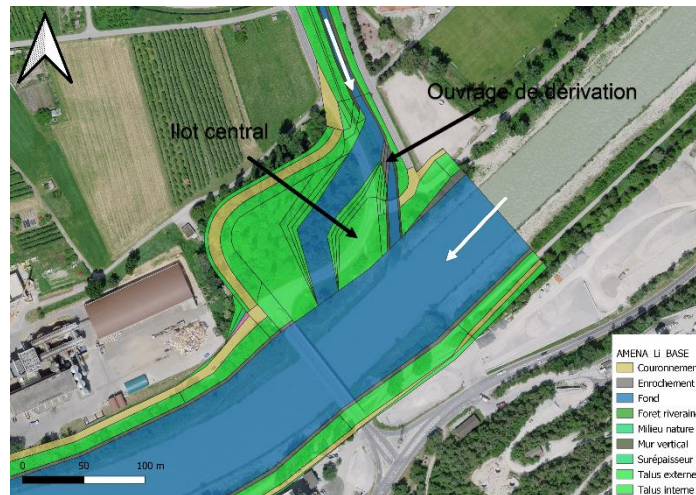


Figure 39 : Variante Li\_BASE

##### Catégorie « 0 » :

- **Li\_0** : L'îlot central et l'ouvrage de dérivation sont supprimés. La bouche est agrandie à l'aval de la zone de confluence.

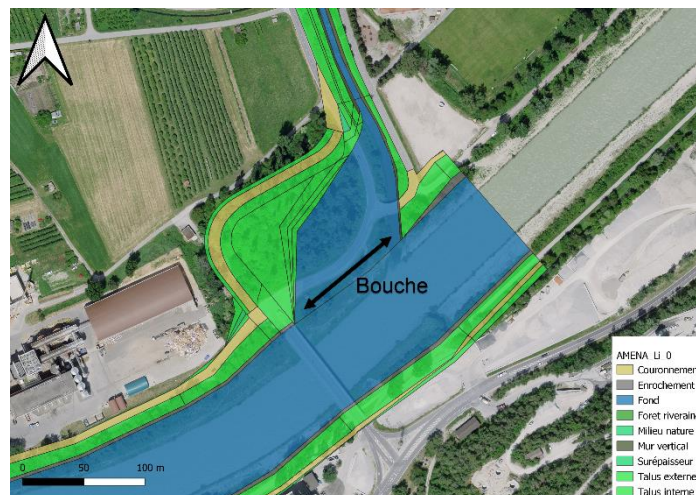


Figure 40 : Variante Li\_0



- **Li\_01** : L'îlot et l'ouvrage sont supprimés.

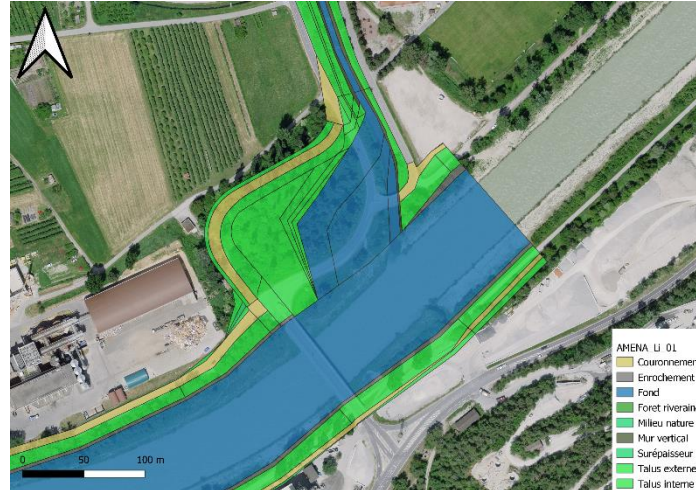


Figure 41 : Variante Li\_01

- **Li\_02** : Suppression de l'îlot et adaptation de la bouche à l'amont et à l'aval.



Figure 42 : Variante Li\_02

- **Li\_03** : Les aménagements prévus pour cette variante sortent de la délimitation du PA-R3. L'îlot est supprimé et la bouche aval adaptée. L'objectif est d'évaluer le gain écologique possible avec une zone de confluence en forme d'entonnoir moins restreinte spatialement.

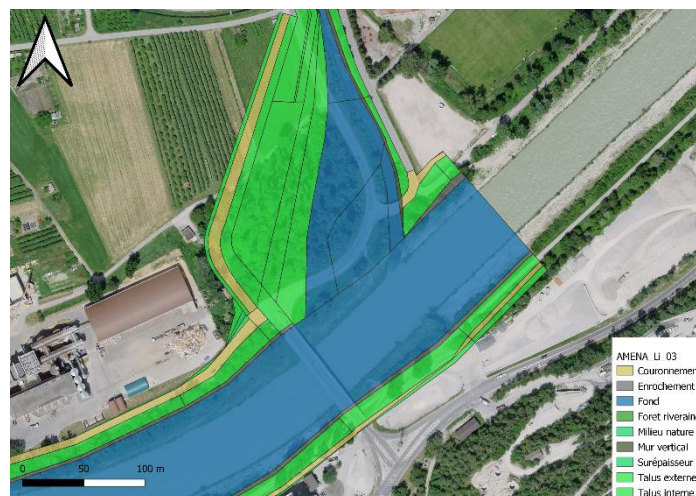


Figure 43 : Variante Li\_03

**Catégorie « 1 » :**

- **Li\_1** : Jonction au Rhône possible grâce à un chenal préférentiel élargi de trois fois la largeur de l'affluent.

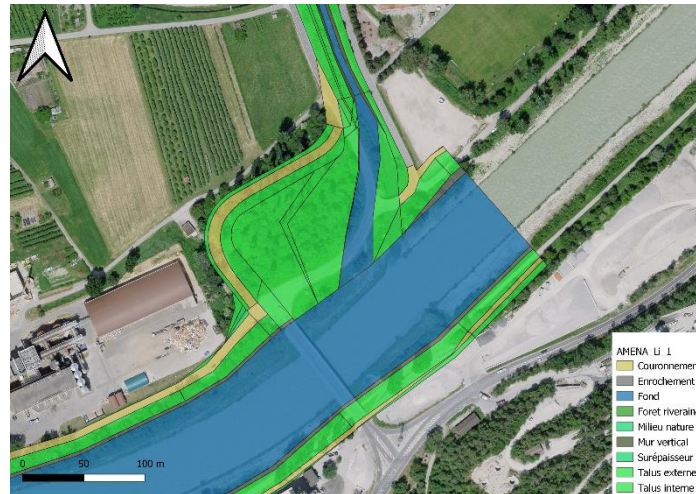


Figure 44 : Variante Li\_1

**Catégorie « 2 » :**

- **Li\_2** : Remplacement de l'îlot par des formes géométriques ayant les mêmes caractéristiques que celles utilisées pour la confluence de la Borgne. Ces carrés sont placés aléatoirement et la bouche est adaptée à l'amont et à l'aval.

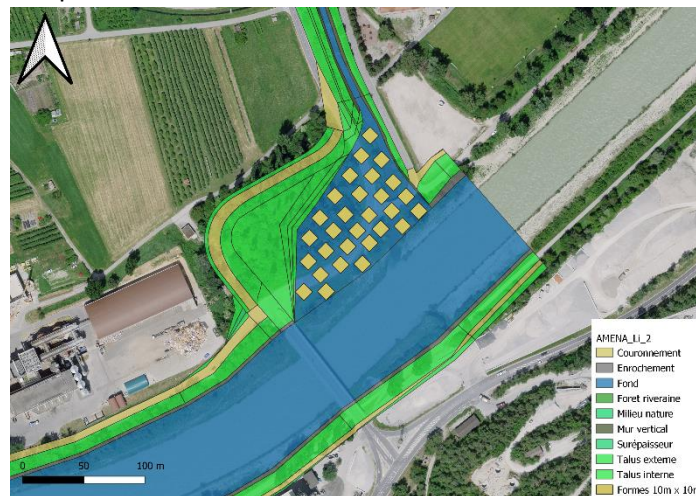


Figure 45 : Variante Li\_2

- **Li\_2v1** : L'îlot est remplacé par ces mêmes formes placées de manière plus ordonnée. Adaptation de la bouche à l'amont et à l'aval.

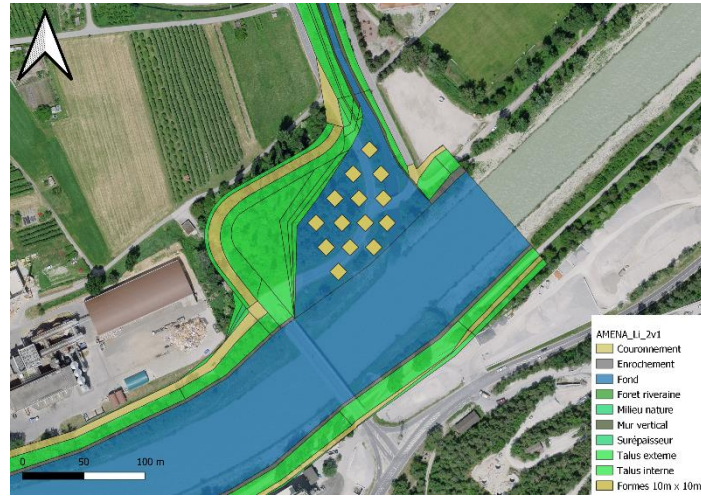


Figure 46 : Variante Li\_2v1

Cette dernière variante clôt le chapitre dédié à la présentation des aménagements de confluence. La modélisation en 3D des différentes configurations a été nécessaire pour définir l'élévation prévue des mesures et ainsi procéder à la partie concomitance des crues avec la formation du maillage. De nouveau, ces aménagements et leur MNT sont visualisables en Annexe 5.



## 5. Modélisations numériques 2D

### 5.1 Programme de calcul

Lors de ce chapitre, nous nous intéresserons aux modélisations numériques 2D, nécessaire à l'étude des variantes. Pour rappel, la modélisation permet de passer d'un système complexe à un autre système, radicalement plus simple. Dans le cas de ce projet, nous passons du système réel du Rhône, avec ses berges, ses épis, sa végétation à proximité, sa granulométrie propre à un projet de correction du Rhône avec trois types de rugosité (correspondant aux berges, au Rhône et à l'affluent) et à une granulométrie unique pour tout le domaine. Ces choix n'ont pas été utilisés par souci de simplification du projet mais car la version actuelle du logiciel Basement ne permet plus de prendre en compte différents diamètres de sédiments (grains). Pour les simulations morphodynamiques, nous utilisons en entrée un maillage, des hydrogrammes et solidogrammes. A noter que Basement possède diverses fonctionnalités quant aux conditions de bords de même que pour le transport de sédiments (Vetsch et al., 2021). Dans notre cas, nous utilisons un hydrogramme et un solidogramme (évalué par la capacité de transport solide avec une section représentative) pour le Rhône, ainsi que pour l'affluent. La formule de transport solide utilisée est celle de Meyer-Peter-Müller. Ce logiciel fonctionne selon un procédé itératif à chaque pas de temps. Dans un premier temps, la configuration de la simulation est définie grâce au fichier « model.json ». Ce fichier reprend les données nécessaires (maillage, hydrogramme, solidogramme) et permet à l'utilisateur de choisir par exemple, l'équation de transport solide utilisée, les conditions de bord, la rugosité des régions, etc. Dans un second temps, le fichier « simulation.json » détermine les variables d'intérêt, le pas de temps à laquelle la valeur de ces variables est écrite ainsi que le temps final de la simulation. Pour terminer, le fichier « results.json » définit le format dans lequel les résultats de la simulation sont exportés. Une visualisation en format texte de ces trois fichiers ainsi que d'un hydrogramme et d'un solidogramme est disponible en Annexe 6.

### 5.2 Modélisation morphodynamique trentennale et centennale

En premier lieu, nous procédons à une concomitance des crues pour le Rhône et son affluent avec du transport sédimentaire. Comme dit précédemment, cette démarche est choisie afin d'avoir une vue du travail effectué par les cours d'eau sur leur fond. Le résultat de cette concomitance de crues permet de créer un nouveau MNT, servant de base à l'évaluation des différentes variantes. En effet, les variantes seront évaluées selon un débit annuel afin d'apprécier l'impact environnemental et hydraulique. Cette modélisation a nécessité de fixer le lit amont de la Lienne avant la zone de confluence car le transport sédimentaire étant trop faible, ce dernier se chargeait en sédiments en érodant ce tronçon. Une fixation de lit a aussi été réalisée pour la Borgne mais pour une raison différente. Cette fixation sur quelques mètres seulement correspond au passage du canal de Bramois en dessous du lit de la Borgne et constitue donc un point dur, non-déplaçable. La visualisation de ces deux fixations est disponible à la Figure 47 pour la Borgne et à la Figure 48 pour la Lienne.

La résolution du maillage utilisée afin d'obtenir des temps de calcul raisonnables (augmentés par le transport solide) est de 5 mètres. La durée totale de la simulation est de 200 heures, impliquant des crues de 50 heures chacune. Le nombre d'éléments présents pour les différents maillages correspond à une valeur d'environ 15'000 éléments pour la Borgne et environ 10'000 éléments pour la Lienne (dépendent de la variante modélisée).



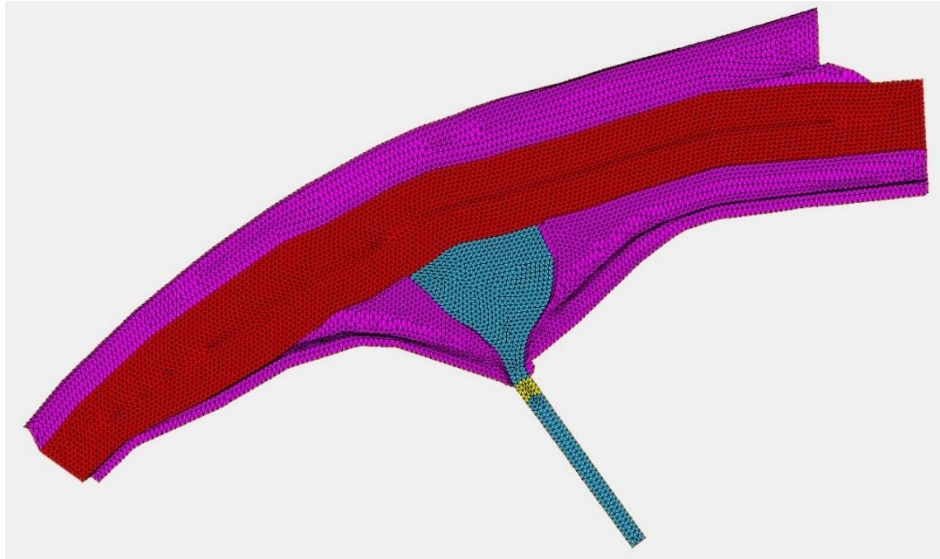


Figure 47 : Modèle de maillage pour la Borgne, avec en jaune, le point dur fixé

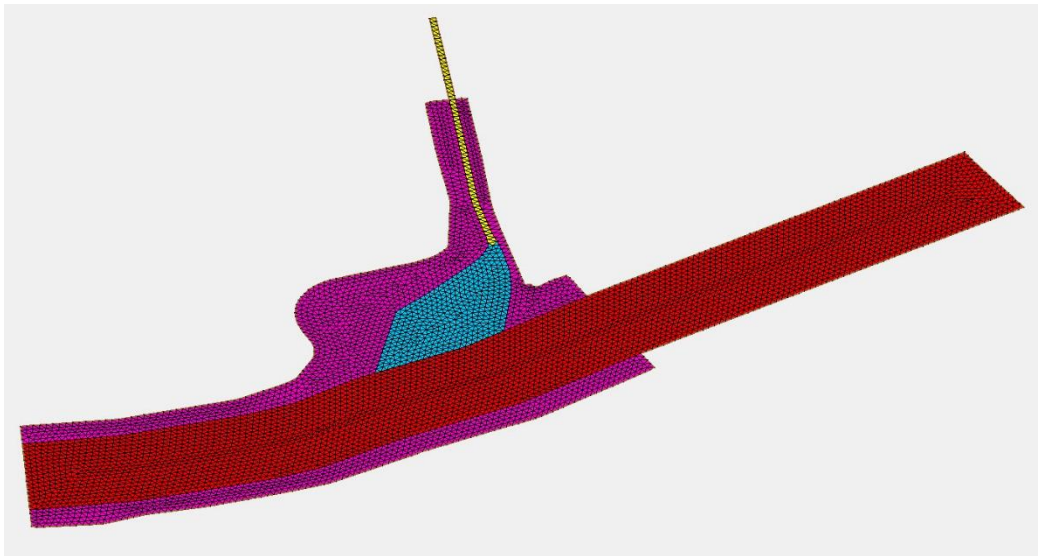


Figure 48 : Modèle de maillage pour la Lienne, avec en jaune, le lit fixé de l'affluent

### 5.2.1 Résultats secteur Borgne

Les figures suivantes présentent le fond du lit du Rhône et de l'affluent dans la zone de confluence à la fin de la deuxième crue  $Q30_R - Q100_A$ , après les 200 heures de simulation. Le fond du lit modifié est repris pour la simulation du débit annuel qui servira de base pour l'évaluation des variantes. Afin d'avoir une vue d'ensemble plus complète, la visualisation de l'Annexe 7 correspondant aux hauteurs d'eau finales, ainsi qu'aux vitesses est recommandée. A noter que les images reprenant les vitesses sont agrandies sur la zone d'intérêt, en l'occurrence, la zone de confluence. La symbologie pour les vitesses est la suivante :

- Rouge (de 0.01 à 0.5 m/s),
- Orange (de 0.5 à 1 m/s),
- Bleu clair (de 1 à 3 m/s),
- Bleu foncé (supérieure à 3 m/s).

**Catégorie de « base » :**

- **Bo\_BASE** : Une érosion importante se forme à la suite du point dur du passage du canal de Bramois sous la Borgne. Cette spécificité est retrouvée pour toutes les variantes concernant la confluence de la Borgne. Nous observons aussi une déposition dans le chenal droit de la Borgne, empêchant le transport liquide pour des débits faibles. L'écoulement de l'affluent est concentré dans le chenal gauche. Nous retrouvons aussi une zone de dépôt à l'aval de la zone de confluence, en accord avec les recherches effectuées sur les embouchures.

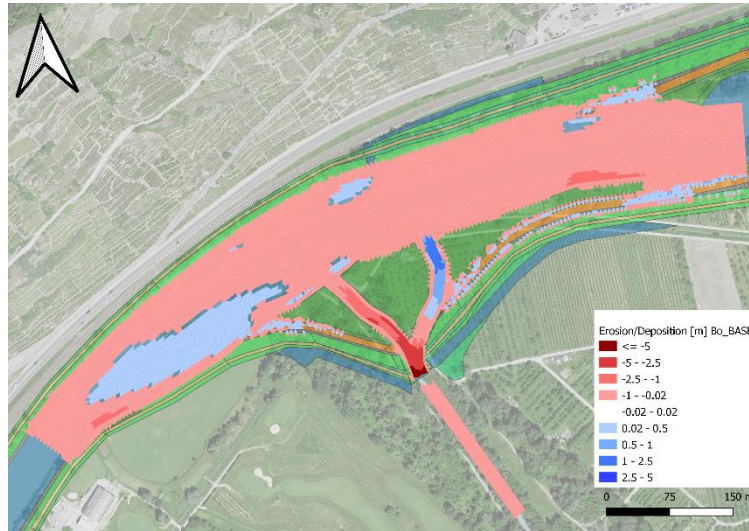


Figure 49 : Modification du lit Bo\_BASE

**Catégorie « 0 » :**

- **Bo\_01v1** : Nous avons à nouveau un affouillement profond à la suite du point dur. Une zone d'alluvionnement est présente à l'endroit où se trouvait l'îlot central précédemment, empêchant l'eau de parvenir dans cet espace. La zone de déposition à l'aval de la confluence est aussi présente. Nous retrouvons un écoulement préférentiel en rive gauche de la Borgne avec tout de même un écoulement avec de faibles hauteurs d'eau sur le côté droit de l'affluent.

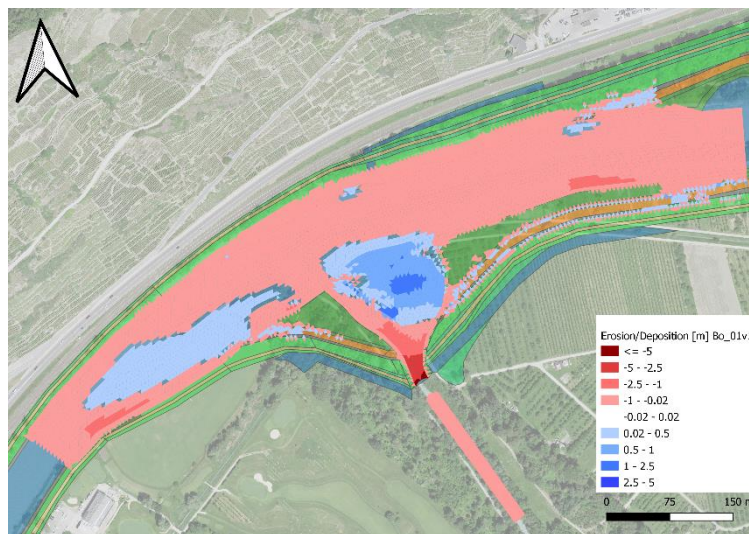


Figure 50 : Modification du lit Bo\_01v1

- **Bo\_01v2** : L'érosion due au passage du canal sous la Borgne est toujours présente. Une vaste zone de déposition se trouve à la rencontre de l'espace amont laissée à l'affluent avec le Rhône. La zone de dépôt post-confluence se trouve désormais vers la rive extérieure du Rhône. En s'intéressant aux hauteurs d'eau, nous constatons que l'adaptation de la bouche à l'amont permet aux eaux du Rhône de remonter dans l'espace de confluence, en contournant l'aire de dépôt. L'écoulement de l'affluent est concentré dans sa partie gauche, dans la même direction que l'écoulement du Rhône.

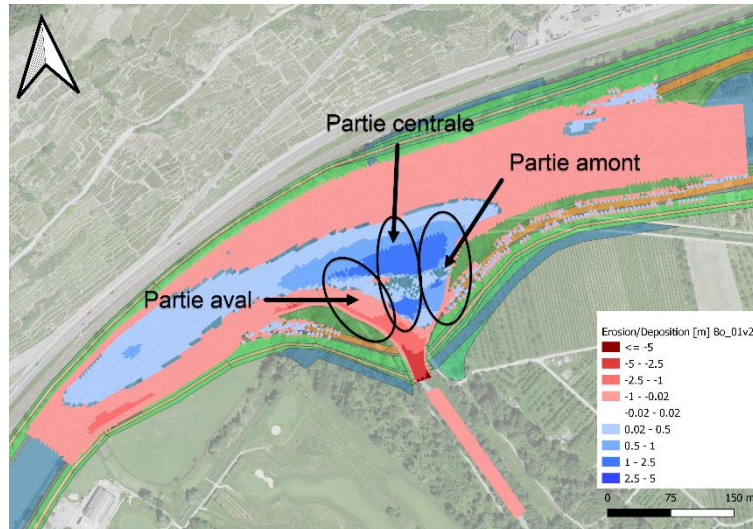


Figure 51 : Modification du lit Bo\_01v2

- **Bo\_02v1** : Le point dur crée une zone d'érosion à l'aval et un important espace de dépôt est constaté dans la zone de confluence, ainsi que dans la post-confluence. La rencontre des eaux provenant de l'affluent et du Rhône crée des zones de recirculation à la jonction des deux cours d'eau. Nous retrouvons un écoulement préférentiel en rive gauche de la Borgne avec aussi des faibles hauteurs d'eau dans la partie centrale et en rive droite.

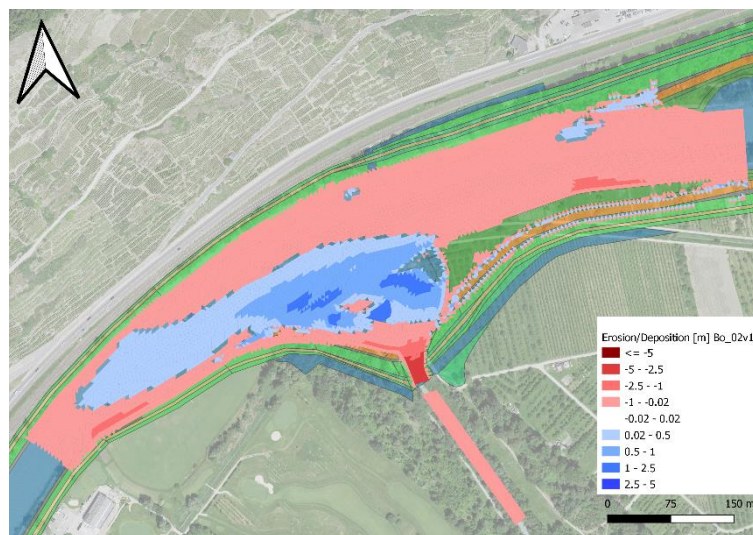


Figure 52 : Modification du lit Bo\_02v1



- **Bo\_02v2** : Le Rhône s'expand dans la zone de confluence et dans l'espace amont laissé libre à la suite de la suppression de l'îlot amont. Il en résulte une zone de dépôt importante le long de sa rive intérieure allant jusqu'à la rive extérieure dans la zone post-confluence. L'érosion du point dur est toujours présente. L'écoulement de l'affluent se concentre vers sa rive gauche du fait de la rencontre avec les eaux du Rhône qui le pousse dans leur direction.

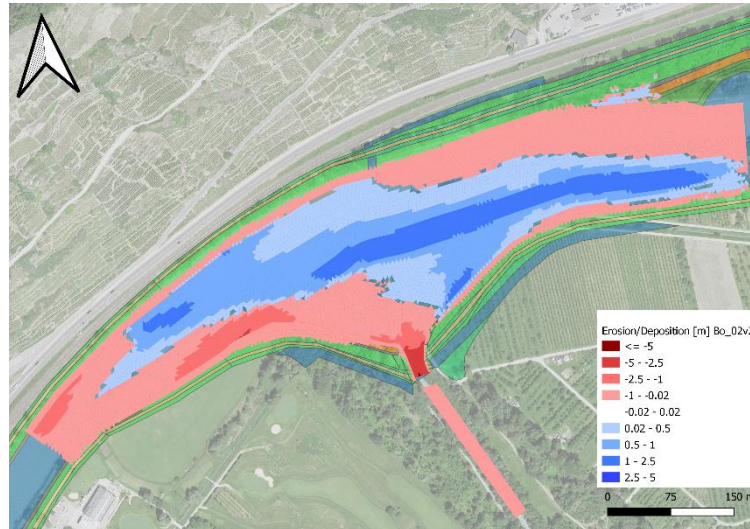


Figure 53 : Modification du lit Bo\_02v2

- **Bo\_02v3** : L'adaptation de la bouche en amont permet au Rhône de se glisser dans la zone de confluence. Les valeurs d'hauteur d'eau dans la partie centrale restent cependant faibles. Un dépôt important se forme dans cette zone centrale à la rencontre de la Borgne et du Rhône, se poursuivant dans la zone post-confluence. L'écoulement de l'affluent se concentre à nouveau essentiellement sur sa rive gauche. Nous retrouvons la zone d'érosion à l'entrée de la confluence.

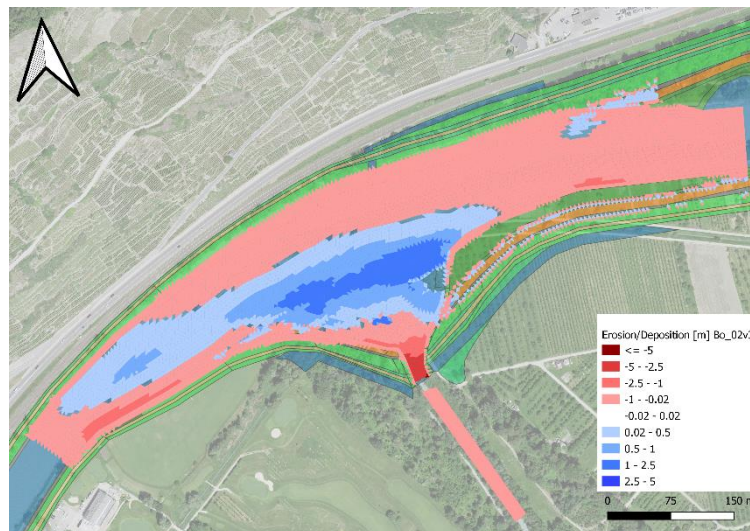


Figure 54 : Modification du lit Bo\_02v3

**Catégorie « 1 » :**

- **Bo\_1** : L'érosion du point dur est plus importante dans ce cas à cause du rétrécissement de l'espace disponible pour l'affluent. Ce tracé rectiligne entraîne une petite zone de dépôt à la confluence de la Borgne et du Rhône, à l'endroit correspondant à la zone de stagnation des travaux de Best (1987). Nous trouvons aussi la zone de déposition à l'aval de la confluence. Les hauteurs d'eau dans l'affluent sont de manière générale uniformes.

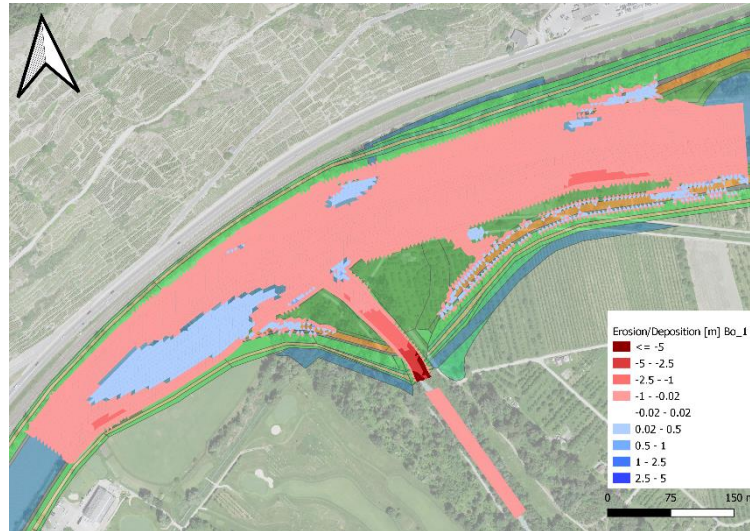


Figure 55 : Modification du lit Bo\_1

- **Bo\_1v1** : En élargissant ce chenal préférentiel, la faible zone de dépôt présente sur la figure précédente se transforme pour devenir plus importante et s'allonger en direction de l'affluent. Ce changement induit des vitesses et hauteurs d'eau plus faibles dans cet espace. Le point dur fait toujours office de zone d'importants affouillements avec un espace de déposition à l'aval de la confluence. Nous remarquons aussi un écoulement de l'eau préférentiel en rive gauche de la Borgne.

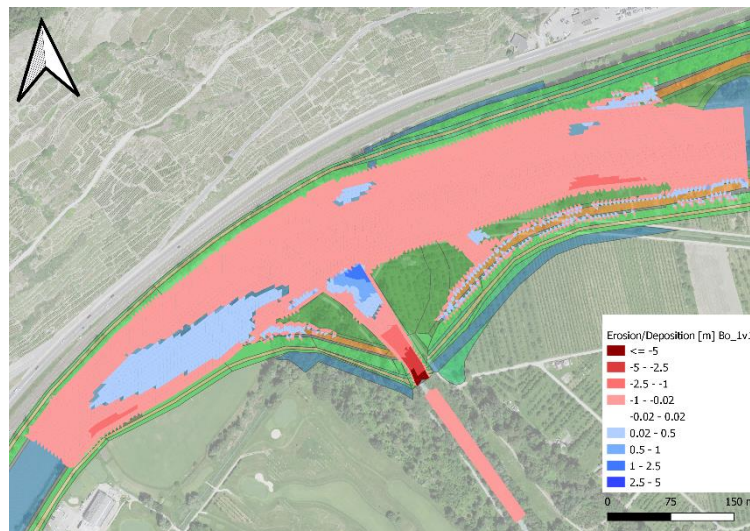


Figure 56 : Modification du lit Bo\_1v1



**Catégorie « 2 » :**

- **Bo\_2** : L'effet final des formes géométriques ne démontrent pas d'impact majeur du fait de leur rapide dégradation induite par les crues du Rhône et de l'affluent, ainsi que des valeurs élevées de débit. Nous constatons une plus grande zone de dépôt à l'aval de la confluence du fait de la détérioration de ces formes. La partie amont et centrale de la confluence enregistre des vitesses et hauteurs d'eau relativement faibles avec un cheminement de l'écoulement concentré en rive gauche de l'affluent.

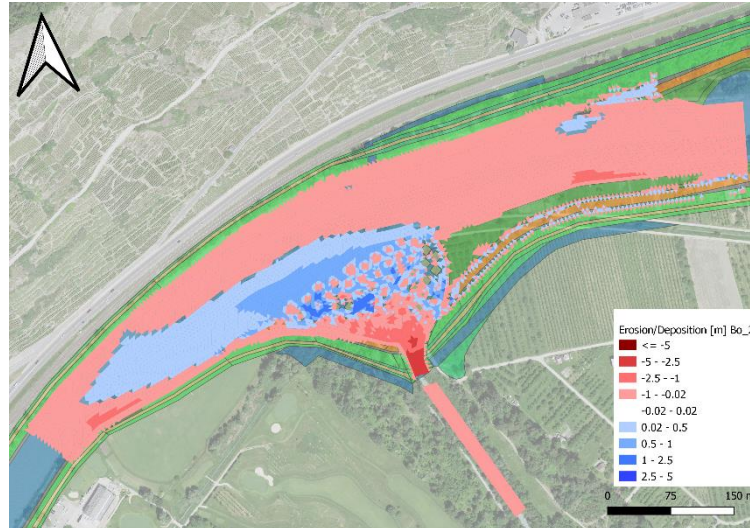


Figure 57 : Modification du lit Bo\_2

- **Bo\_2v1** : Une disposition différente de ces carrés n'affecte pas nécessairement le résultat final pour les hauteurs d'eau, les vitesses et le transport solide. Nous retrouvons une zone de dépôt importante dans la partie centrale et à l'aval de la confluence pour les mêmes raisons que celles citées précédemment. L'érosion du point dur est toujours présente et les eaux de l'affluent converge vers la rive gauche de la Borgne avec de faible valeur de profondeur et de vitesse dans la partie centrale de la confluence.

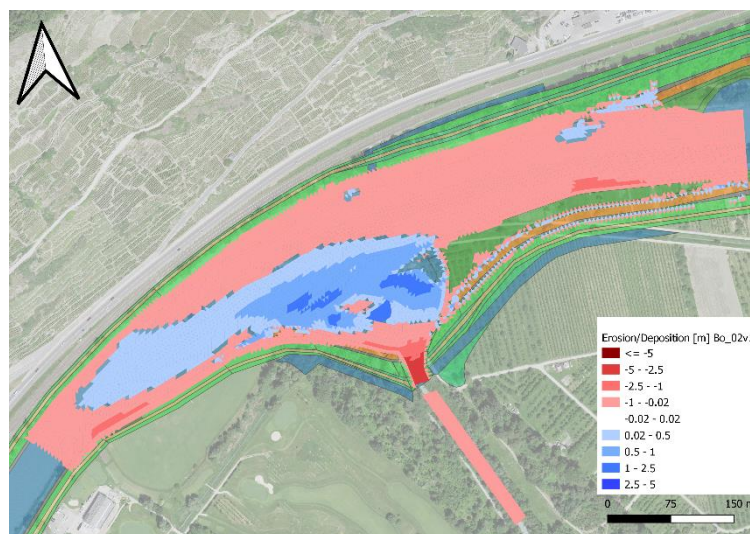


Figure 58 : Modification du lit Bo\_2v1

- **Bo\_2v2** : L'adaptation de la bouche en amont permet au Rhône de se déverser dans la zone d'embouchure. A nouveau, l'effet de l'érosion des formes géométriques conduit à une forte zone de déposition à la rencontre du Rhône et de l'espace amont réservé à la confluence. Un écoulement préférentiel du côté gauche de la Borgne est constaté.

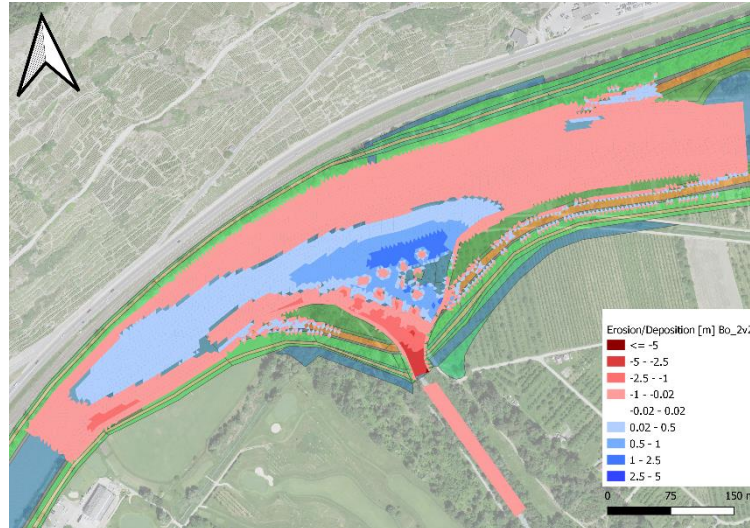


Figure 59 : Modification du lit Bo\_2v2

- **Bo\_2v3** : Un très faible écoulement est constaté sur la rive droite de l'affluent, la majorité se répandant en rive gauche. Une importante déposition a lieu dans la partie centrale et amont de la confluence. Les carrés sont encore une fois érodés, de même que la partie aval du point dur. La zone de dépôt post-confluence est rattachée à la rive intérieure.

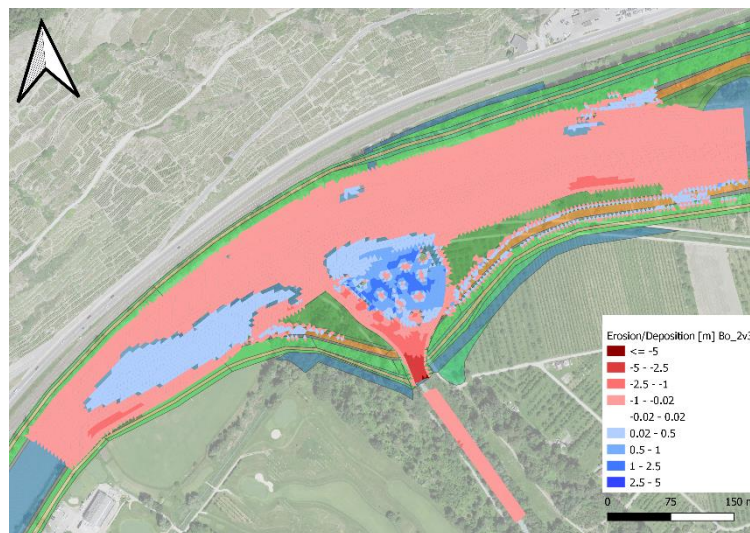


Figure 60 : Modification du lit Bo\_2v3



**Catégorie « 3 » :**

- **Bo\_3** : L'effet de cette configuration de déflecteur induit la formation de zone de déposition à l'amont et à l'aval de ce dernier de même que dans la zone centrale et amont de confluence. L'îlot amont est fortement érodé par la force d'écoulement du Rhône. Il en résulte que les eaux du Rhône à l'amont retrouvent une hauteur d'eau globalement uniforme. Les hauteurs d'eau faibles présentes dans la partie amont et centrale de la zone de confluence proviennent du Rhône tandis que l'affluent chemine le long de sa rive gauche.

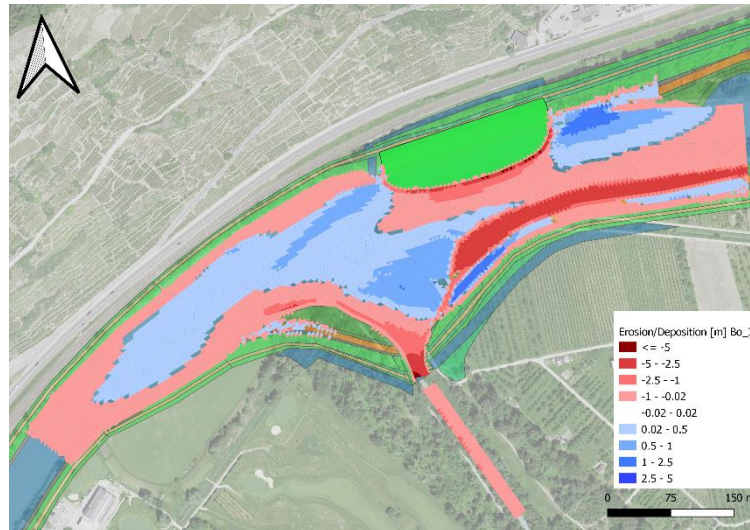


Figure 61 : Modification du lit Bo\_3

- **Bo\_3v1** : En adoptant un déflecteur plus imposant, les zones de déposition à l'amont et à l'aval de ce dernier augmentent de valeur. L'érosion de l'îlot amont est toujours marquée mais la déposition dans la zone centrale et amont de la confluence est abaissée. L'effet du déflecteur fait remonter les eaux du Rhône plus à l'intérieur de la zone de confluence. Le tracé de l'affluent suit son côté gauche et l'érosion du point dur est toujours présente.

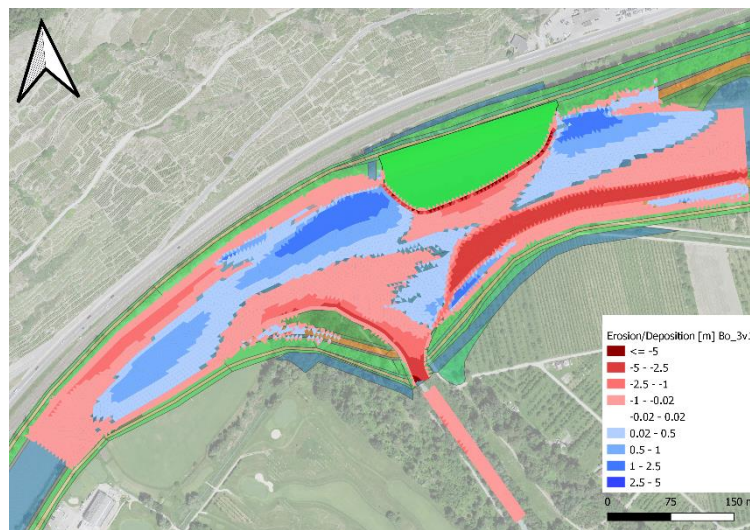


Figure 62 : Modification du lit Bo\_3v1

### 5.2.2 Résultats secteur Lienne

Les résultats finaux obtenus par la concomitance des crues du Rhône et de la Lienne correspondent de nouveau à la différence d'élévation du terrain. Une brève description des données calculées est reprise dans ce sous-chapitre. Les hauteurs d'eau finales ainsi que les vitesses sont disponibles en Annexe 8 et leur visualisation est à nouveau recommandée. Les images correspondantes aux vitesses sont concentrées sur la zone de rencontre entre le Rhône et son affluent.

#### Catégorie de « base » :

- **Li\_BASE** : Nous constatons, comme pour les cas Borgne, une érosion importante à la suite du lit fixé par le modèle. Le cheminement principal de l'eau est concentré sur la partie droite de la Lienne (dans son sens d'écoulement), induit par la présence de l'ouvrage de dérivation. Le chenal, sensé accueillir les eaux dérivées, n'est pas en eau à la fin de la simulation avec du dépôt en son sein. Les eaux du Rhône remontent sur l'îlot central et nous constatons une importante zone de déposition juste à l'aval de cet îlot.

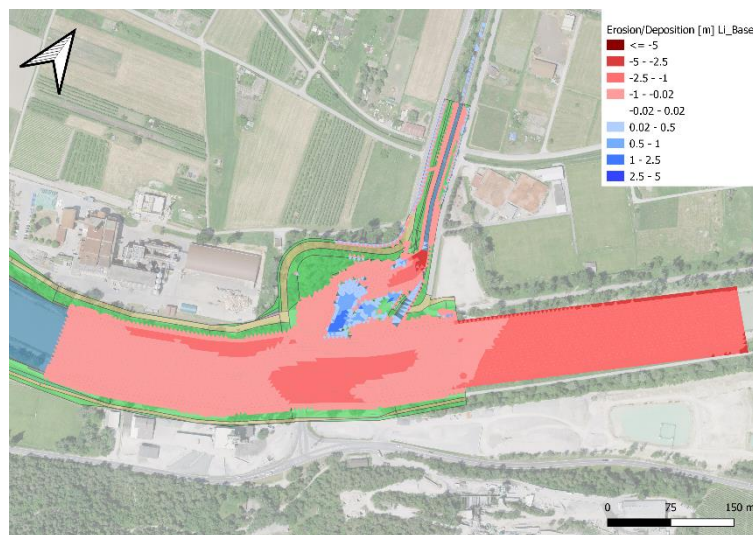


Figure 63 : Modification du lit Li\_BASE

**Catégorie « 0 » :**

- **Li\_0** : Une importante zone d'alluvionnement remplace l'îlot central et recouvre la partie aval de la zone de confluence. L'érosion du point dur est constatée. L'écoulement est séparé par la zone centrale de dépôt.

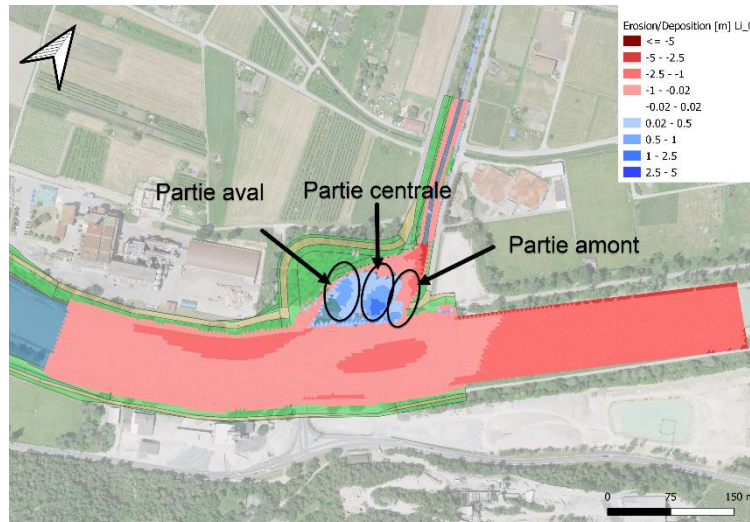


Figure 64 : Modification du lit Li\_0

- **Li\_01** : Une zone principale de déposition est visible dans la partie centrale de la confluence. En s'intéressant aux hauteurs d'eau et aux vitesses, nous constatons que l'écoulement principal se trouve le long de la rive gauche de la Lienne. La formation de la zone de dépôt central pousse minoritairement l'eau sur la partie aval de la zone de confluence.

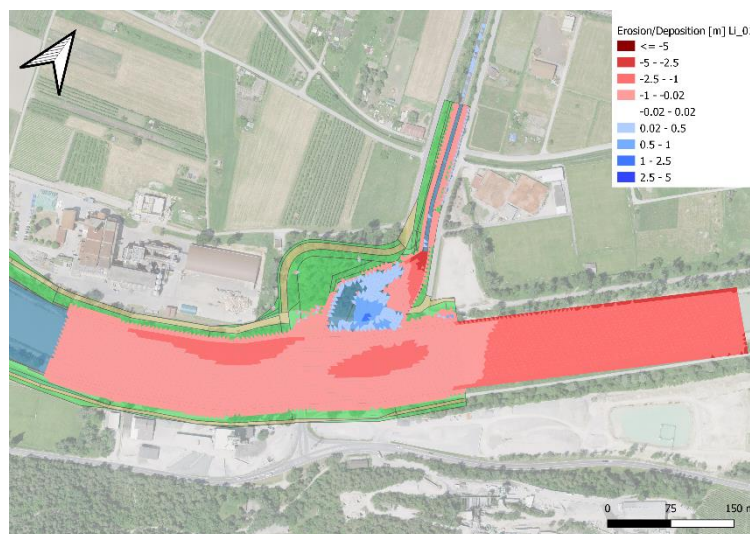


Figure 65 : Modification du lit Li\_01



- **Li\_02** : Des zones de déposition sont constatées le long de la zone de confluence, avec des valeurs plus élevées pour la partie centrale et aval de l'embouchure. Ce dépôt central divise le courant de la Lienne sur son espace gauche et droit.

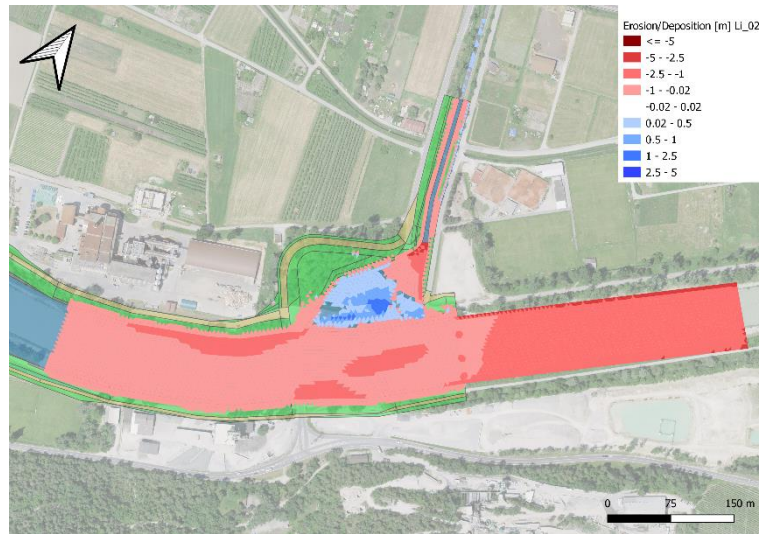


Figure 66 : Modification du lit Li\_02

- **Li\_03** : En augmentant la surface disponible pour le cours d'eau, ce dernier se répand de manière plus uniforme dans la confluence. Une zone de dépôt se forme cette fois-ci majoritairement dans la partie amont de l'espace de rencontre des cours d'eau. La déposition en amont et au centre est présente toutefois. L'érosion induite par la partie fixée est importante, conduisant à une hauteur d'eau élevée. L'écoulement principal se forme dans l'espace central de la confluence.

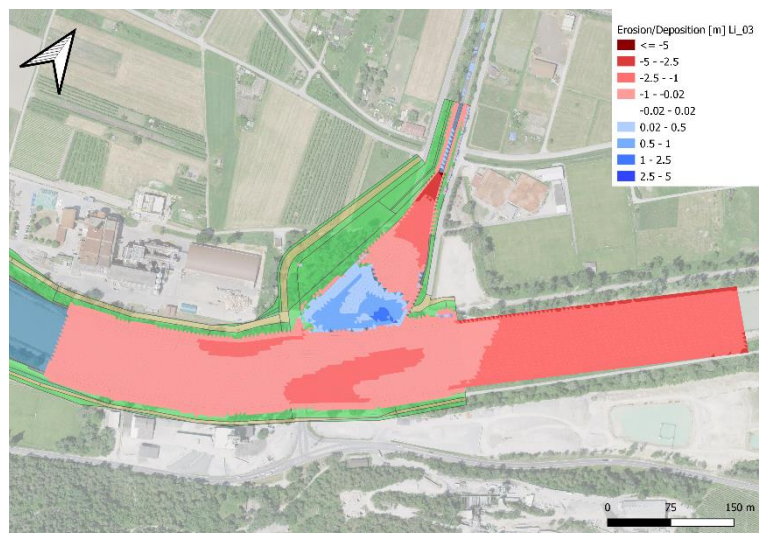


Figure 67 : Modification du lit Li\_03

**Catégorie « 1 » :**

- **Li\_1** : Le chenal préférentiel entraîne une importante zone d'érosion au droit de la partie fixée. Un faible dépôt est constaté à la rencontre des deux cours d'eau. L'écoulement suit le tracé du chenal principal jusqu'à la jonction où la force du courant du Rhône peut pousser des eaux dans la partie aval de la zone de confluence.

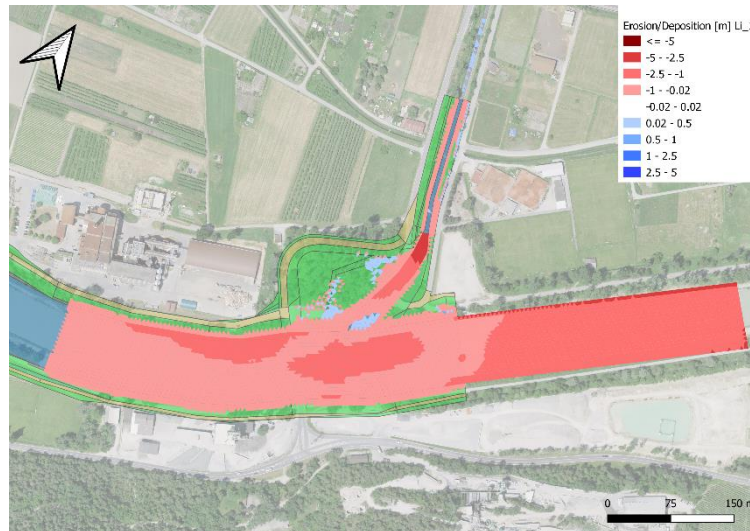


Figure 68 : Modification du lit Li\_1

**Catégorie « 2 » :**

- **Li\_2** : L'utilisation des formes géométriques dévie l'écoulement sur la rive gauche de la Lienne. Nous constatons, comme pour la Borgne, une dégradation de ces carrés conduisant à une zone de dépôt à l'intérieur de la zone de confluence, concentrée sur la partie centrale et aval.

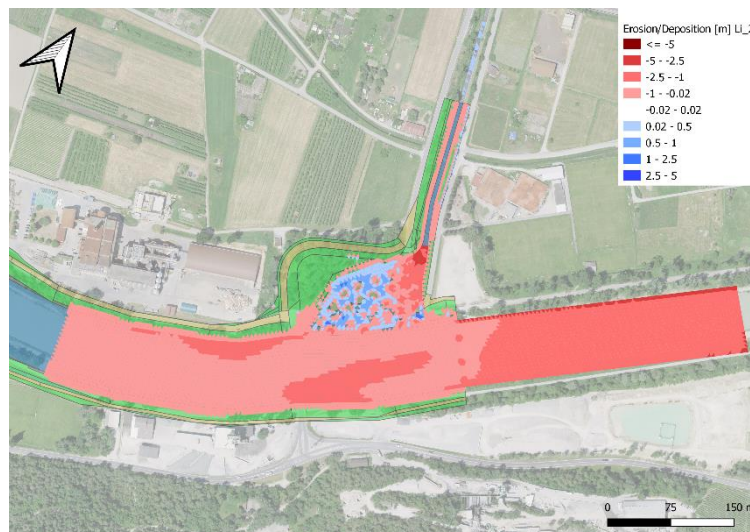


Figure 69 : Modification du lit Li\_2

- **Li\_2v1** : En réduisant le nombre de formes, nous retrouvons des hauteurs d'eaux faibles sur la quasi-totalité de l'embouchure. La zone de déposition centrale et aval ne remonte pas autant que la variante Li\_2, mais reste néanmoins présente et importante. La lecture des vitesses nous indique un écoulement principal à nouveau rattaché à la rive gauche de la Lienne, avec une partie se déplaçant dans la zone centrale de la confluence.

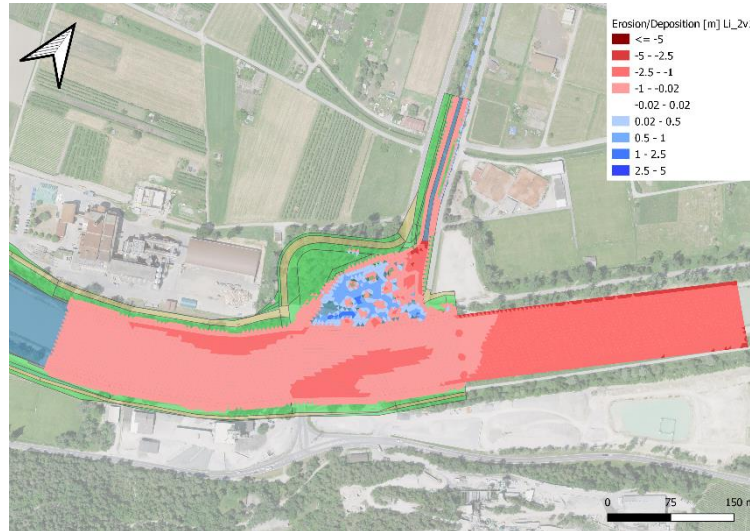


Figure 70 : Modification du lit Li\_2v1

La présentation des résultats de la concomitance des crues étant faites, nous pouvons passer à la modélisation du débit annuel.

### 5.3 Modélisation hydrodynamique annuelle

Comme expliqué précédemment, la modélisation hydrodynamique est l'étape principale permettant la comparaison des résultats. Afin de déterminer l'impact environnemental et hydraulique des différentes configurations, un débit annuel a été choisi. Ce dernier permet une comparaison des variantes avec les cours d'eau dans leur état « normal », non-influencé par des valeurs de crues importantes. Comme le transport solide n'est plus pris en compte dans cette simulation, les parties fixées du modèle précédent n'ont plus besoin de l'être et la résolution du maillage pour le fond du lit a pu être augmentée à 0.5 m. Cette élévation de résolution induit également une forte augmentation des éléments compris dans le maillage, qui passe de 10'000 à environ 660'000 pour la Lienne et qui passe de 15'000 éléments à 900'000 pour la Borgne. A noter que deux simulations supplémentaires aux configurations proposées ont été effectuées. Il s'agit de la Borgne et de la Lienne dans leur état actuel afin de permettre une comparaison avec les variantes et ainsi déterminer si les aménagements prévus auront un effet bénéfique sur la zone de confluence. La simulation s'étend sur une durée de 5h, afin d'avoir un écoulement stationnaire et pour faire parvenir l'eau jusqu'aux limites de la zone d'étude. Les résultats (vitesse et hauteur d'eau) seront par la suite repris dans la matrice comparative pour permettre l'évaluation des différentes variantes.

#### 5.3.1 Résultats secteur Borgne

Ce sous-chapitre reprend la même forme que celui concernant la modélisation morphodynamique. Le rendu présenté sous cette section correspond aux hauteurs d'eau présentes dans la zone modélisée pour un écoulement stationnaire, reprenant le débit annuel. La visualisation des vitesses est disponible



en Annexe 9 et est à nouveau focalisée sur la rencontre des deux cours d'eau, avec la même symbologie qu'auparavant.

**Catégorie de « base » :**

- **Bo\_actu** : L'image reprend la situation actuelle du Rhône et de la Borgne. Nous observons des hauteurs d'eau uniformes le long de ces deux tracés. La présence du seuil sur l'affluent est constatée avec une augmentation des vitesses et une réduction de la profondeur d'eau juste à l'amont de la confluence.

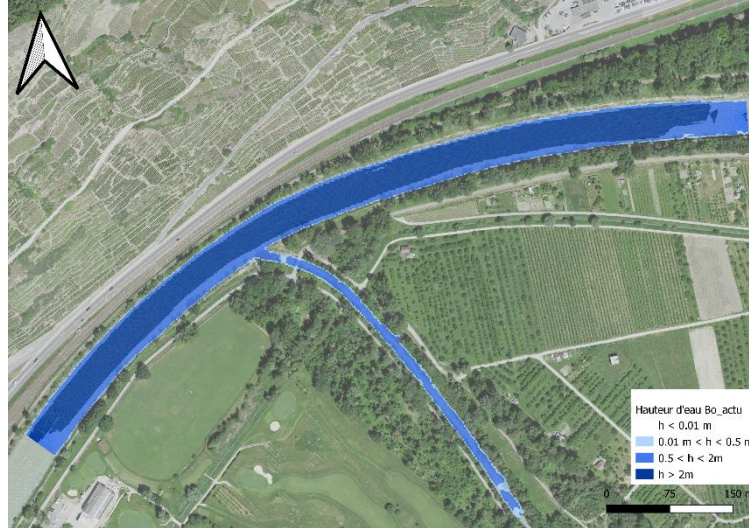


Figure 71 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_actu

- **Bo\_BASE** : L'écoulement suit le chenal gauche, alors que le chenal droit se retrouve asséché pour un débit annuel. Les hauteurs d'eau dans le chenal rempli sont uniformes. La pénétration des eaux du Rhône dans l'autre chenal est empêchée avec la formation d'un bouchon dû à la déposition.

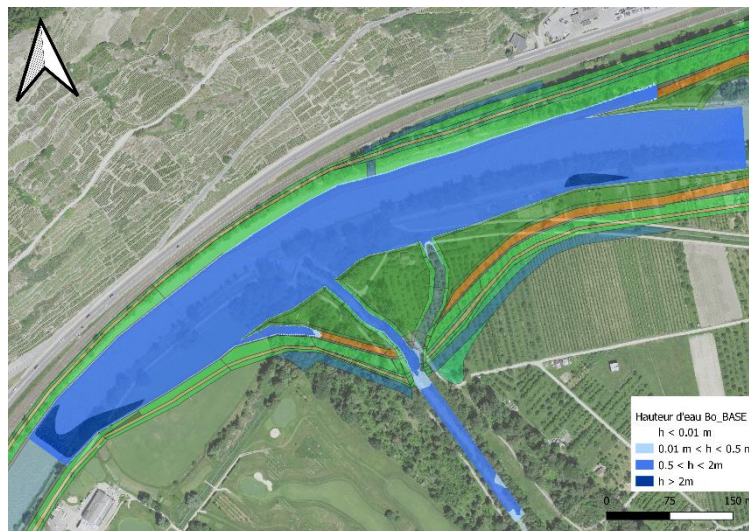


Figure 72 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_BASE



**Catégorie « 0 » :**

- **Bo\_01v1** : L'écoulement de la Borgne est concentré sur sa rive gauche. Nous observons un écoulement secondaire en direction de la zone centrale de la confluence. Les eaux du Rhône peuvent remonter dans la partie amont de l'embouchure, créant une zone de recirculation de l'eau.

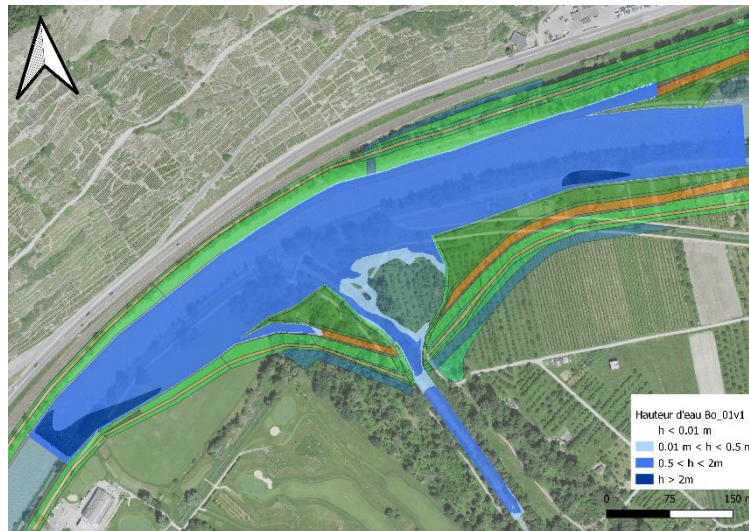


Figure 73 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_01v1

- **Bo\_01v2** : L'adaptation de la bouche à l'amont permet au Rhône de remonter dans la zone de confluence et de la traverser avec des hauteurs d'eau faibles. La zone de forte déposition visible est facilement observable et correspond à la partie non mouillée de la zone centrale de la confluence. L'écoulement préférentiel en rive gauche est constaté.

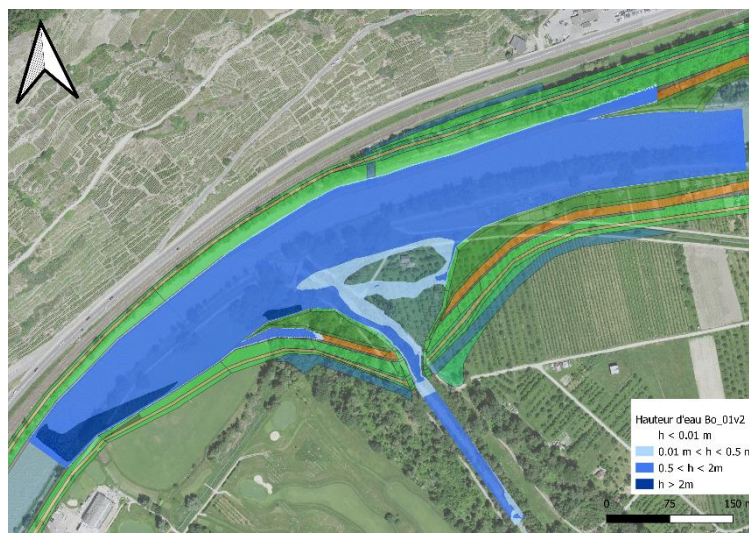


Figure 74 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_01v2

- **Bo\_02v1** : Les différentes zones de déposition se manifestent dans la forme des écoulements secondaires dans la partie centrale de la zone de confluence. Ces derniers sont de faible profondeur avec une vitesse réduite. L'eau provenant de l'affluent embrasse la rive gauche de la Borgne. L'entrée du Rhône dans la zone amont de l'embouchure est perçue, avec de la recirculation.

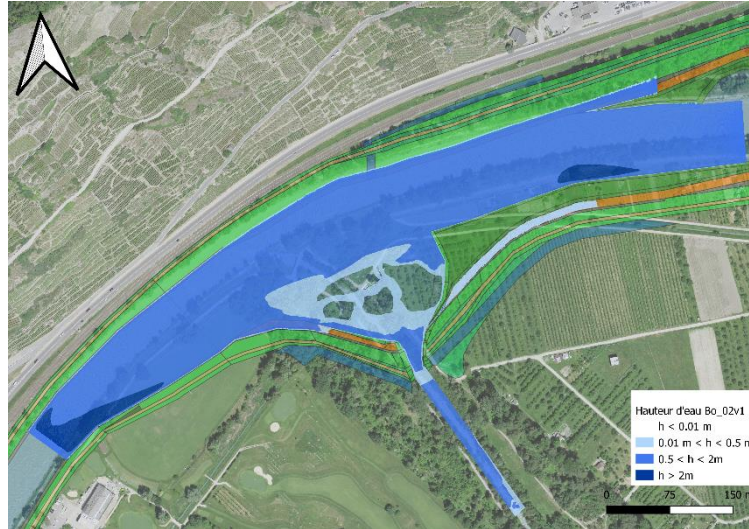


Figure 75 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_02v1

- **Bo\_02v2** : La large zone de déposition présente depuis le début du modèle jusqu'à sa presque extrémité est observée avec des profondeurs d'eau abaissées pour le Rhône. La zone de confluence est totalement mouillée et une diversité de profondeur d'eau apparaît dans la zone post-embouchure.

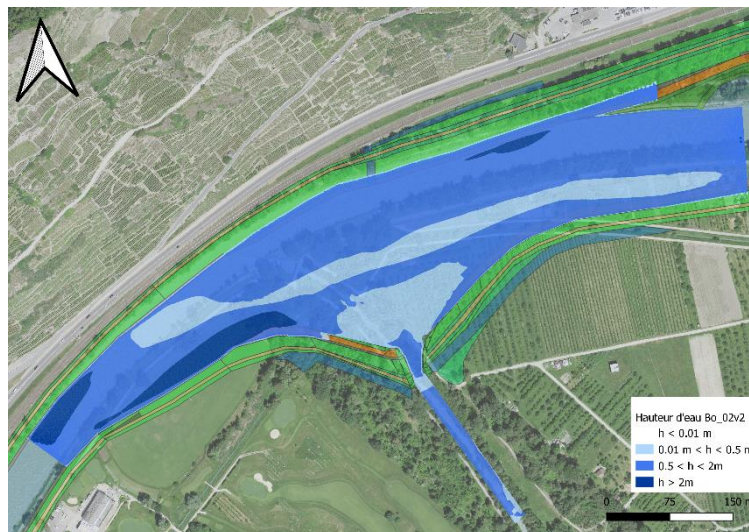


Figure 76 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_02v2



- **Bo\_02v3** : Le dépôt induit par la concomitance des crues empêche l'écoulement de l'eau à l'intérieur de la zone amont de la confluence. Nous retrouvons un écoulement préférentiel en rive gauche de la Borgne avec des écoulements secondaires dans sa partie centrale. L'adaptation de la bouche en amont permet l'intrusion des eaux du Rhône.

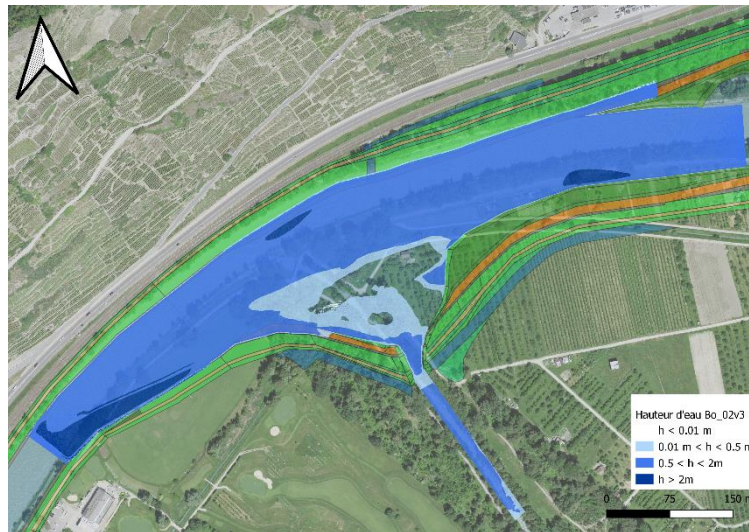


Figure 77 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_02v3

**Catégorie « 1 » :**

- **Bo\_1** : Le cheminement de l'eau au travers du chenal est relativement uniforme. La jonction des deux cours d'eau se fait sans aucun impact notable. La faible zone de dépôt à l'amont de l'embouchure entraîne une réduction de vitesse.

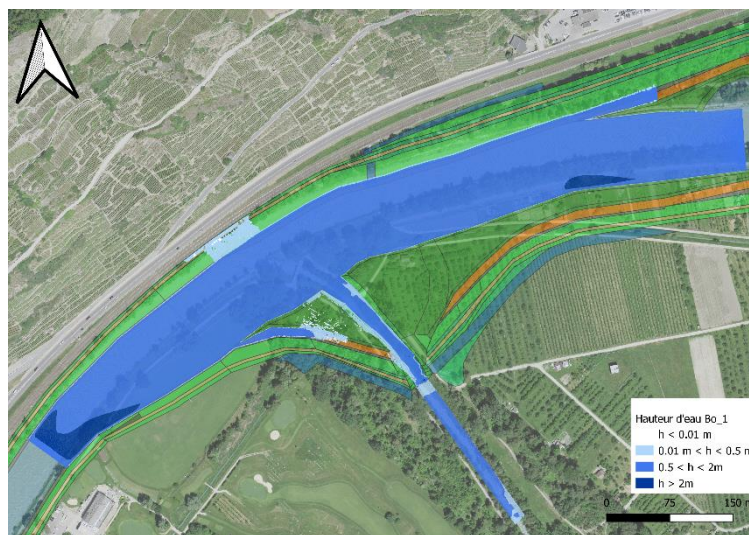


Figure 78 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_1

- **Bo\_1v1** : L'écoulement se fait à nouveau en rive gauche de la Borgne et est influencé en plus par la zone de déposition en amont l'embouchure qui entraîne l'écoulement du côté opposé. L'impact de l'érosion au droit du point dur entraîne une augmentation de la profondeur d'eau et de vitesse.

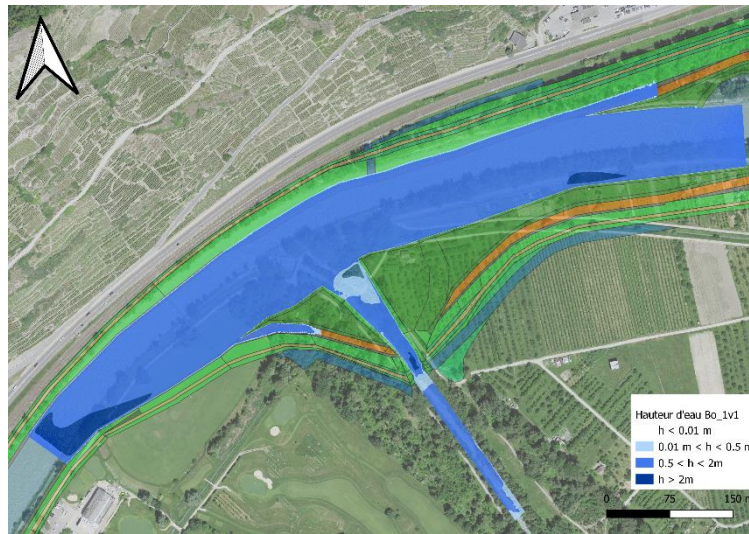


Figure 79 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_1v1

**Catégorie « 2 » :**

- **Bo\_2** : L'effet d'érosion des crues sur les formes géométriques les a fortement rabaissées, passant de 1.5 mètre à 0.5 mètre. Néanmoins, pour des valeurs de débits faibles, ces carrés permettent la déflexion de l'affluent au travers de l'embouchure avec une préférence d'écoulement en rive gauche. Les plus hautes zones de déposition empêchent le passage de l'eau. A noter aussi que les formes les plus proches de l'arrivée de l'affluent se retrouvent recouvertes par l'écoulement.

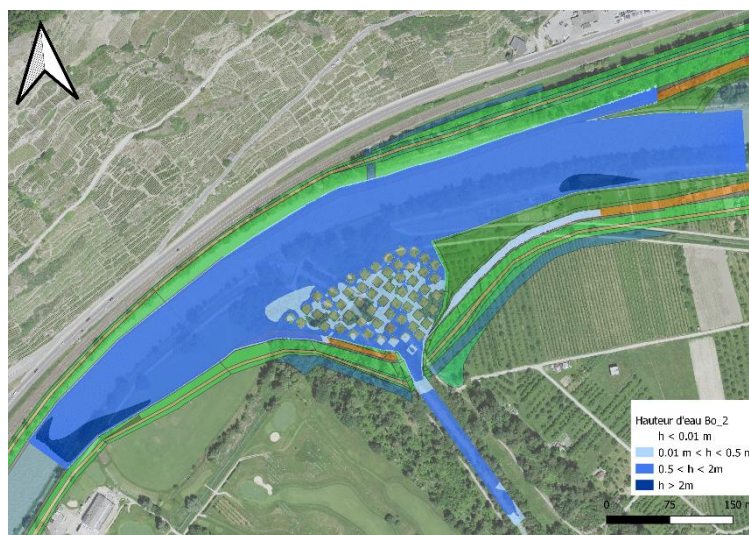


Figure 80 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_2



- **Bo\_2v1** : La réduction du nombre de formes diminue l'espace de recouvrement de l'eau dans la zone de confluence. Les zones de dépôt les plus importantes empêchent le passage de l'eau ou réduisent sa profondeur. Un cheminement en rive gauche est à nouveau constaté.

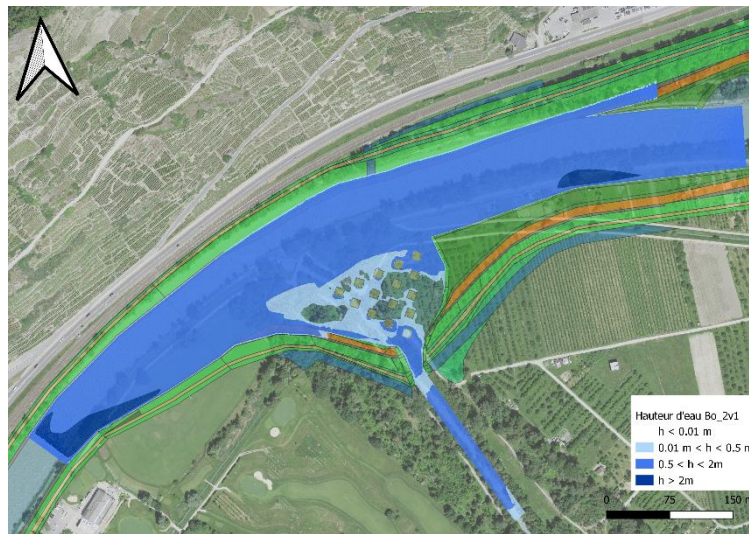


Figure 81 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_2v1

- **Bo\_2v2** : L'adaptation de la bouche en amont permet l'arrivée des eaux du Rhône dans la partie amont de l'embouchure, en contournant la zone de dépôt la plus élevée. La déflexion de l'affluent est constatée dès la première forme et l'entraîne sur son côté gauche.

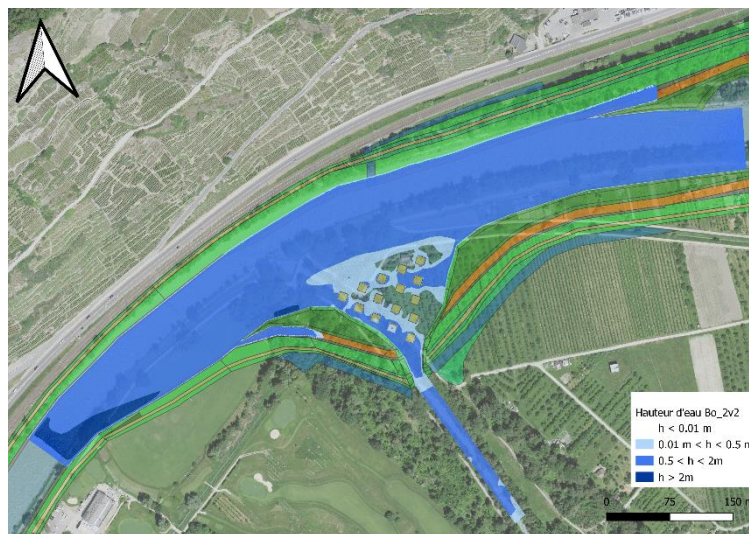


Figure 82 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_2v2

- **Bo\_2v3** : La zone centrale de la confluence est à l'air libre du fait de l'importante zone d'alluvionnement en son sein. Une faible quantité d'eau provenant du Rhône est visible dans la partie amont de l'embouchure, alors que la quasi-totalité d'eau de l'affluent est concentré sur sa rive gauche.

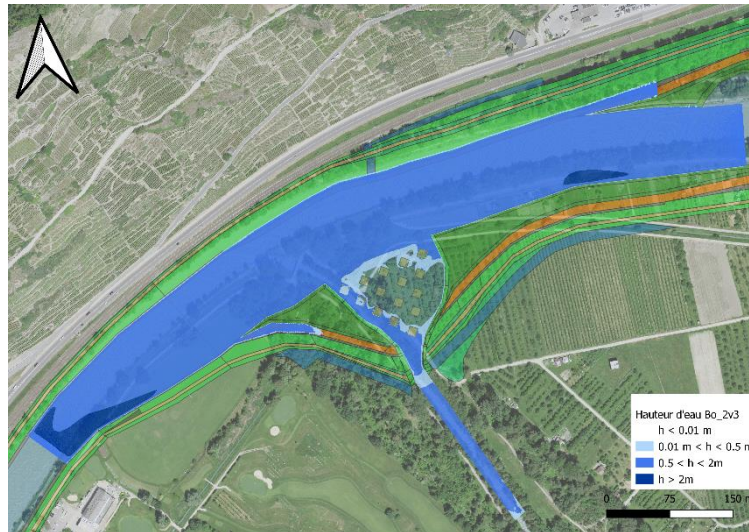


Figure 83 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_2v3

**Catégorie « 3 » :**

- **Bo\_3** : La présence du déflecteur crée une zone sèche à l'amont de ce dernier. La zone centrale de confluence est non mouillée du fait de la surface de déposition. L'écoulement de l'affluent suit la trajectoire sur son côté gauche.

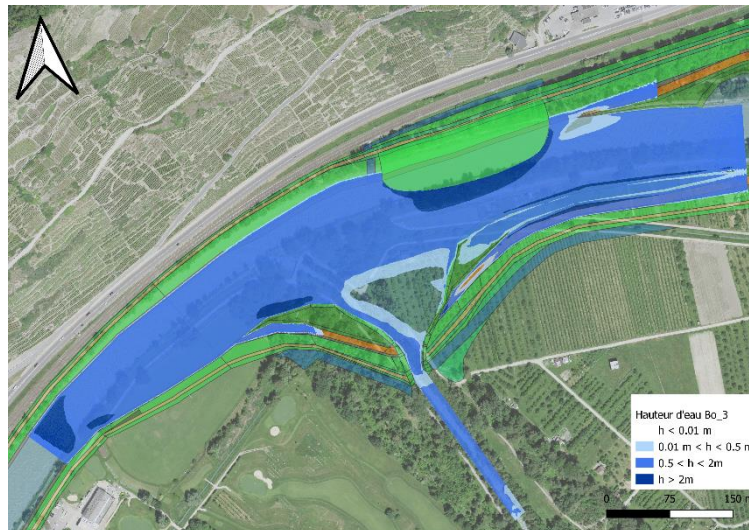


Figure 84 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_3



- **Bo\_3v1** : En implantant un déflecteur de plus grande envergure, des zones sèches plus importantes sont constatées à son amont et à son aval. Sa présence pousse les eaux du Rhône à rentrer à l'intérieur de la zone de confluence. Nous retrouvons un écoulement préférentiel le long de la berge gauche de la Borgne.

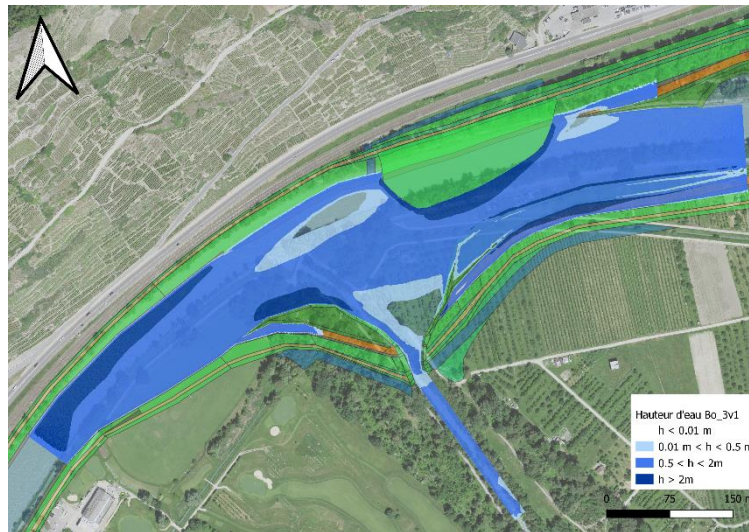


Figure 85 : Hauteur d'eau débit annuel Bo\_3v1

### 5.3.2 Résultats secteur Lienne

La présentation des résultats pour le secteur Lienne pour une crue annuelle suit la même disposition que celle utilisée au sous-chapitre précédent. Les images représentent les hauteurs d'eau, avec en Annexe 10 les vitesses à la rencontre des deux cours d'eau. La situation actuelle de la Lienne est aussi rajoutée.

#### Catégorie de « base » :

- **Li\_actu** : Nous observons le tracé rectiligne des deux cours d'eau, avec des hauteurs uniformes. La répartition des vitesses à l'intérieur de la Lienne est relativement variée avec des vitesses faibles sur les bords et un écoulement plus rapide en son milieu.

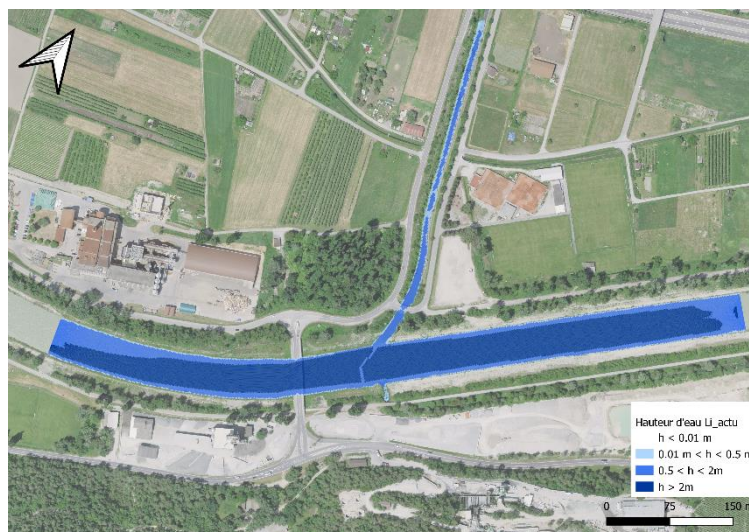


Figure 86 : Hauteur d'eau débit annuel Li\_actu

- **Li\_BASE** : L'élargissement du Rhône abaisse ses profondeurs d'eau. En regardant la zone de confluence, l'écoulement de l'affluent est dirigé sur sa rive droite du fait de la présence de l'îlot central et de l'ouvrage de dérivation. L'effet d'érosion sur le fond de la concomitance des crues permet aux eaux de l'affluent de passer sur les aménagements prévus dans la partie aval de la zone de confluence, en contournant la zone de dépôt à proximité de l'îlot central.

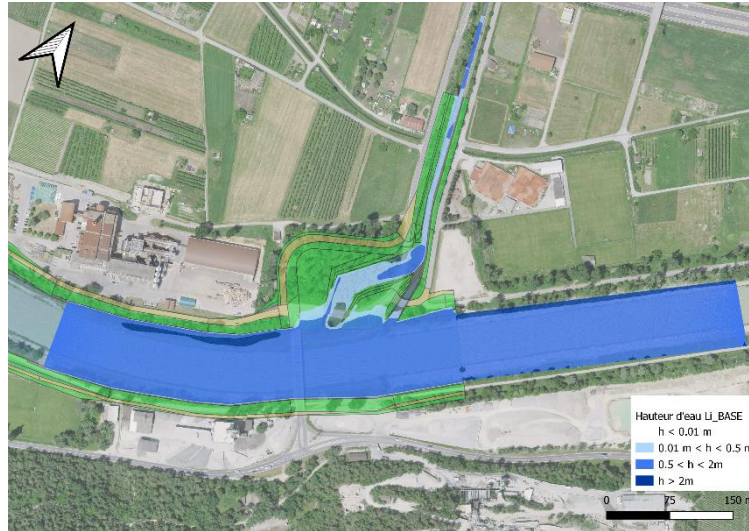


Figure 87 : Hauteur d'eau débit annuel Li\_BASE

**Catégorie « 0 » :**

- **Li\_0** : L'effet de déflecteur de l'îlot central est remplacé par la zone importante de dépôt présente dans la partie centrale de l'embouchure. L'affluent est séparé en deux lors de son entrée dans la confluence et rejoint le Rhône sous deux bras.

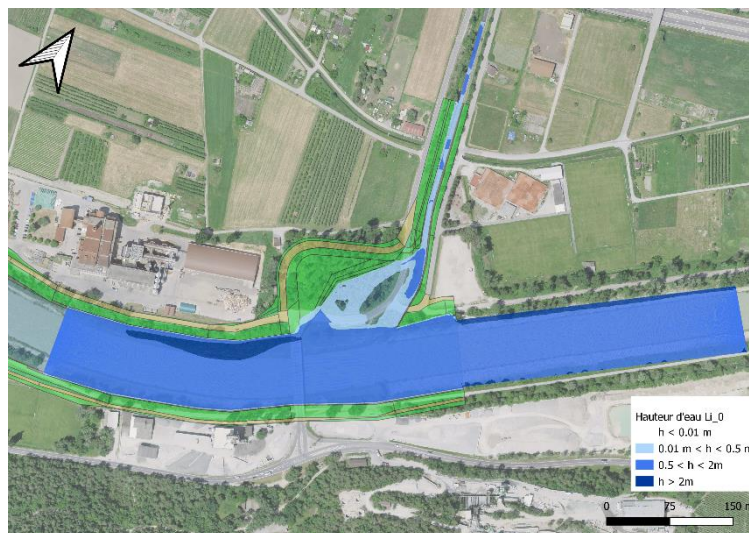


Figure 88 : Hauteur d'eau débit annuel Li\_0



- **Li\_01** : L'espace de déposition pousse l'écoulement de la Lienne sur sa rive gauche jusqu'au Rhône. Une zone de recirculation est présente dans la partie aval de la confluence du fait de la rencontre des eaux de l'affluent avec celles du Rhône. Ces dernières repoussent l'écoulement de la Lienne vers les aménagements en aval, créant ainsi un contact, générant la zone de recirculation.

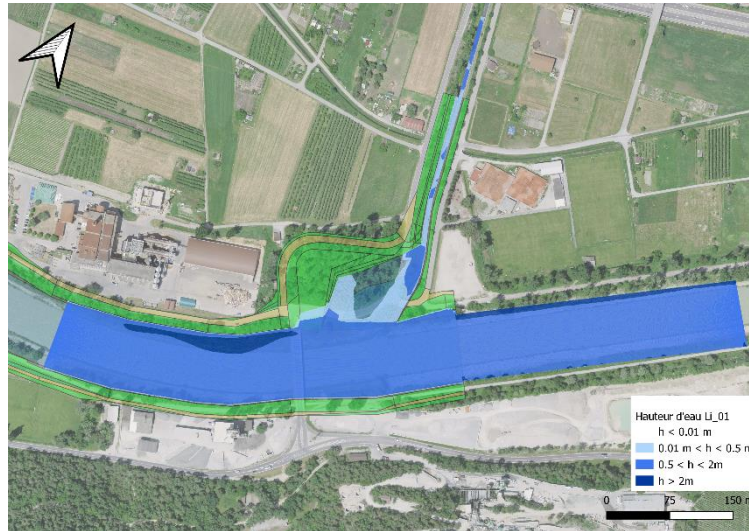


Figure 89 : Hauteur d'eau débit annuel Li\_01

- **Li\_02** : Les eaux provenant de la Lienne se scindent suite à la présence des zones de dépôt, en les contournant. L'écoulement de la zone centrale est plus rapide que celui dans l'espace aval. Les zones sèches de l'embouchures correspondent à ces espaces de déposition.

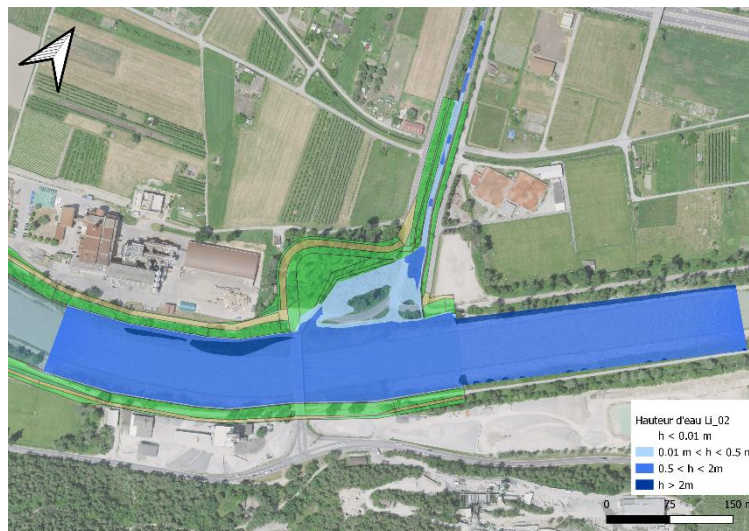


Figure 90 : Hauteur d'eau débit annuel Li\_02

- **Li\_03** : L'augmentation de l'espace disponible au cours d'eau génère une plus grande surface couverte par l'écoulement. Ce dernier crée son cheminement le long de la rive droite de la Lienne, impacté aussi par la présence de dépôt dans la partie centrale de la confluence.

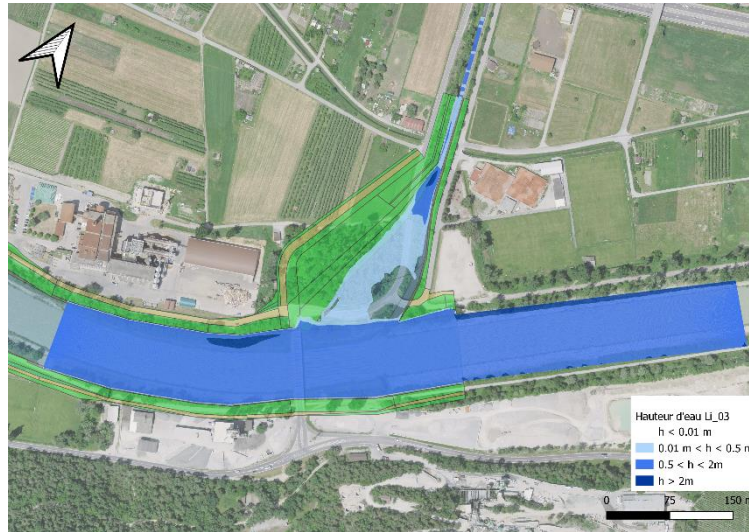


Figure 91 : Hauteur d'eau débit annuel Li\_03

**Catégorie « 1 » :**

- **Li\_1** : L'écoulement de l'affluent suit le tracé défini par le chenal préférentiel jusqu'à sa connexion avec le Rhône. La portion aval de l'embouchure est en partie mouillée du fait de cette rencontre. La petite zone de déposition à la confluence induit une réduction de vitesse.

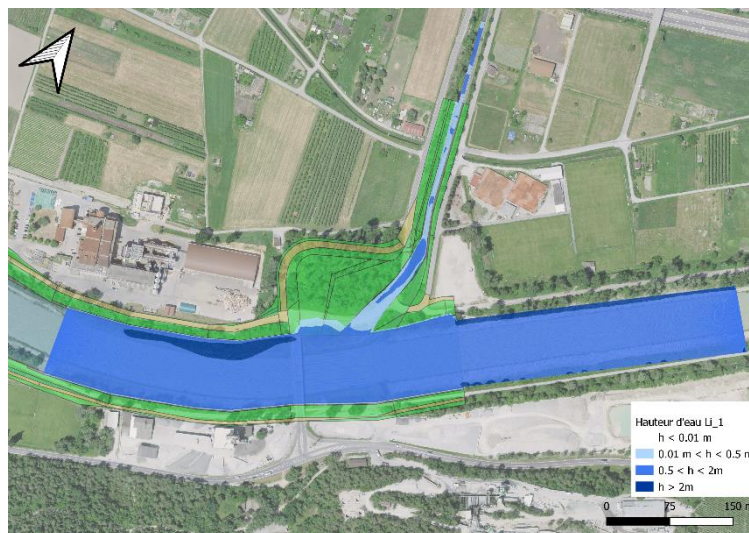


Figure 92 : Hauteur d'eau débit annuel Li\_1



**Catégorie « 2 » :**

- **Li\_2** : Comme pour la Borgne, les formes géométriques ont été fortement érodées mais sont toujours présentes, avec une élévation moindre. Elles permettent tout de même la déflexion des eaux de l'affluent vers sa rive gauche. L'écoulement du Rhône est également perturbé par la rencontre avec ces carrés, formant des zones de recirculation dans la zone aval de la confluence, visibles avec la direction des vecteurs de vitesse.

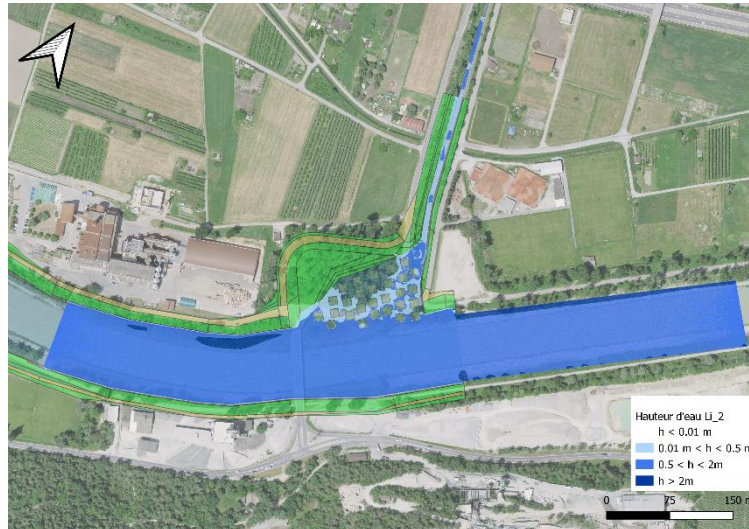


Figure 93 : Hauteur d'eau débit annuel Li\_2

- **Li\_2v1** : En disposant ces formes de manière plus symétrique, l'écoulement de l'affluent est plus également réparti dans la zone de confluence. Les zones non mouillées correspondent aux espaces les plus impactés par le processus d'alluvionnement. Une zone de recirculation est aussi formée suite à la rencontre du Rhône, de l'affluent et des aménagements dans la partie aval de l'embouchure.

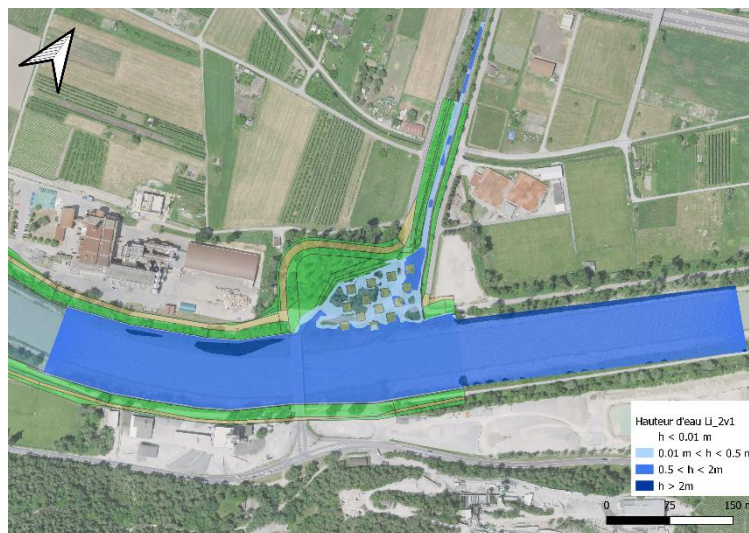


Figure 94 : Hauteur d'eau débit annuel Li\_2v1

## 6. Analyse et discussion

### 6.1 Présentation de la matrice comparative

La comparaison des différentes variantes de la Borgne et de la Lienne se base sur une matrice comparative réalisée pour ce projet. Elle reprend essentiellement les indicateurs du « Contrôle des effets des revitalisations de cours d'eau » développé par l'OFEV. Les indicateurs repris dans la matrice sont ceux dont les calculs de Basement permettent la comparaison et visualisation. Ainsi, les indicateurs des fiches techniques reprenant la température, les macrophytes, les macrozoobenthos, les poissons, la végétation riveraine/alluviale, l'avifaune et la socio-économie ne sont pas étudiés. De même pour les indicateurs de la « structure des rives », « offres en abris », « substrat » de la section « Diversité en habitats » et l'indicateur « dynamique de la structure des rives » de la section « Dynamique ». Les indicateurs étudiés sont les suivants :

- Pour la diversité des habitats, nous avons la structure du fond du lit, la profondeur d'eau et la vitesse d'écoulement (OFEV, 2019a).
- Pour la dynamique, nous avons la dynamique de la structure du fond du lit et la modification du niveau du fond du lit (OFEV, 2019b).
- Pour la connectivité, nous avons la dynamique d'inondation et la ligne de rive (OFEV, 2019c).

A ces différents indicateurs va s'ajouter l'indice hydro-morphologique de la diversité (HMID).

Avant de décrire le rôle et la méthode de calcul de ces divers indicateurs, la zone d'analyse doit être présentée. Ce projet portant sur les confluences de la Borgne et de la Lienne, l'espace d'étude se concentrera spécifiquement sur la zone de rencontre entre l'affluent et le Rhône, et non sur la totalité de la zone modélisée. Les figures suivantes présentent cette zone où les données vont être prises et analysées.

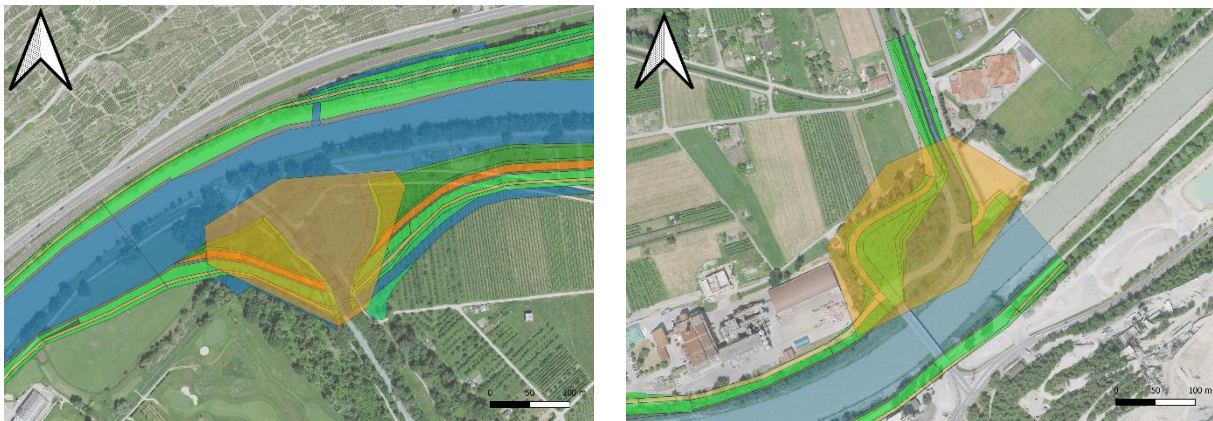


Figure 95 : Zone d'étude pour la Borgne à gauche et pour la Lienne à droite (en orange)

Une fois la zone d'étude définie, nous allons nous intéresser aux différents critères d'évaluation. Nous avons :

- La structure du fond du lit : Cet indicateur se base sur une analyse visuelle de la situation. Plus un tronçon possède d'endroits différenciables dans sa structure du lit, plus il sera diversifié. Sont regroupés sous cet indicateur, des zones identifiables comme les bancs, les fosses, les écoulements secondaires ou encore les eaux peu profondes par exemple. A noter qu'une structure est comptabilisée seulement si aucune autre structure de même type n'y est rattachée. Plus un tronçon possède d'espaces différenciables, plus son score structure du lit sera élevé.



- La profondeur d'eau : La répartition des profondeurs d'eau maximales est évaluée en fonction du coefficient de variation des profondeurs d'eau maximales.

$$VC_P = \frac{\sigma_P}{\mu_P} * 100 [\%]$$

Avec  $\sigma_P$ , l'écart-type de profondeurs d'eau maximales mesurées et  $\mu_P$ , la moyenne des profondeurs d'eau maximales mesurées. Plus un tronçon est varié au niveau de ses hauteurs d'eau, plus son coefficient de variation des profondeurs d'eau maximales sera élevé.

- La vitesse d'écoulement : La répartition des vitesses d'écoulement est évaluée en fonction du coefficient de variation des vitesses d'écoulement.

$$VC_V = \frac{\sigma_V}{\mu_V} * 100 [\%]$$

Avec  $\sigma_V$ , l'écart-type de vitesses d'écoulement mesurées et  $\mu_V$ , la moyenne des vitesses d'écoulement mesurées. Plus un tronçon possède des vitesses diversifiées, plus son coefficient de variation des vitesses d'écoulement sera élevé.

- La dynamique de structure du fond de lit : Cet indicateur observe la modification des structures du fond de lit en comparaison à l'état initial. Elle est calculée en divisant la somme des surfaces du fond du lit ayant été modifiées par la surface totale du fond du lit.

$$\frac{\text{Surface avec structure du fond du lit modifiée [m}^2\text{]}}{\text{Surface totale du fond du lit [m}^2\text{]}}$$

Dans notre évaluation, la surface totale du fond du lit correspond au lit actuel des affluents et la surface avec structure du fond du lit modifié correspond à la surface totale déposée lors de la concomitance des crues. L'aspect érosion n'a pas été pris en compte. Un score élevé correspond à une modification importante du terrain.

- La modification du niveau du fond de lit : Cet indicateur s'intéresse à la modification du profil longitudinal du niveau moyen du fond du lit dans le tronçon revitalisé. Cet indicateur prend une valeur de 1 pour une pente proche de l'état de référence, de 0.5 pour une pente plus faible que l'état de référence et de 0 pour une pente beaucoup plus faible que l'état de référence.

Pour notre analyse, nous avons comparé la différence d'altitude entre le point au départ de l'écoulement préférentiel et le point d'arrivée, correspondant à la pente du tronçon dans la zone d'étude. L'objectif de cet indicateur est de ne pas créer un chamboulement dans la pente d'équilibre du cours d'eau.

- La dynamique d'inondation : Il observe la proportion de surface d'inondation potentielle actuellement inondée en  $Q_2$ . Une valeur de 1 indique la surface d'inondation potentielle en  $Q_2$  est entièrement inondée et une valeur de 0 indique qu'aucune surface supplémentaire n'est inondée.

Dans notre évaluation, n'ayant pas modélisée une crue  $Q_2$ , le débit annuel sera utilisé. Nous avons donc la relation suivante :

$$\frac{\text{Surface inondée résultant de la modélisation pour } Q_1}{\text{Surface actuelle inondée pour } Q_1}$$

Une valeur élevée de cet indicateur indique un espace supplémentaire pour le cours d'eau en comparaison à l'état actuel.

- La ligne de rive : L'évaluation de cet indicateur est faite en comparant la ligne de rive actuelle à celle correspondant aux conditions historiques.

$$\frac{\text{Ligne de rive actuelle } \left[ \frac{km}{km} \right] - 2}{\text{Ligne de rive historique } \left[ \frac{km}{km} \right] - 2}$$

N'ayant pas pu trouver les lignes de rives historiques des affluents, le calcul de cet indicateur se fera en remplaçant dans l'équation la ligne de rive actuelle par la ligne de rive modélisée et la ligne de rive historique par la ligne de rive actuelle. Un score élevé indique une augmentation de la linéarité du cours d'eau à l'intérieur du même espace et est donc bénéfique.

- L'HMID : Finalement, l'HMID est un indicateur relatif à l'amélioration de la diversité morphologique. De manière quantitative, il évalue la diversité hydromorphologique des projets d'aménagements des cours d'eau. Cet indice pose un chiffre sur les fonctions écologiques d'un tronçon du cours d'eau. Un indice élevé correspond à un tronçon naturel, disposant de divers structures morphologiques tandis qu'un score faible correspond à un tronçon canalisé, avec une hauteur et vitesse d'eau uniforme. Cet indicateur est calculé comme suit :

$$HMID_{\text{tronçon}} = \left(1 + \frac{\sigma_V}{\mu_V}\right)^2 * \left(1 + \frac{\sigma_P}{\mu_P}\right)^2$$

Avec  $\sigma_V$ ,  $\sigma_P$  et  $\mu_V$ ,  $\mu_P$  correspondant aux écarts-types et à la moyenne des vitesses et des profondeurs d'écoulement, respectivement. Il reprend donc de manière différente et simultanée l'indicateur « profondeur d'eau » et « vitesse d'écoulement » (Gostner and Schleiss, 2012).

Afin de permettre une comparaison entre les différentes variantes, une normalisation des valeurs des indicateurs a dû être effectuée. La procédure pour obtenir ces valeurs normalisées a été faite comme suit. La valeur maximale, jugée très bonne écologiquement ou hydrauliquement parlant, est de 1, tandis que la valeur minimale, jugée très mauvaise, est de 0. Nous avons donc, pour chaque jeu d'indicateurs, pris la valeur maximale et la valeur minimale et procédé à une interpolation entre ces deux valeurs, afin d'obtenir une valeur comprise entre 0 et 1. Seul l'indice « modification du niveau du fond du lit » est jugé très bon pour sa valeur minimale et très mauvais pour sa valeur maximale.

## 6.2 Résultats de la confluence de la Borgne

Cette section reprend les résultats de la matrice comparative des variantes, appliquée à la zone d'étude du secteur Borgne. Les valeurs normalisées des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-après, tandis que les valeurs réelles des indices sont disponibles en Annexe 11.

Tableau 6 : Matrice comparative avec valeurs normalisées pour la Borgne

Variantes	HMID (confluence)	Diversité des habitats			Dynamique		Connectivité		Total
		Structure du fond du lit	Profondeur d'eau	Vitesse d'écoulement	Dynamique de la structure du fond du	Modification du niveau du fond du lit	Dynamique d'inondation	Ligne de rive	
Bo_actuel	0,02	0,00	0,05	0,18	0,05	1,00	0,00	0,84	2,14
Bo_01v1	0,35	1,00	0,46	0,42	0,59	0,16	0,43	0,16	3,57
Bo_01v2	0,73	1,00	0,97	0,45	0,75	0,32	0,50	0,31	5,03
Bo_1	0,26	0,00	0,27	0,48	0,00	0,16	0,29	0,28	1,74
Bo_1v1	0,18	0,50	0,28	0,28	0,10	0,20	0,34	0,35	2,23
Bo_02v1	0,81	1,00	0,78	0,79	0,91	0,29	0,62	0,57	5,77
Bo_02v2	0,46	0,00	1,00	0,00	0,77	0,00	1,00	1,00	4,23
Bo_02v3	1,00	1,00	0,84	0,98	1,00	0,28	0,57	0,09	5,76
Bo_2	0,65	1,00	0,43	1,00	0,71	0,32	0,57	0,67	5,35
Bo_2v1	0,61	1,00	0,63	0,66	0,85	0,24	0,61	0,47	5,07
Bo_2v2	0,87	1,00	0,79	0,87	0,69	0,30	0,56	0,28	5,36
Bo_2v3	0,36	0,50	0,35	0,57	0,56	0,21	0,42	0,46	3,43
Bo_3	0,38	0,50	0,64	0,25	0,75	0,23	0,60	0,00	3,35
Bo_3v1	0,27	0,50	0,53	0,17	0,34	0,16	0,75	0,17	2,89
Bo_BASE	0,00	0,00	0,00	0,20	0,06	0,18	0,26	0,08	0,78

A la lecture de ce tableau, les variantes optimales sont la Bo\_02v1 et la Bo\_02v3 avec un score total de 5,77 et 5,67, respectivement. Ces variantes appartiennent à la catégorie « 0 », laissant libre cours à l'eau de définir son tracé. Dans la totalité du groupe, à l'exception de la variante Bo\_02v2, la déposition induite par la concomitance des crues crée une zone sèche à l'intérieur de la zone centrale et amont de la confluence. Ces zones de déposition permettent la formation d'écoulement secondaire autour d'elles avec des eaux peu profondes. La différence notable entre ces deux variantes préférentielles est la forme de la bouche à l'amont. Dans les deux cas, les eaux du Rhône peuvent remonter à l'intérieur de la partie amont de l'embouchure avec la création de zone de recirculation.

En regardant l'évolution de la différence d'élévation du lit avec les vecteurs de vitesses pour la concomitance des crues, nous posons le constat suivant pour la variante Bo\_02v1. Dans un premier temps, une première zone de dépôt est formée par l'affluent à son entrée dans l'embouchure (A-B). A la fin de la première crue (C), cette zone d'alluvionnement sépare l'écoulement en deux chenaux principaux à sa droite et à sa gauche. L'érosion est plus présente dans la partie gauche du cheminement de l'eau. Le Q100 de l'affluent pousse cette zone de dépôt plus profondément dans la partie centrale de l'affluent. Le pic de crue trentennale du Rhône crée des zones de circulation dans la partie amont de la confluence (D-E). A la fin du premier cycle de concomitance des crues, nous constatons le déplacement de la zone de déposition à l'intérieur de la zone centrale de l'embouchure, ainsi que la formation d'une autre zone d'alluvionnement dans l'espace amont de la confluence (F). Les pics Q30 de la Borgne et Q100 de la Rhône recouvrent la totalité de la zone d'embouchure d'eau, ainsi que ces zones de dépôts (G-H). La fin de la 3<sup>ème</sup> période de crue démontre un écoulement préférentiel de l'affluent dans un chenal préférentiel sur la rive gauche de la Borgne (I). La dernière crue centennale de la Borgne se divise en deux à la hauteur de la zone de dépôt ayant été déplacée (J). Le pic de la crue trentennale du Rhône recouvre à nouveau la zone de confluence d'eau et forme des zones de recirculation dans la partie amont de l'embouchure (K). Le résultat final de la concomitance des crues démontre une ressemblance avec la fin du 1<sup>er</sup> cycle de crue (F-L). Nous avons deux zones de déposition importantes, une centrale et une à l'amont de la confluence. A la suite de cette évolution, l'influence du Rhône dans la zone d'embouchure est surtout dénotée dans la partie amont de la zone de confluence. Sa rencontre avec les eaux déviées de l'affluent et l'espace de déposition dans cette zone crée des zones de recirculation. Les zones de déposition à l'amont et dans la partie centrale



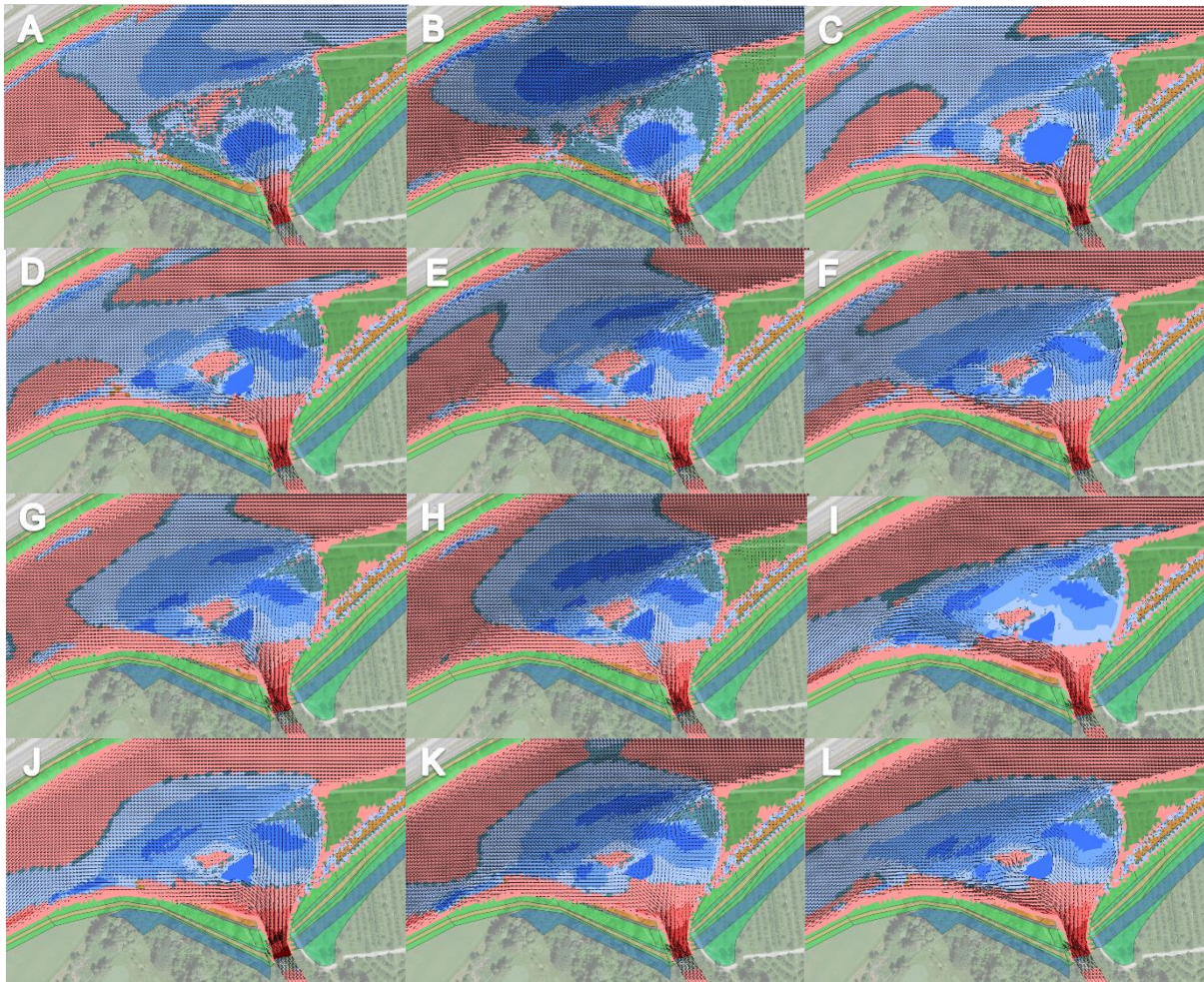


Figure 96 : Evolution du lit pour la variante Bo\_02v1 lors de la concomitance des crues. En suivant la chronologie de la concomitance des crues, la première colonne reprend les crues de l'affluent, celle du milieu les crues du Rhône et la dernière correspond à la situation en fin de période de crues.

proviennent principalement du transport solide de l'affluent. De même pour la petite zone d'alluvionnement dans l'aval de la zone de confluence. Le transport solide du Rhône est concentré en son intérieur. Son charriage participe tout de même à la création de la zone de dépôt présente le long de la zone de rencontre des deux cours d'eau, qui est poursuivie dans la zone post-confluence, en aval du cours d'eau (visible en A-B-C-D-E, principalement). Un autre impact principal du charriage par le Rhône dans la zone de confluence est qu'il érode des zones de déposition, lorsque ces dernières arrivent jusqu'à la zone de jonction entre les deux cours d'eau (comparaison entre D et F). L'affluent impacte sur l'intérieur de l'embouchure en tant que pourvoyeur de sédiments et aussi de transformateur de morphologie avec le déplacement de la zone de dépositions (A-D).

Dans la quasi-totalité des modélisations, nous remarquons une attirance d'écoulement de la Borgne sur sa rive gauche. Cette caractéristique est en accord avec le modèle physique de la Borgne réalisé par Leite Ribeiro et al. (2011). Le  $Q_r$  pour la concomitance des crues correspond à des valeurs de 0,1 ( $Q_{30A}/Q_{100R}$ ) et 0,18 ( $Q_{100A}/Q_{30R}$ ) et une valeur de 0,06 pour la modélisation annuelle. Le fait d'utiliser dans les simulations des débits variés, de même que le transport solide ne permet pas une comparaison solide avec le modèle de Leite Ribeiro ou celui de Guillén-Ludeña. Nous constatons cependant la présence d'une zone de dépôt dans le Rhône dans sa zone de post-confluence, en accord avec la littérature (Rhoads and Kenworthy, 1995). Néanmoins, la localisation de cette zone est variée selon les modèles.

L'adaptation de la bouche à l'amont de la zone de confluence entraîne une augmentation de dépôt directement à sa suite. La comparaison entre les variantes Bo\_01v1/Bo\_01v2, Bo\_02v1/Bo\_02v3 et Bo\_2v2/Bo\_2v3 met en lumière cette accentuation.

L'adaptation de la bouche aval et la suppression ou non de l'îlot aval définit la configuration selon laquelle l'affluent va pénétrer dans le cours d'eau principal. Cet arrangement modifié ou la disparition de l'îlot par rapport à la variante de base adoucit l'angle de rencontre entre les cours d'eau. Cela induit une zone de déposition continue le long de la zone de confluence et dans la zone de post-confluence, alors que l'entrée de l'affluent avec un angle plus élevé, découpe cette zone de dépôt (comparaison Bo\_01v1/Bo\_01v2 par exemple). Cette adaptation et/ou suppression permet aussi à l'affluent de suivre son chenal préférentiel le long de sa rive gauche.

La majorité des variantes proposant des formes géométriques obtiennent un score relativement élevé, à l'exception de Bo\_2v3. La déflexion de l'écoulement permet d'avoir une mixité entre les vitesses d'écoulement et la profondeur d'eau, tout en proposant une surface recouverte d'eau suffisante. Cette configuration peut toutefois être conseillée dans les endroits où l'espace à disposition pour l'aménagement des cours d'eaux est restreint (Bo\_2v2). Nous constatons aussi qu'une simple adaptation de la bouche en amont et en aval en adoucissant l'angle de confluence conduit à une forte augmentation du score d'indicateurs (comparaison entre Bo\_2v2 et Bo\_2v3).

La connexion au Rhône de la Borgne au moyen d'un ou deux chenaux préférentiels est une configuration à éviter. En forçant l'affluent à suivre un tracé défini, ce dernier ne peut s'expandre afin d'assurer ses fonctions écologiques et morphologiques. De plus, la rencontre de l'affluent avec un angle élevé, ne permet pas une entrée en douceur préférable pour sa connexion avec le cours d'eau principal. Ces variantes Bo\_1, Bo\_1v1 et Bo\_Base obtiennent les scores les moins élevés dans la totalité des jeux d'indicateurs. La moitié des points disponible dans les indices n'est jamais dépassée.

La catégorie « 3 » reprenant les deux variantes de déflecteur obtient des scores relativement faibles. Cette valeur peut être expliquée par la définition de la zone d'étude. Ce travail portant sur les zones de confluences, l'espace où les données ont été prises concerne spécifiquement la zone de rencontre entre le Rhône et l'affluent. En observant les hauteurs d'eau du débit annuel de la variante Bo\_3v1, nous constatons une véritable mosaïque de diverses profondeurs d'eau sur la zone modélisée. Il y a dès lors fort à parier que si la zone d'étude avait été agrandie sur tout cet espace, les scores de ce groupe auraient été augmentés. Ces variantes, engendrant des variations importantes d'hauteurs d'eau et formant des bancs à l'amont et à l'aval du déflecteur, semblent donner de meilleures fonctions écologiques au Rhône, en créant une mosaïque d'habitats propices au développement de diverses espèces végétales et animales.

Concernant la pente, les diverses variantes ont des valeurs faibles en comparaison à la situation actuelle. Cet accroissement de la pente est en partie dû à la définition de la zone d'étude. En effet, cette zone se trouve sur le tracé actuel du cours d'eau et non à sa confluence. Nous avons donc une comparaison entre le chenal préférentiel de l'affluent rejoignant le Rhône dans la zone de confluence, comparé à la pente d'un bout de tronçon de la Borgne actuelle. L'explication de cette différence réside donc cette variation spatiale de la zone de confluence.

### 6.3 Résultats de la confluence de la Lienne

Ce sous-chapitre se présentera sous la même forme que le précédent. Tout d’abord, nous avons la présentation des valeurs des indicateurs, les variantes optimales, l’évolution de l’élévation du lit pour la variante ayant le score le plus élevé, les rôles de l’affluent et du Rhône dans cette confluence, ainsi qu’une comparaison des différents groupes de variantes.

Les scores normalisés résultant de la modélisation hydrodynamique sont repris à la Figure suivante et les valeurs réelles sont disponibles à l’Annexe 12.

Tableau 7 : Matrice comparative des valeurs normalisées pour la Lienne

Variantes	HMID (confluence)	Diversité des habitats			Dynamique		Connectivité		Total
		Structure du fond du lit	Profondeur d’eau	Vitesse d’écoulement	Dynamique de la structure du fond du	Modification du niveau du fond du lit	Dynamique d’inondation	Ligne de rive	
Li_actuel	0,82	0,00	0,05	1,00	0,08	1,00	0,00	1,00	3,95
Li_0	0,90	1,00	0,63	0,36	0,76	0,10	0,91	0,66	5,32
Li_01	0,60	0,50	0,26	0,45	0,62	0,09	0,83	0,34	3,69
Li_1	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,11	0,61	0,48	1,23
Li_02	0,75	1,00	0,63	0,20	0,88	0,15	0,96	0,85	5,42
Li_2	0,39	1,00	0,00	0,56	0,52	0,19	0,71	0,65	4,02
Li_2v1	0,86	1,00	0,39	0,59	0,63	0,00	0,85	0,79	5,11
Li_03	1,00	1,00	1,00	0,05	1,00	0,61	1,00	0,41	6,07
Li_BASE	0,43	0,50	0,19	0,36	0,38	0,40	0,80	0,00	3,06

La variante optimale pour la confluence de la Lienne correspond à la configuration Li\_03 (sortie de la délimitation du PA-R3) avec un score de 6,07. Elle est suivie par la Li\_02 et la Li\_0, avec des scores de 5,42 et 5,32 respectivement. Comme pour la Borgne, ces dernières appartiennent à la catégorie « 0 », où la zone de confluence est laissée libre de toute modification. Ces variantes créent une importante zone de dépôt le long de la section de rencontre avec le Rhône. De la même manière que sur la Borgne, ces dépôts vont permettre la formation d’écoulement secondaire avec des hauteurs d’eau peu profondes.

L’évolution de la modification du lit pour la concomitance des crues de la variante Li\_03 permettra de comprendre l’écoulement du débit annuel à l’intérieur de la confluence. Nous constatons une évolution comparable à celle de la Borgne, avec en premier lieu, l’arrivée des sédiments provenant de l’affluent dans la zone de confluence (A). Sur l’image correspondant au premier pic de la crue centennale du Rhône (B), nous observons le transport solide des deux cours d’eau. L’affluent amène des sédiments dans la zone haute de la confluence tandis que le Rhône dépose le long de la zone de rencontre des cours d’eau (A-B). A la fin de la première concomitance de crues, la zone de dépôt de l’affluent a été déplacée vers l’espace central de la zone de confluence le long de la connexion avec le Rhône, rejoignant les alluvions provenant du fleuve (C). La crue centennale de l’affluent pousse encore le dépôt présent sur la rive gauche et droite de la Lienne, plus au centre de la zone de confluence (C à F). La fin du 1<sup>er</sup> cycle de concomitance résulte en une zone de dépôt centrale s’étalant de la rive gauche à la rive droite de l’affluent, avec des valeurs plus élevées le long de la section de rencontre (F). La fin de la 3<sup>ème</sup> crue est marquée par une importante zone de déposition déplacée dans le tracé du Rhône, le long de sa rive droite (I). Ce dépôt correspond à l’espace central recouvert des sédiments de l’affluent dans la zone de confluence (comparaison H-I). Par la suite, cette zone de déposition va être érodée par le Rhône d’une manière similaire au cas de la Borgne, pour finalement parvenir à une zone de dépôt central moins élevée que sur les côtés gauche et droit de la confluence (J à L). Le rôle morphologique principal de l’affluent consiste en l’apport de sédiments dans la zone de confluence, ainsi que leur transport jusqu’à la section de rencontre avec le fleuve. Le Rhône, quant à lui, dépose aussi des sédiments le long de cette section mais les érode, quand ceux-ci interfèrent trop fortement



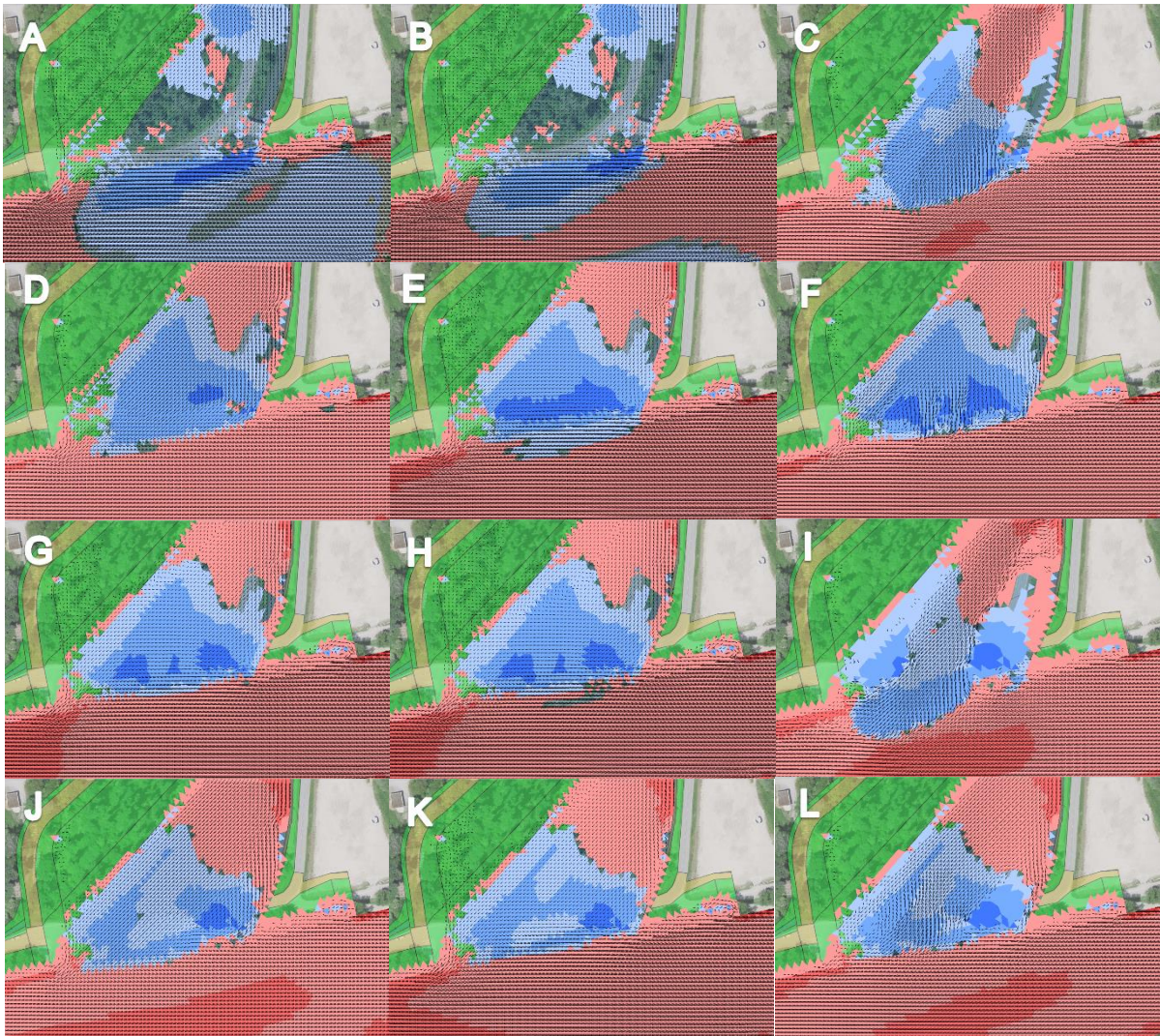


Figure 97 : Evolution du lit pour la variante Li\_03 lors de la concomitance des crues. En suivant la chronologie de la concomitance des crues, la première colonne reprend les crues de l'affluent, celle du milieu les crues du Rhône et la dernière correspond à la situation en fin de période de crues.

avec son écoulement. L'impact du Rhône à l'intérieur de la zone de confluence est moindre, avec ses eaux qui ne pénètrent que légèrement dans l'embouchure lors de ses pics de crue.

Concernant le  $Q_r$ , nous avons pour la concomitance des crues des valeurs de 0.09 ( $Q_{100_A}/Q_{30_R}$ ) et de 0.03 ( $Q_{30_A}/Q_{100_R}$ ), ainsi que de 0.02 pour la modélisation annuelle. Ces ratios de débit sont fortement plus bas que ceux étudiés par Leite Ribeiro et Guillén-Ludeña. Dans une analyse visuelle, nous constatons que la zone de dépôt présente dans les modèles Borgne dans la zone post-confluence n'existe pas dans toutes les variantes Lienne. A la place, nous avons une érosion le long de la rive intérieure, juste après la confluence, là où normalement une zone d'alluvionnement devrait être trouvée selon la littérature (Best, Leite Ribeiro). Cette différence est sûrement expliquée par le fait du faible débit de la Lienne par rapport au Rhône, et surtout du faible volume charrié jusqu'à la confluence par l'affluent. Des modélisations supplémentaires en faisant varier le ratio de débit et le volume charrié pourraient confirmer cette hypothèse.

Comme précédemment avec la Borgne, les deux scores les plus élevés après la variante Li\_03 concernent des configurations où la zone de confluence est laissée libre et agrandie en aval par rapport à la variante de base. La différence de forme entre la modélisation Li\_02 et Li\_0 réside dans l'adaptation de la bouche au départ de la zone de confluence entre le Rhône et la Lienne. En regardant

les hauteurs d'eau résultant de la simulation hydrodynamique, nous constatons que cette adaptation la bouche amène moins d'impact en comparaison aux variantes de la Borgne. En effet, les eaux du Rhône ne pénètrent pas à l'intérieur de la zone de confluence dans cette zone amont.

En comparant l'effet de l'adaptation de la bouche dans la partie aval de la zone de confluence (Li\_0 et Li\_01 par exemple), nous constatons que cette différence de configuration affecte l'écoulement préférentiel en débit annuel. Dans la variante Li\_01, ce dernier se concentre en rive gauche de la Lienne tandis que dans la modélisation Li\_0, il est séparé en divers bras, rejoignant le cours d'eau. Cette observation est en accord avec l'espace réservé aux cours d'eau. Plus la zone disponible pour l'affluent est grande, plus les écoulements à l'intérieur de cette zone seront diversifiés. Cette affirmation est en accord avec les modélisations réalisées sur la Borgne.

La catégorie « 2 » correspondant aux formes géométriques est le deuxième groupe de variantes obtenant le score le plus élevé. En comparaison à la Borgne, ces scores sont plus faibles, impliquant qu'un certain débit est nécessaire pour permettre une vraie déflexion de l'eau et ainsi diversifié son écoulement. Néanmoins, en disposant les formes de manière géométrique, cette configuration peut toutefois être considérée comme bénéfique avec un score de 5,11.

Comme observé sur les cas Borgne, les variantes connectant l'affluent au Rhône au moyen de chenaux préférentiels sont à éviter. Les configurations Li\_1 et Li\_BASE obtiennent les scores les plus bas. Cette constatation est en lien avec l'espace disponible pour le cours d'eau. En le contraignant à l'intérieur d'un tracé défini, ce dernier n'a aucun moyen d'expansion, nécessaire à son retour vers une dynamique naturelle. Abaisser les hauteurs de bords des chenaux afin de permettre au cours d'eau de se déverser dans la zone de confluence pourrait être une solution pour parvenir à une amélioration écologique.

Dans l'indicateur « modification du niveau du fond de lit », les aménagements prévus entraînent à nouveau une augmentation de la pente. Cette différence peut être moins perceptible que dans le cas Borgne du fait que la confluence actuelle de la Lienne avec le Rhône est comprise dans la zone d'étude.

## 7. Synthèse et conclusion

L'objectif principal de ce projet de master constituait en l'évaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne, comprises dans le PA-R3. Ces dernières doivent suivre les buts de la 3<sup>ème</sup> correction du Rhône, à savoir une protection durable contre les crues ainsi qu'une augmentation des fonctions écologiques des cours d'eau. Pour parvenir à des résultats probants, la méthodologie suivante a été appliquée.

En premier lieu, une recherche bibliographique a été effectuée. Cette dernière a permis de comprendre les enjeux écologiques et sécuritaires au sein des confluences. En se basant sur cette étude, des configurations d'embouchures ont été imaginées et créées dans un logiciel de SIG 3D. La création de ces aménagements en 3D permet par la suite de les transformer en maillage. Ce maillage, reprenant la configuration définie pour les diverses variantes de confluences, est par la suite utilisé pour procéder à une simulation morphodynamique. Une concomitance des crues du Rhône et de ses affluents avec du transport solide est modélisée à l'aide d'un logiciel de calcul hydro-morphodynamique. L'objectif de cette étape est d'apprécier le travail des sédiments effectués sur le lit. Les données provenant de la modification du lit sont reprises pour permettre l'élaboration d'un nouveau maillage. Ce dernier, correspondant au résultat de la simulation morphodynamique, va être utilisé comme base pour une simulation hydrodynamique. Le débit annuel du Rhône et de ses affluents est utilisé, sans transport solide. Les résultats des différentes variantes de confluence, correspondants aux hauteurs d'eau et aux vitesses, vont être évalués à l'aide d'une matrice comparative. Elle reprend des indicateurs écomorphologiques et hydrauliques. Le calcul des scores d'indicateurs des différentes



## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

variantes permet de déterminer l'impact de ces dernières sur le développement morphodynamiques dans la zone de confluence.

La variante d'aménagement préférentielle de la Borgne est une configuration où la zone d'embouchure aval et centrale a été laissée libre de mesure constructible. Un îlot amont est présent et la bouche en amont et aval a été configurée pour permettre une connexion douce entre l'affluent et le Rhône.

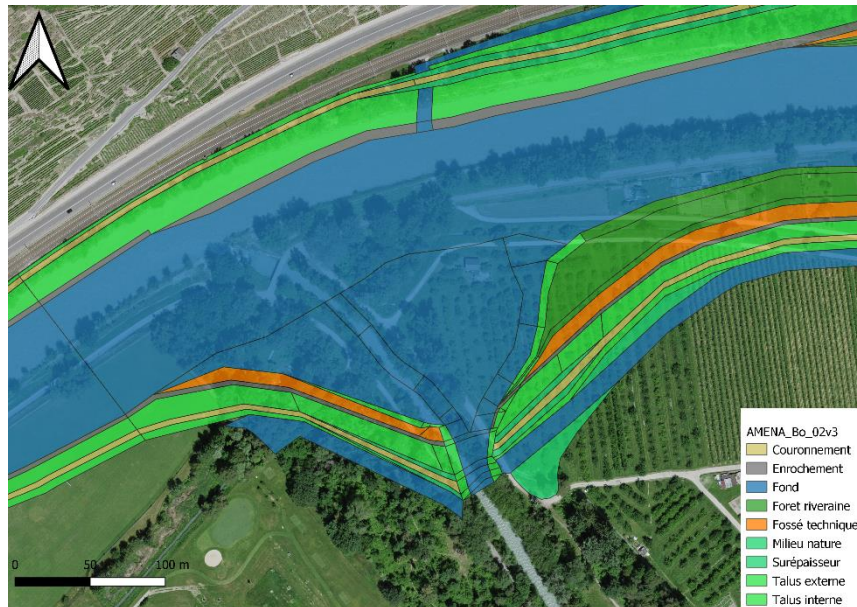


Figure 98 : Variante préférentielle pour la Borgne (Bo\_02v3)

La variante d'aménagement préférentielle de la Lienne est une configuration où l'espace disponible pour le cours d'eau a été augmenté, en sortant de la délimitation du PA-R3. Cette surface supplémentaire permet à l'affluent de rejoindre le Rhône sous la forme d'un entonnoir. La zone de confluence est laissée libre de tout aménagement, laissant l'eau divaguer selon ses envies. Comme pour la Borgne, la bouche à l'amont et à l'aval de la jonction est adoucie pour permettre une connexion simplifiée entre les deux cours d'eau. Cette variante pouvant poser des problèmes au niveau politique,

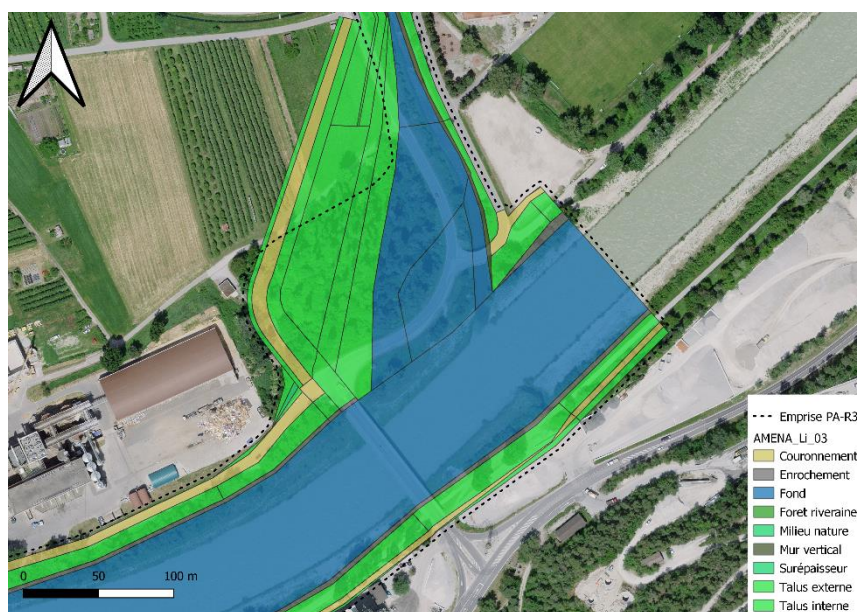


Figure 99 : Variante préférentielle pour la Lienne (Li\_03)



du fait qu'elle soit située en dehors des limites du PA-R3, des autres configurations ayant aussi des scores élevés ont été proposées. Toutefois, il serait intéressant de voir la décision cantonale entre l'augmentation de la valeur écologique du cours d'eau au détriment de terres agricoles ou l'adoption d'un aménagement de cours d'eau jugé satisfaisant permettant la conservation de ces terrains.

Ces deux variantes démontrent la nécessité de laisser au cours d'eau un espace suffisant pour que ce dernier puisse accomplir ses fonctions écologiques et hydrauliques. La variation d'écoulement et la présence de zones sèches en font un endroit pourvu d'une excellente diversité d'habitats. Ces résultats sont en accord avec le projet de la mesure anticipée de la Lizerne. L'aménagement prévu est une importante zone laissée libre de mesure constructible en amont et aval de l'arrivée de l'affluent dans le Rhône (MRS pa sd ingénierie, 2018).

Concernant le rétablissement de la connectivité latérale, des analyses s'intéressant plus spécifiquement à la faune et la flore pourraient étayer la matrice d'indicateurs afin d'avoir une vue complète du projet. Les résultats des modélisations démontrent cependant une certaine problématique concernant l'érosion importante présente après les points fixés. Cette dernière pourrait ne pas permettre la migration piscicole. A nouveau, des analyses complémentaires portant sur le monde du vivant, permettrait une meilleure appréciation des variantes.

Les résultats des sous-chapitres 5.3.1 et 5.3.2 permettent une visualisation du tracé que l'affluent et le Rhône auraient en fonction des variantes en suivant un débit annuel. En observant le débit annuel des variantes, nous constatons que le tracé de la Borgne est concentré sur un écoulement préférentiel sur sa rive gauche, tandis que pour la Lienne, les variantes ayant obtenus un score élevé ne présentent pas forcément d'écoulement préférentiel sur une rive de l'affluent. La connexion au Rhône se fait soit par une zone étendue avec de faibles hauteurs d'eau, soit par plusieurs bras présentant aussi de faibles hauteurs d'eau. La présence de zones sèches et la diversité d'écoulement fournissent aux différentes espèces animales et végétales des habitats diversifiés. Nous constatons aussi que le raccord entre l'affluent et le Rhône s'effectue en suivant la direction d'écoulement du fleuve.

Les rôles endossés par le Rhône et l'affluent à l'intérieur de la zone de confluence sont différents. D'un point de vue hydraulique, le Rhône dans le cas préférentiel de la Borgne ne pénètre que faiblement dans la zone d'embouchure, dans la partie amont uniquement. La Borgne quant à elle, fournit la quasi-totalité du débit présent dans la confluence. Quand la configuration de la variante le permet, un écoulement préférentiel de la Borgne est retrouvé sur sa rive gauche avec des eaux secondaires de faibles hauteurs dans la partie centrale de la confluence. Des zones sèches sont aussi présentes lors d'un débit annuel à l'intérieur de cette embouchure. Concernant la Lienne dans sa variante préférentielle, les eaux du Rhône ne pénètrent quasiment pas dans l'espace de confluence. L'écoulement de l'affluent recouvre d'eau majoritairement la partie aval de la zone de confluence. D'un point de vue morphologique, les deux affluents jouent le rôle d'alimentateur en sédiments de la zone de confluence. Des zones de déposition importantes à l'intérieur de l'embouchure se retrouvent pour les diverses variantes. Les affluents poussent ensuite, pour la plupart des simulations, cette zone d'alluvionnement en direction de la section de rencontre avec le Rhône. Lorsque les dépôts provenant de l'affluent pénètrent trop loin dans le tracé du Rhône, ce dernier se charge de les éroder. Une portion de dépôt provenant du Rhône est perceptible le long la section de rencontre entre ce dernier et l'affluent.

La différence la plus notable entre la Borgne et la Lienne provient de l'inexistence de la zone d'alluvionnement dans la zone post-confluence pour le cas de la Lienne. Les débits liquides et solides plus faibles de cette dernière pourraient être l'explication de cette caractéristique.

Afin d'étayer les résultats de ce projet et de confirmer ceux obtenus par modélisation numérique, un modèle physique des variantes préférentielles d'embouchures pourrait être imaginé. De plus, afin d'obtenir des résultats plus proches de la réalité, le logiciel Basement pourrait permettre la prise en compte de différents diamètres de grains. Afin d'éviter tout désagrément ou mésentente, ces mesures d'aménagements et de revitalisation devraient également se porter sur tout le tracé de l'affluent et pas seulement sur sa confluence avec le Rhône.

De la création des modèles 3D à la visualisation des résultats finaux, en passant par l'élaboration des maillages et les simulations hydro-morphodynamiques, la majeure partie de ce projet s'est effectuée derrière un ordinateur, en raison de l'utilisation des différents logiciels qu'il a fallu découvrir et apprendre à utiliser.

En conclusion, ce rapport se veut de permettre la compréhension des phénomènes hydrauliques et morphologiques présents dans les confluences au moyen d'une recherche bibliographique, appliquée à un exemple concret de projet de revitalisation d'embouchures.

## 8. Bibliographie

Best, J. L. ,1987. Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology, in *Recent Developments in Fluvial Sedimentology, Spec. Publ. SEPM Soc. Sediment. Geol.*, 39, pp.27-35

Best, J. and Reid, I., 1984. Separation Zone at Open-Channel Junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), pp.1588-1594.

Biron, P., Best, J. and Roy, A., 1996. Effects of Bed Discordance on Flow Dynamics at Open Channel Confluences. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(12), pp.676-682.

Biron, P. M., Lane, S. N., 2008. Modelling hydraulics and sediment transport at river confluences, in *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*, edited by S. P. Rice, A. G. Roy, and B. L. Rhoads, pp. 17-43

Biron, P., B. De Serres, A. G. Roy, and J. L. Best ,1993. Shear layer turbulence at an unequal depth channel confluence, in *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transfer*, edited by N. Clifford, J. French, and J. Hardisty, pp. 197-213.

Biron P., Richer A., Kirkbride A.D, Roy A.G, Han S. ,2002. Spatial patterns of water surface topography at river confluence. *Earth Surf. Process. Landforms* 27, 913-928

Blanckaert, K. and De Vriend, H., 2004. Secondary flow in sharp open-channel bends. *Journal of Fluid Mechanics*, 498, pp.353-380.

Bourgeois, M., 2006. Accroissement de la valeur naturelle de la vallée du Rhône par un raccordement optimal des affluents du Rhône, Rapport Projet de Master, LCH-EPFL.

Bradbrook, K., Lane, S., Richards, K., Biron, P. and Roy, A., 2000. Large Eddy Simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences. *Journal of Hydraulic Research*, 38(3), pp.207-215.

Cortier, B. and Couvert, B., 2001. Causes et conséquences du blocage actuel de la dynamique fluviale et du transit sédimentaire du Rhône. *La Houille Blanche*, 87(8), pp.72-78.

DTAP, CDCA, OFEV, ARE, OFAG (éd.) 2019 : Espace réservé aux eaux. Guide modulaire pour la détermination et l'utilisation de l'espace réservé aux eaux en Suisse.

Etat du Valais, 2016. Le Valais face aux changements climatiques. Effets et options d'adaptation dans les domaines de la gestion des eaux et des dangers naturels. Document de synthèse

Etat du Valais, n.d. *Histoire : Rhône*. [online] Etat du Valais. Available at: <<https://www.vs.ch/web/rhone/histoire>> [Accessed 3 February 2022].

Etat du Valais, n.d. *Rhône*. [online] Etat du Valais. Available at: <<https://www.vs.ch/web/rhone>> [Accessed 3 February 2022].

Gostner, W., Schleiss, A., 2012: Indice hydromorphologique de la diversité. In: *Fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau*, OFEV, Berne. Fiche 3

Guillén-Ludeña, S., Franca, M., Cardoso, A. and Schleiss, A., 2016. Evolution of the hydromorphodynamics of mountain river confluences for varying discharge ratios and junction angles. *Geomorphology*, 255, pp.1-15.



- Guillén Ludeña, S., Z. Cheng, G. Constantinescu, and M. J. Franca ,2017. Hydrodynamics of mountain river confluences and its relationship to sediment transport, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 122, pp.901–924.
- Guillén-Ludeña, S., M. J. Franca, A. H. Cardoso, and A. J. Schleiss ,2015a. Hydro-morphodynamic evolution in a 90° movable bed discordant confluence with low discharge ratio, *Earth Surf. Processes Landforms*, 40(14), pp.1927–1938.
- Guillen-Ludeña, S., M. J. Franca, A. H. Cardoso, and A. J. Schleiss ,2015b. Morphodynamics in river confluences. In *36th IAHR World Congress. Deltas of the future*. Delft - The Hage.
- Gutierrez, R., Abad, J., Choi, M. and Montoro, H., 2014. Characterization of confluences in free meandering rivers of the Amazon basin. *Geomorphology*, 220, pp.1-14.
- HADES, n.d. *Atlas hydrologique de la suisse*. [online] Available at: <<https://atlashydrologique.ch/>> [Accessed 7 November 2021].
- HZP, 2015. Sohlenlagen Mündung Lizerne. *3ème correction du Rhône*.
- Kennedy, B., 1984. On Playfair's law of accordant junctions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 9(2), pp.153-173.
- Küttel, S., 2001. Bedeutung der Seitengewässer der Rhone für die natürliche Reproduktion der Bachforelle und Diversität der Fischfauna im Wallis. Diplomarbeit, ETH
- Lake, P., Bond, N. and Reich, P., 2007. Linking ecological theory with stream restoration. *Freshwater Biology*, 52(4), pp.597-615.
- Lane, S., Bradbrook, K., Richards, K., Biron, P. and Roy, A., 2000. Secondary circulation cells in river channel confluences: measurement artefacts or coherent flow structures?. *Hydrological Processes*, 14(11-12), pp.2047-2071.
- Leite Ribeiro, M., Blanckaert, K., Boillat, J. and Schleiss, A., 2011. Elargissement local de l'affluent dans une zone de confluence. *Wasser Energie Luft*, 103(235-242).
- Leite Ribeiro, M., Blanckaert, K., Boillat, J.-L., Schleiss, A., 2012a : Elargissement local des embouchures. In: *Fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau*, OFEV, Berne. Fiche 5.
- Leite Ribeiro M, Blanckaert K, Roy AG, Schleiss AJ. 2012b. Flow and sediment dynamics in channel confluences. *Journal of Geophysical Research* 117
- Leite Ribeiro M, Blanckaert K, Roy AG, Schleiss AJ. 2012c. Hydromorphological implications of local tributary widening for river rehabilitation. *Water Resources Research* 48(10)
- Leite Ribeiro M, Blanckaert K, Schleiss AJ. 2015. Local tributary widening for river rehabilitation. *Ecohydrology*.
- Malavoi, J. and Souchon, Y., 1996. Dynamique fluviale et dynamique écologique. *La Houille Blanche*, 82(6-7), pp.98-107.
- Martín, E., Ryo, M., Doering, M. and Robinson, C., 2018. Evaluation of Restoration and Flow Interactions on River Structure and Function: Channel Widening of the Thur River, Switzerland. *Water*, 10(4), p.439.

Meyer-Peter, E., and R. Mueller, 1948. Formulas for Bed-Load Transport, *paper presented at Proceedings 2d Meeting IAHR*, Stockholm

MRS pa sd ingénierie, 2018. Projet de mise à l'enquête de la MA Lizerne. *3ème correction du Rhône*.

OFEV, 2019a. Jeu d'indicateurs 1 – Diversité des habitats. Dans : *Contrôle des effets des revitalisations de cours d'eau – Apprendre ensemble pour l'avenir*. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. Fiche technique 1, V1.04.

OFEV, 2019b. Jeu d'indicateurs 2 – Dynamique. Dans : *Contrôle des effets des revitalisations de cours d'eau – Apprendre ensemble pour l'avenir*. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. Fiche technique 2, V1.02

OFEV, 2019c. Jeu d'indicateurs 3 – Connectivité. Dans : *Contrôle des effets des revitalisations de cours d'eau – Apprendre ensemble pour l'avenir*. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. Fiche technique 3, V1.02.

OFEV, 2001. Protection contre les crues des cours d'eau, Directives 2001, Bienne, 72 p.

Rhoads, B. and Kenworthy, S., 1998. Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(2), pp.171-191.

Rhoads, B. and Kenworthy, S., 1995. Flow structure at an asymmetrical stream confluence. *Geomorphology*, 11(4), pp.273-293.

Rhoads, B. and Sukhodolov, A., 2004. Spatial and temporal structure of shear layer turbulence at a stream confluence. *Water Resources Research*, 40(6).

Rice, SP., P. Kiffney, C. Greene, and G.R. Pess, 2008. The Ecological Importance of Tributaries and Confluences, 209-242 pp., John Wiley & Sons, Ltd

Rohde, S., Schütz, M., Kienast, F. and Englmaier, P., 2005. River widening: an approach to restoring riparian habitats and plant species. *River Research and Applications*, 21(10), pp.1075-1094.

Smart, G. M., and M. N. R. Jaeggi, 1983. Sediment transport on steep slopes, 89-191 pp., Mitteilungen n°64, Der Versuchsanstalt fuer Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidg. Techn. Hochschule Zuerich, Zurich

Vanzo, D., Peter, S., Vonwiller, L., Bürgler, M., Weberndorfer, M., Siviglia, A., Conde, D. and Vetsch, D., 2021. basement v3: A modular freeware for river process modelling over multiple computational backends. *Environmental Modelling & Software*, 143, p.105102.

Vetsch D., Siviglia A., Bacigaluppi P., Bürgler M., Caponi F., Conde D., Gerke E., Kammerer S., Koch A., Peter S., Vanzo D., Vonwiller L., Weberndorfer M. 2021. System Manuals of BASEMENT, Version 3.1.1. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich. Available from <https://www.basement.ethz.ch>. [12 décembre 2021].

VS-SPCR, 2014. Plan d'aménagement (PA-R3) : Rapport d'impact sur l'environnement (RIE 1re étape). *Etat du Valais*.

VS-SPCR, 2015. Plan d'aménagement (PA-R3) : Rapport de synthèse. *Etat du Valais*.

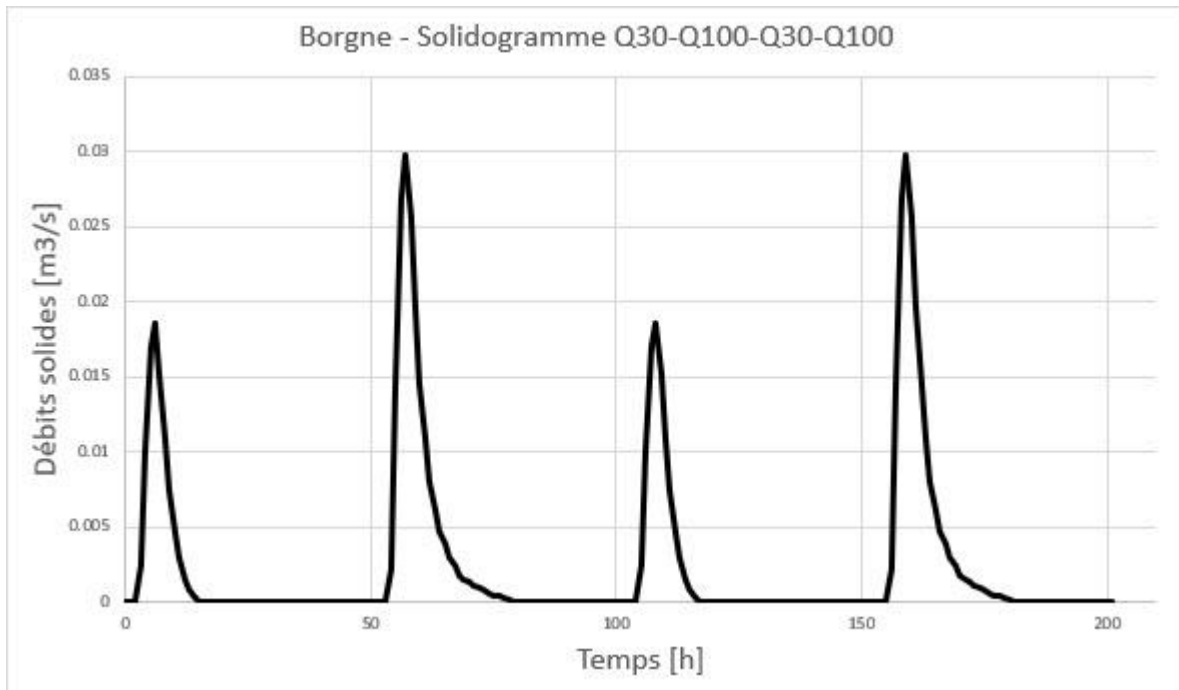
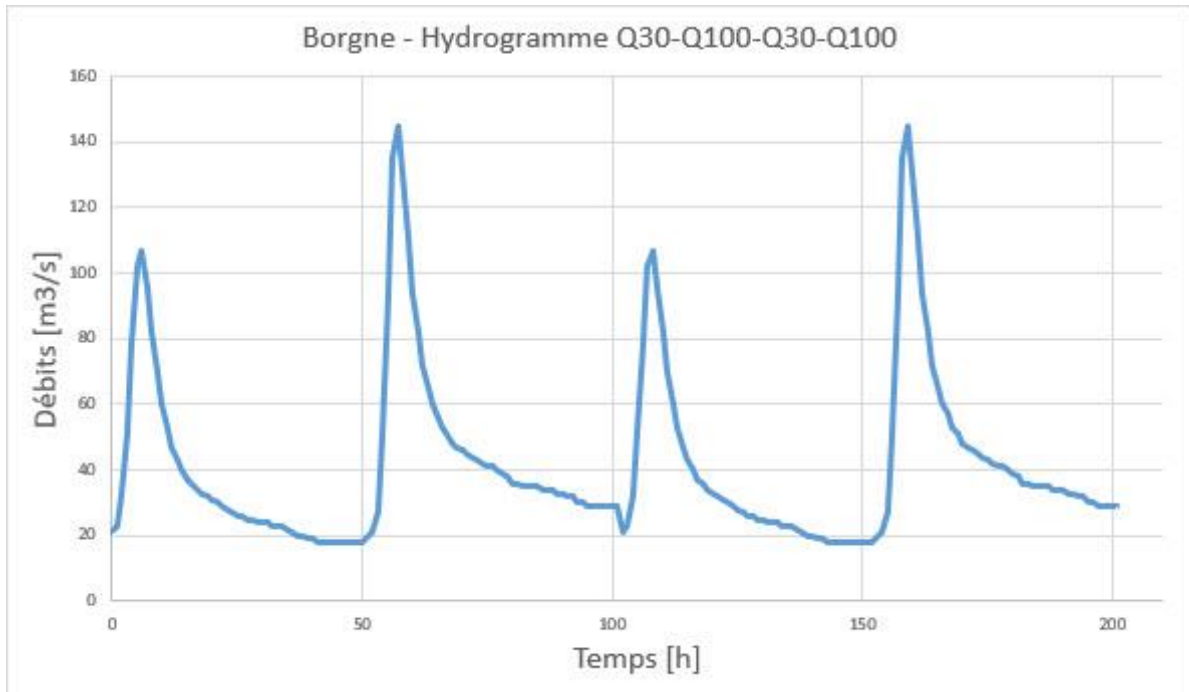
## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

Werth, S., Alp, M., Junker, J., Karpati, T., Weibel, D., Peter, A., Scheidegger, C., 2012. Connectivité des cours d'eau. In: *Fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau*, OFEV, Berne. Fiche 4

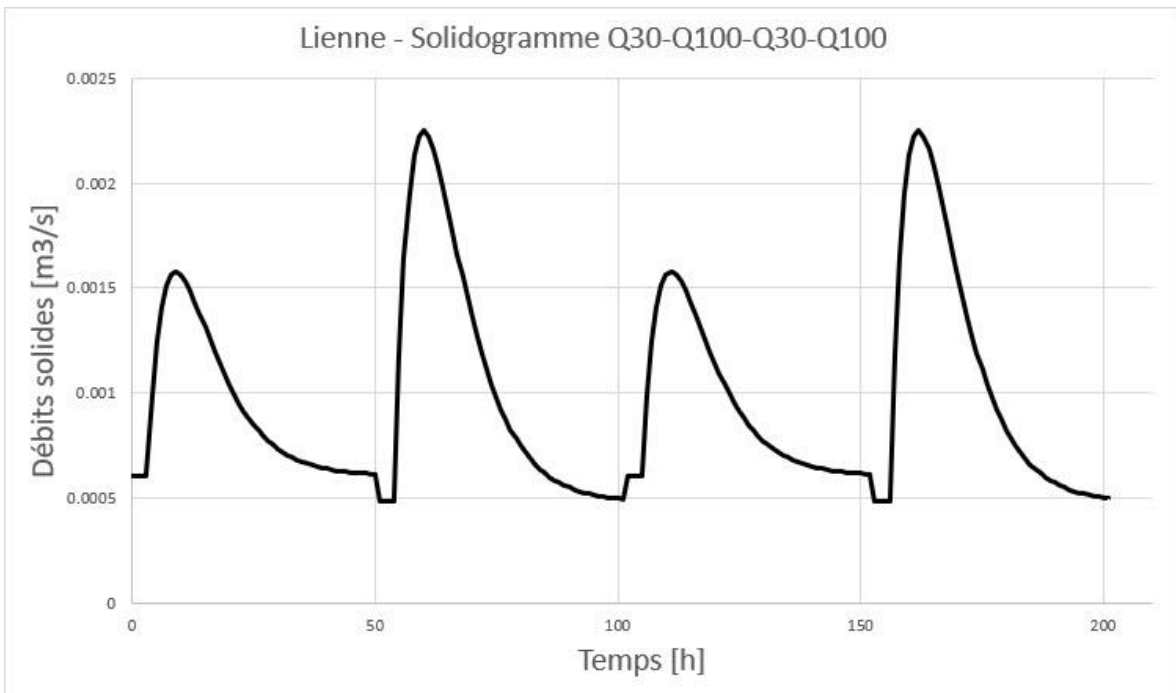
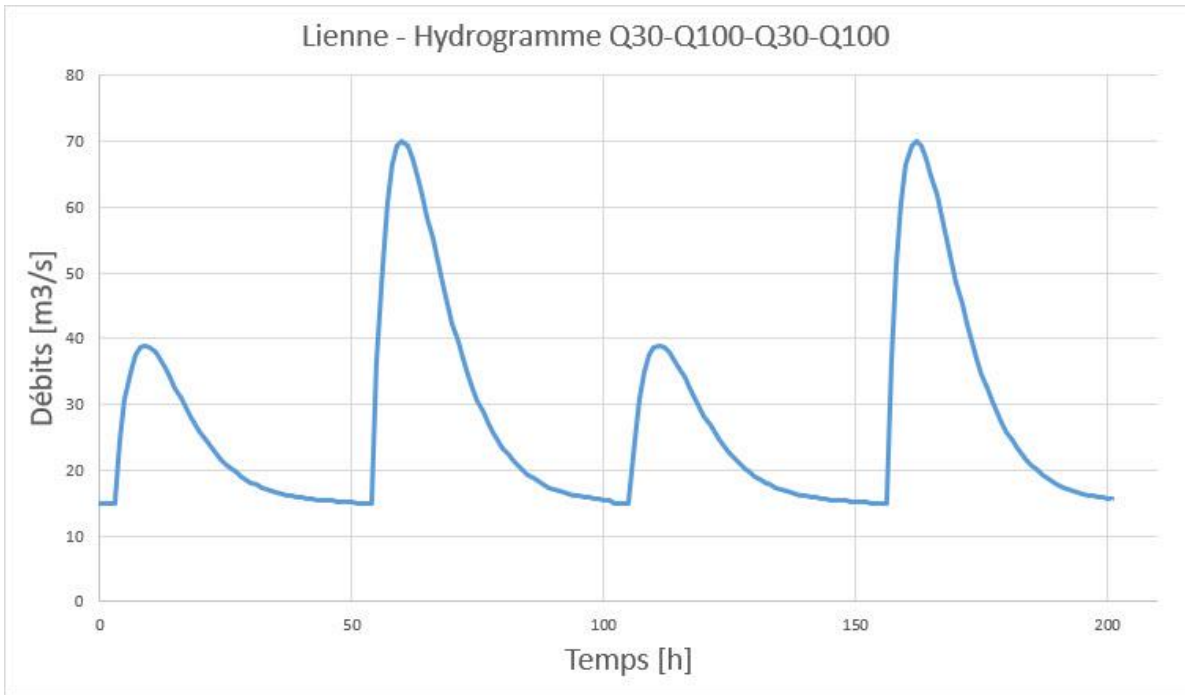


## Annexes

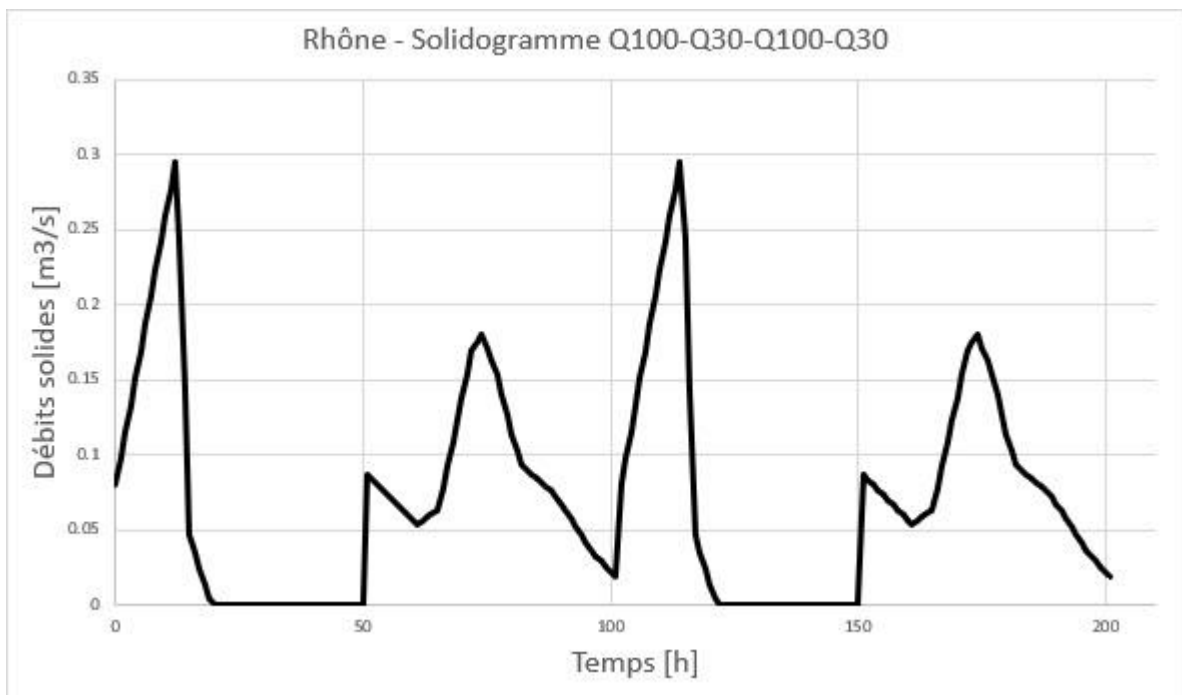
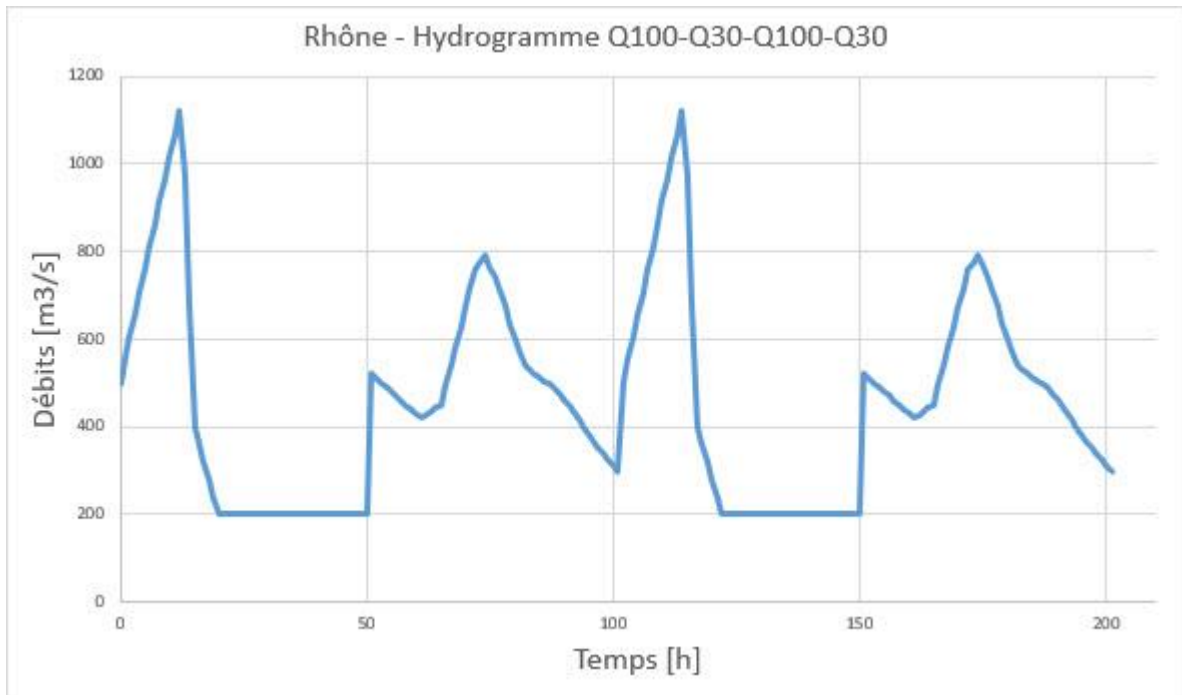
### Annexe 1 Hydrogramme et solidogramme de la Borgne (Q30/Q100)



**Annexe 2** Hydrogramme et solidogramme de la Lienne (Q30/Q100)



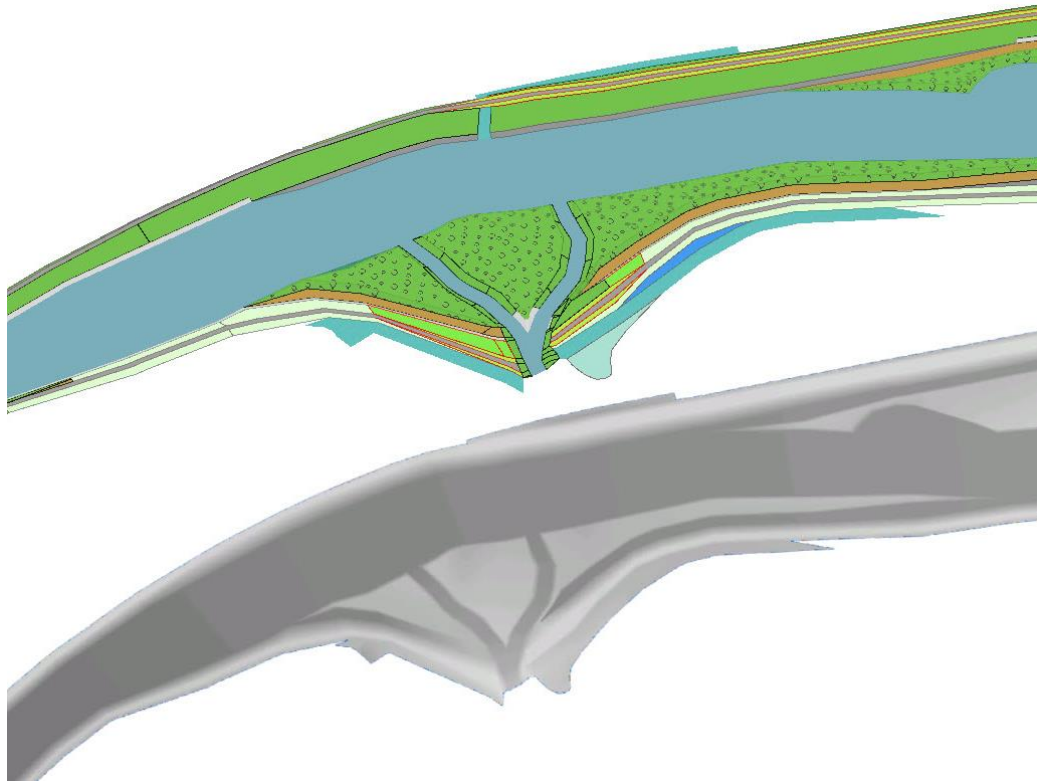
**Annexe 3** Hydrogramme et solidogramme du Rhône (Q100/Q30)



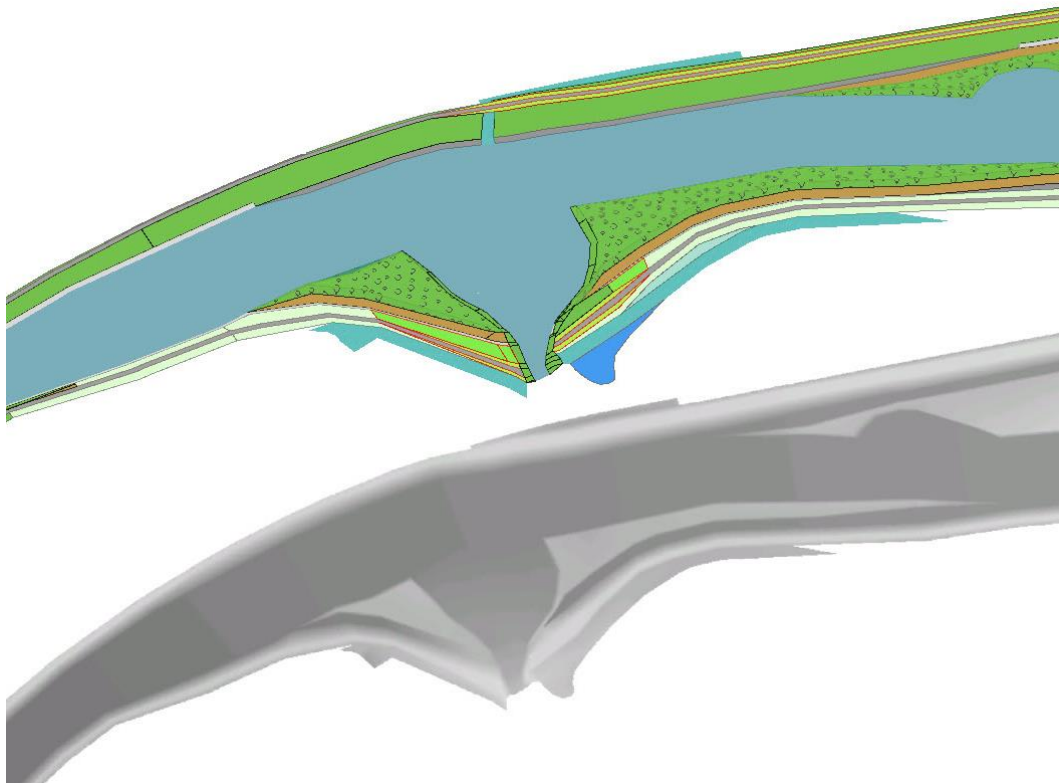


**Annexe 4** Aménagements 3D avec leur MNT correspondant (Borgne)

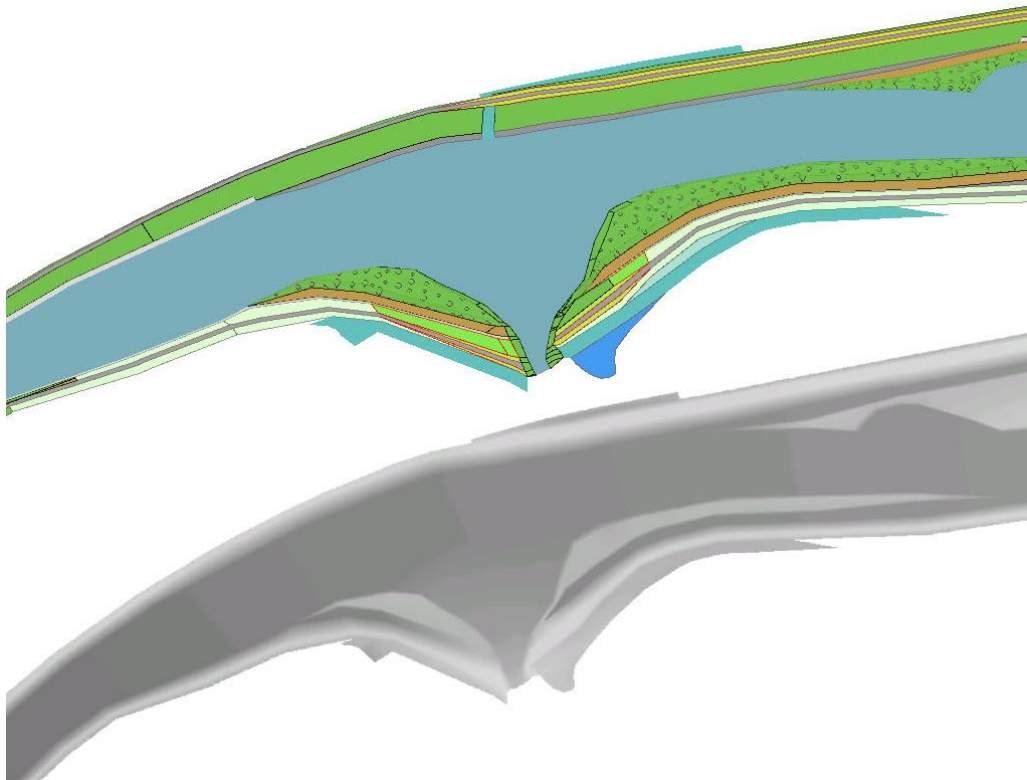
**Bo\_BASE :**



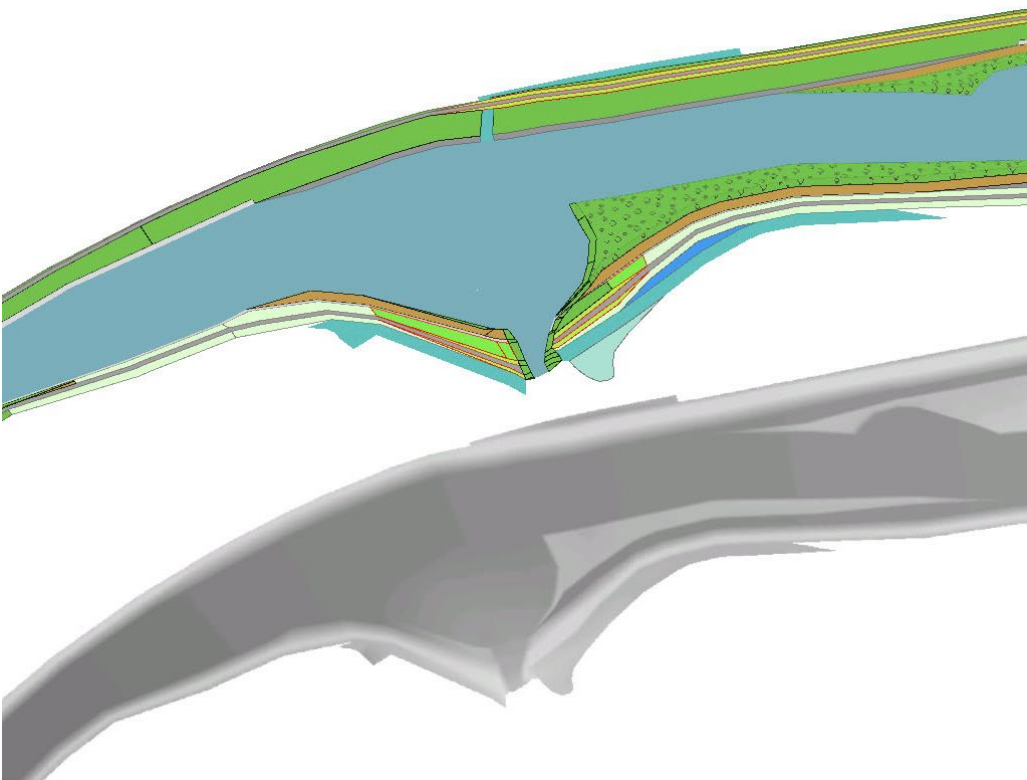
**Bo\_01v1 :**



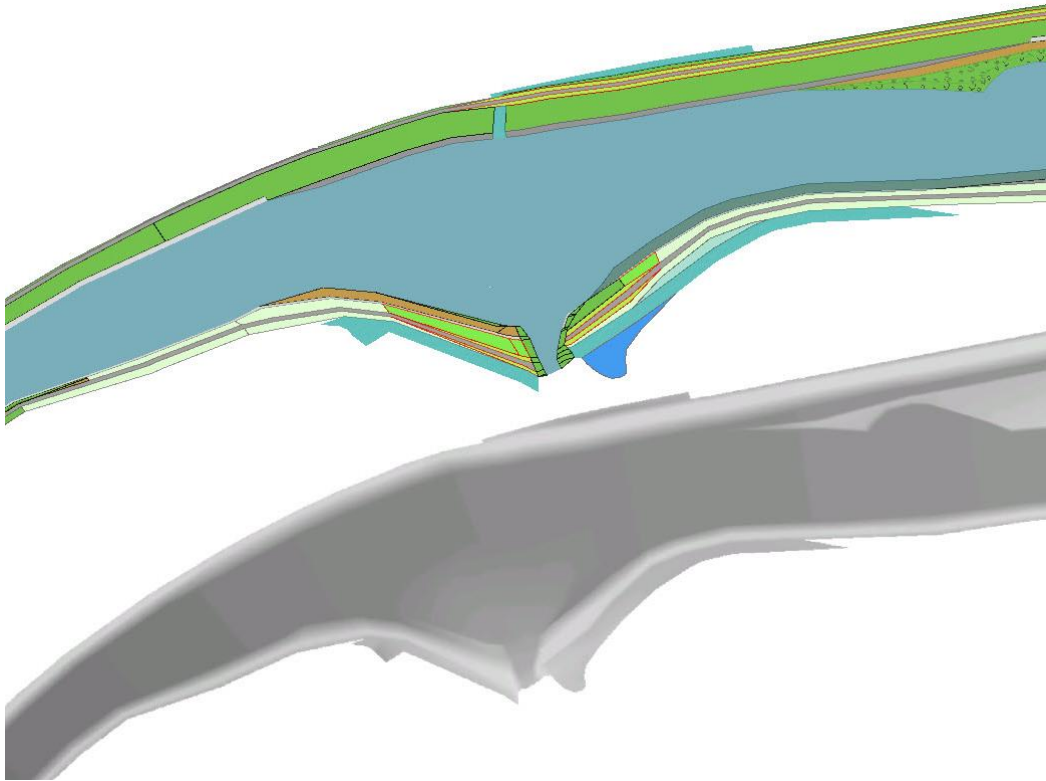
**Bo\_01v2 :**



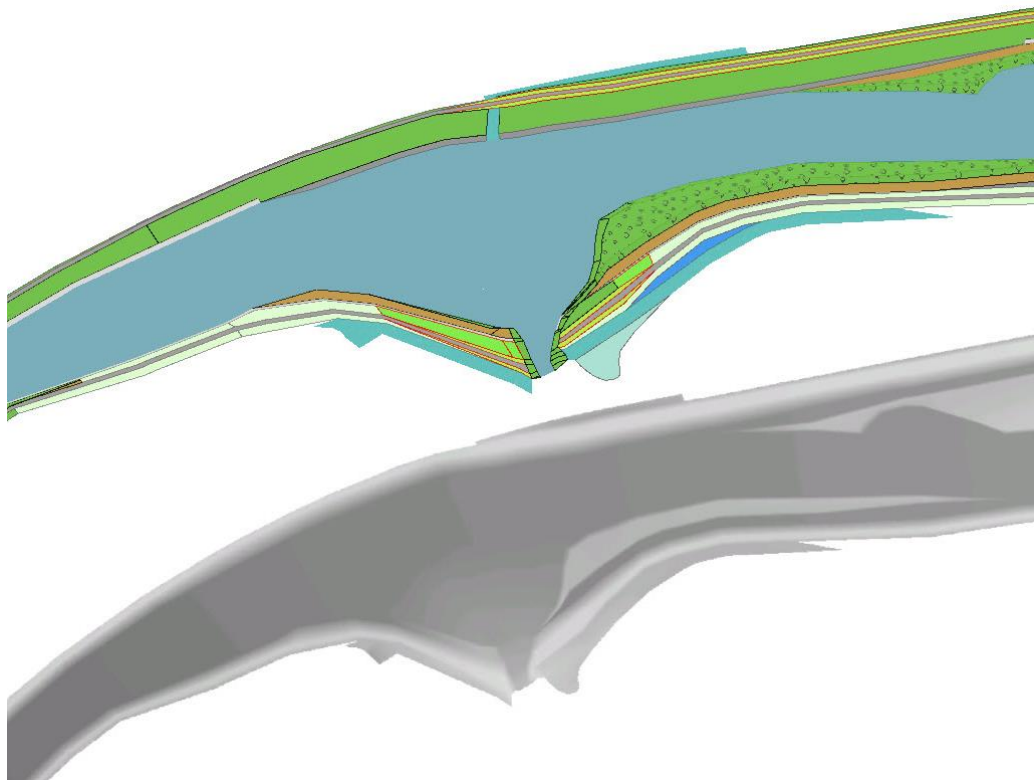
**Bo\_02v1 :**



Bo\_02v2 :

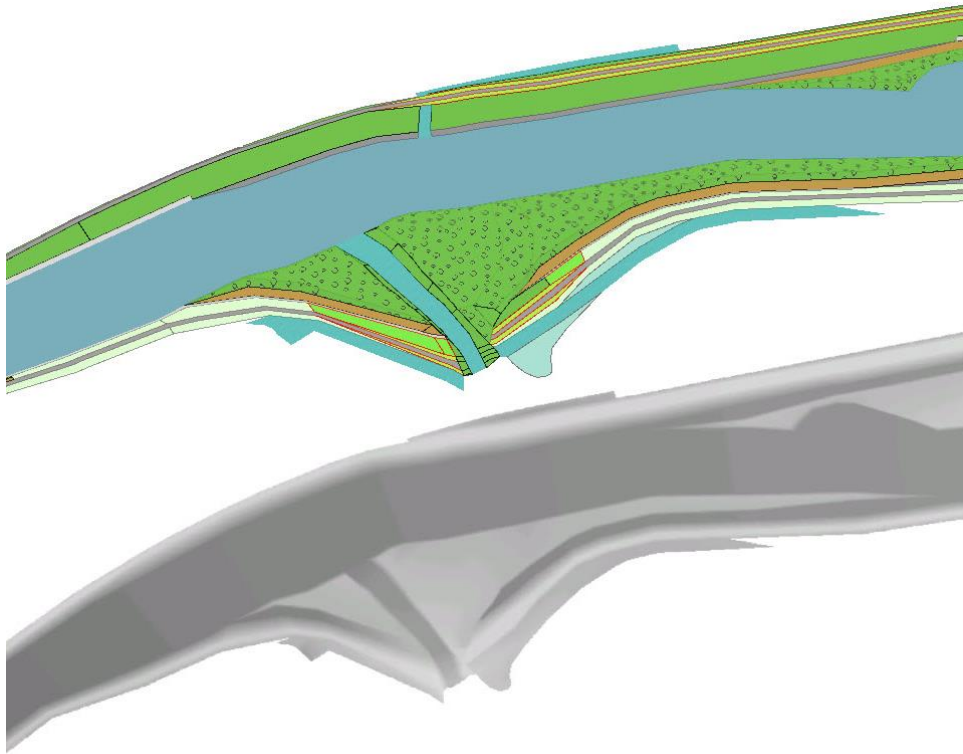


Bo\_02v3 :

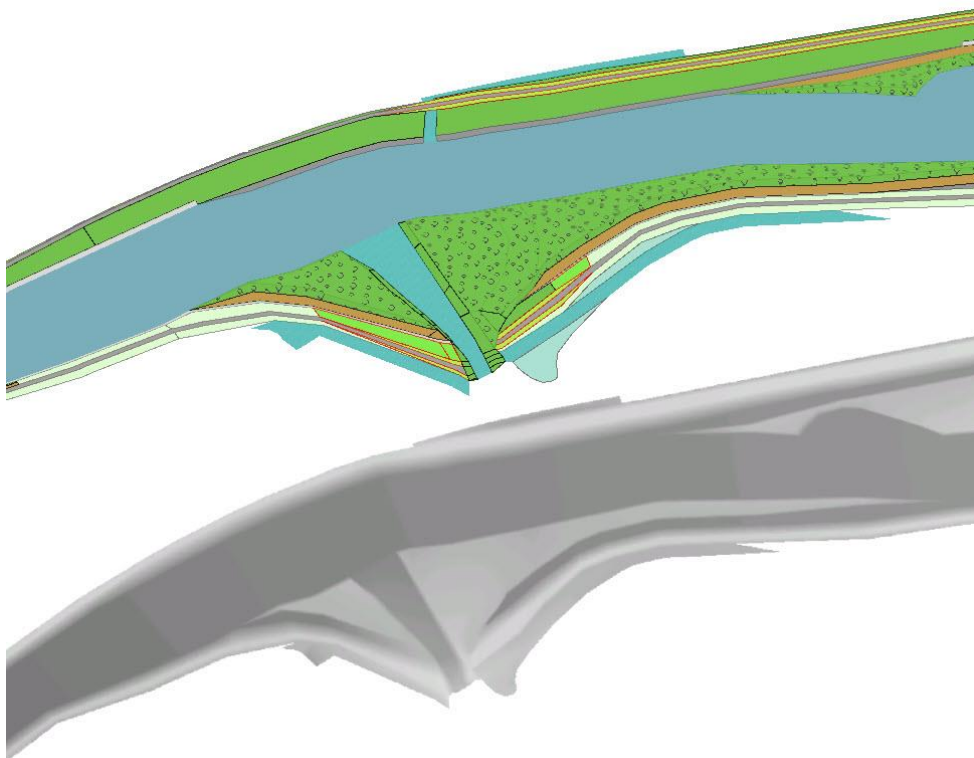




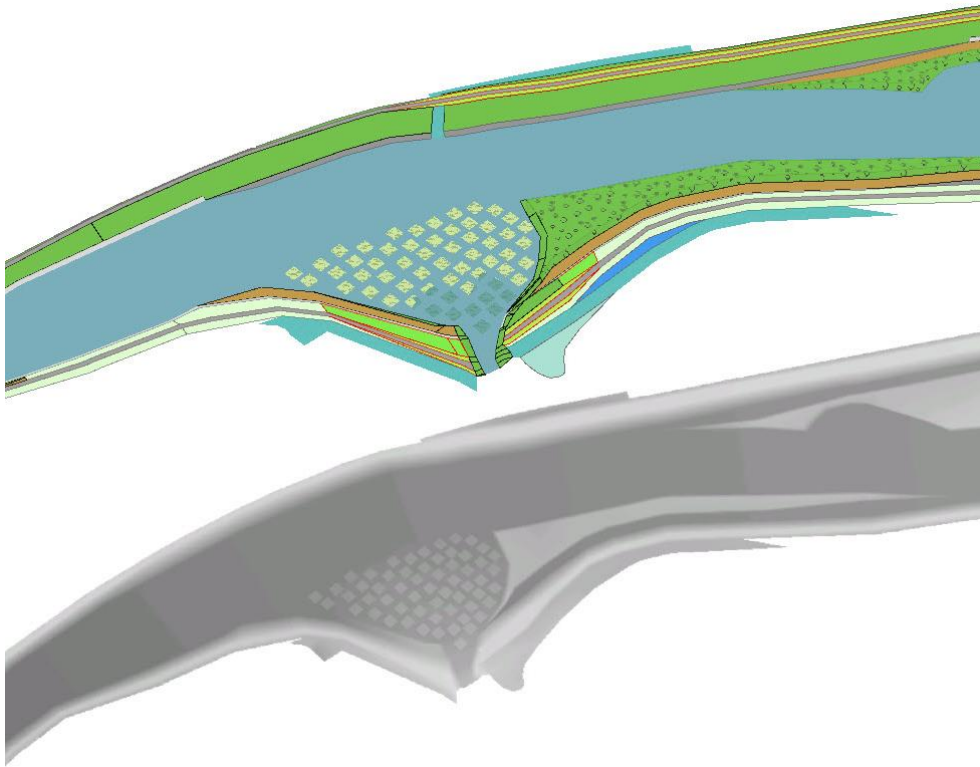
**Bo\_1 :**



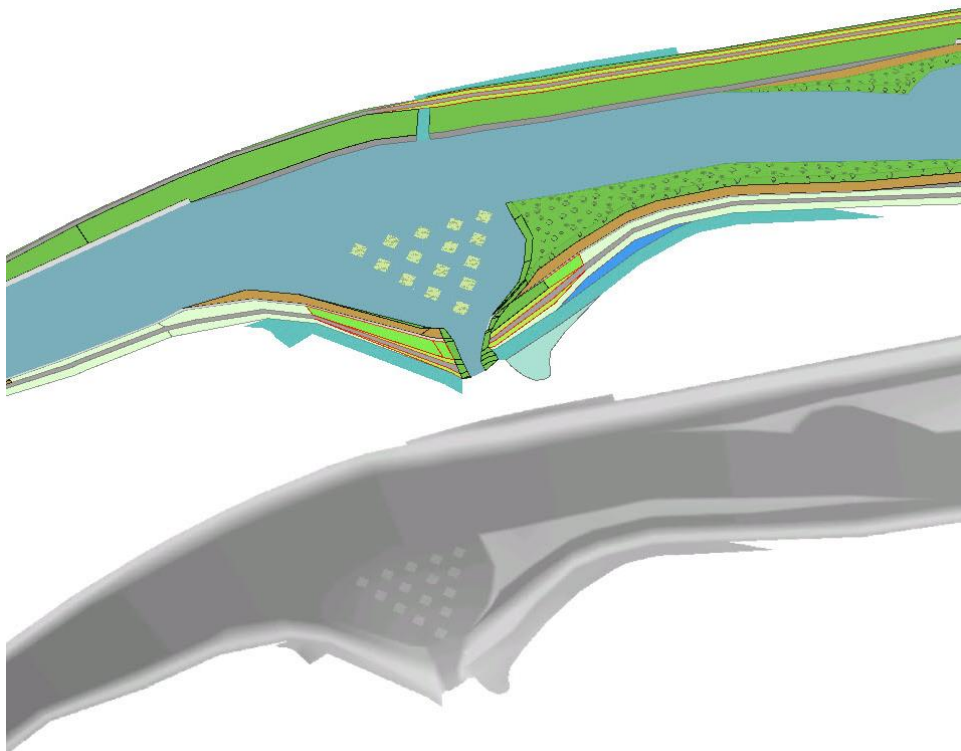
**Bo\_1v1 :**



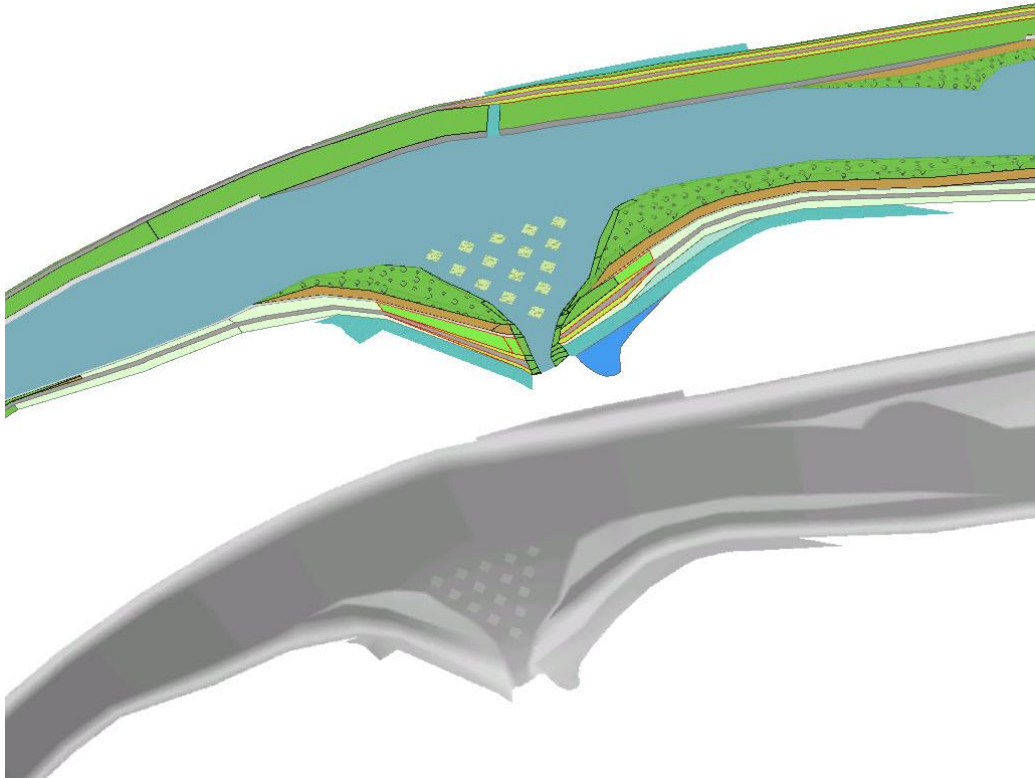
**Bo\_2 :**



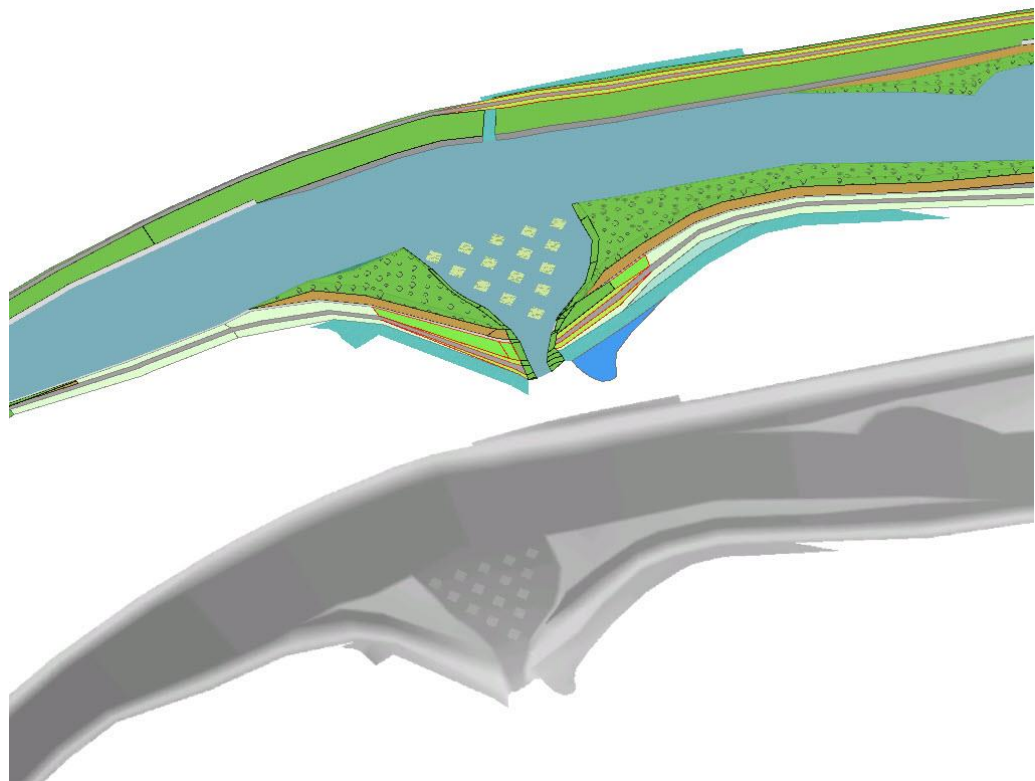
**Bo\_2v1 :**



Bo\_2v2 :

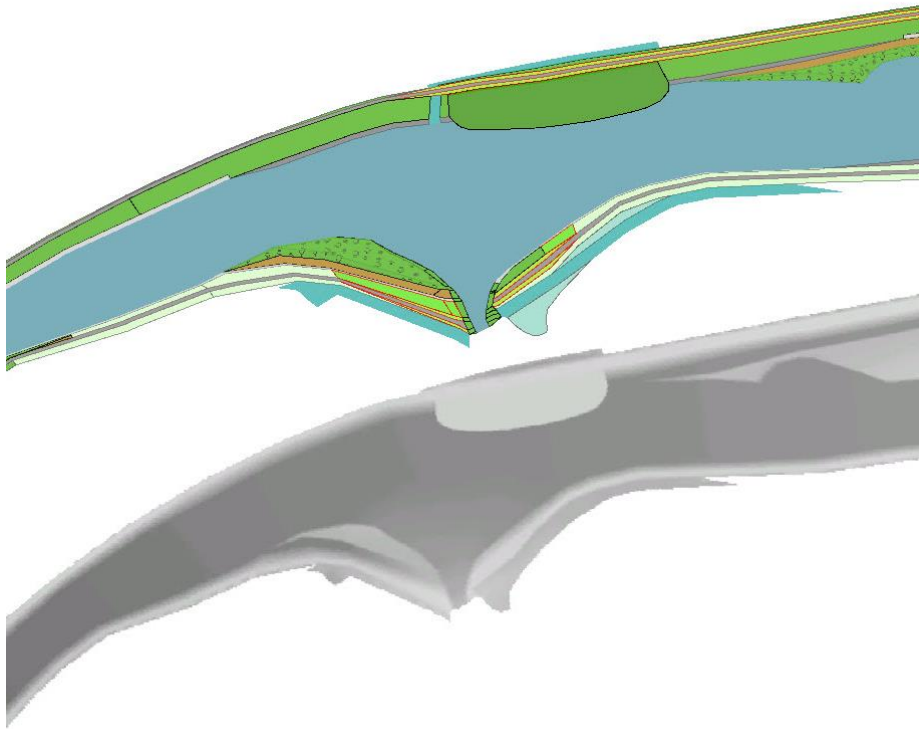


Bo\_2v3 :

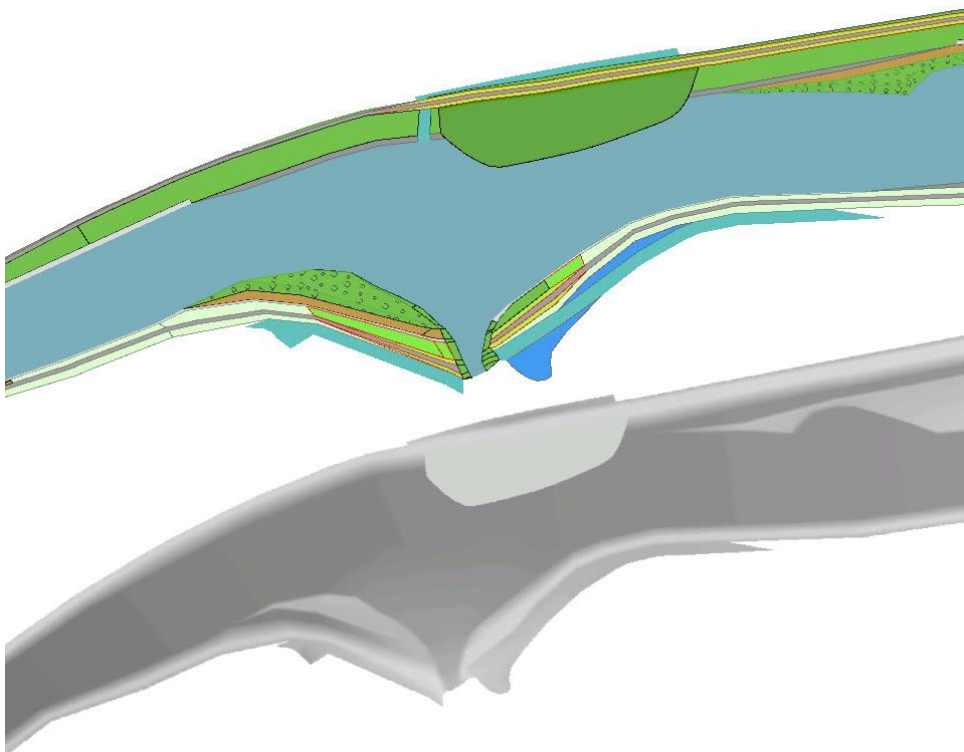




**Bo\_3 :**

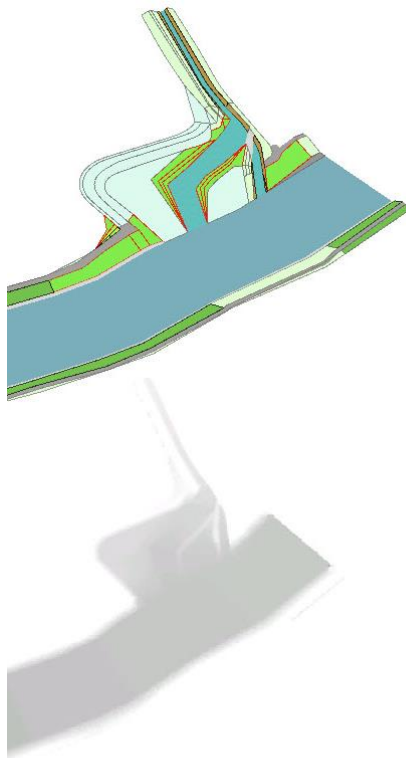


**Bo\_3v1 :**

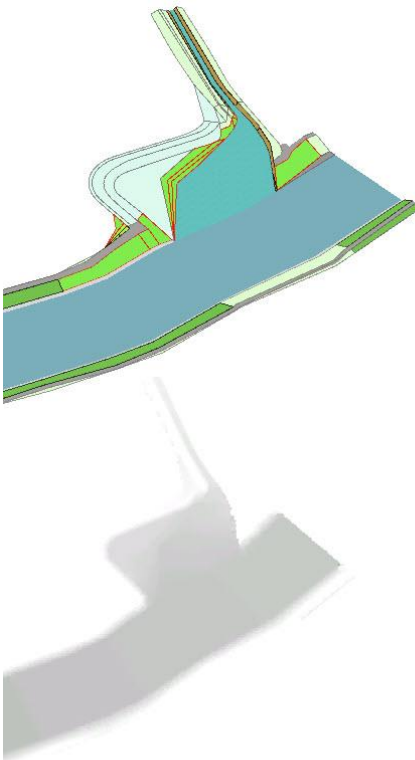


**Annexe 5** Aménagements 3D avec leur MNT correspondant (Lienne)

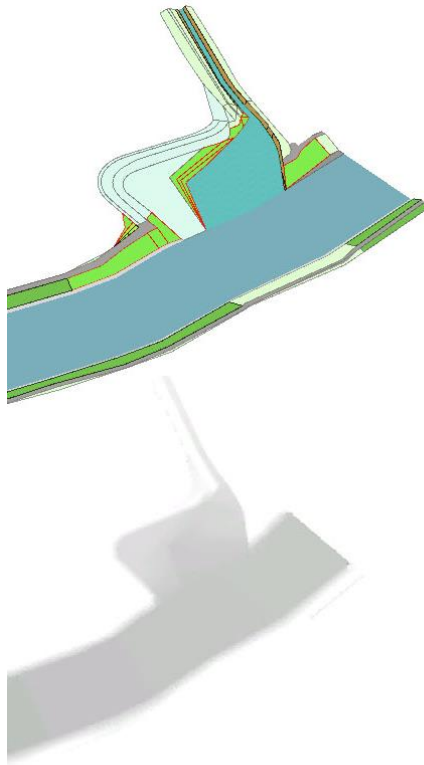
**Li\_BASE :**



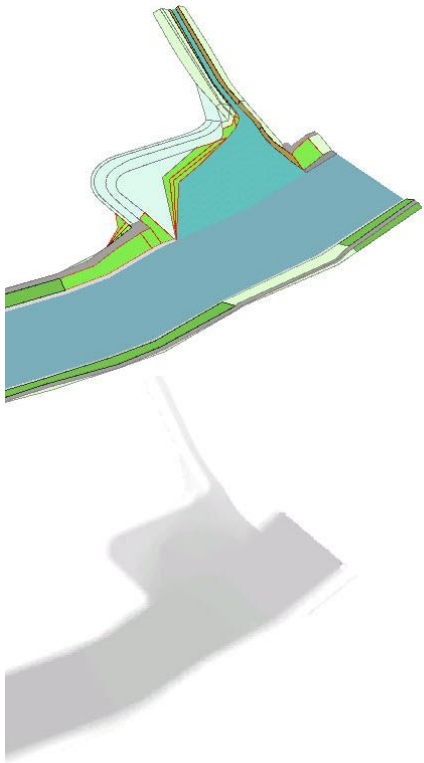
**Li\_0 :**



**Li\_01 :**

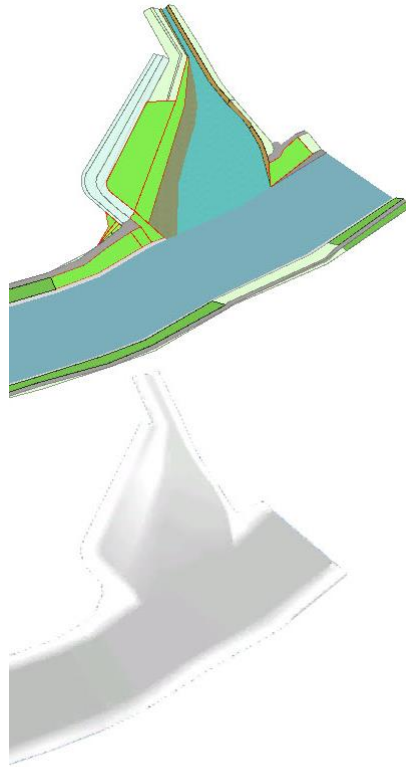


**Li\_02 :**

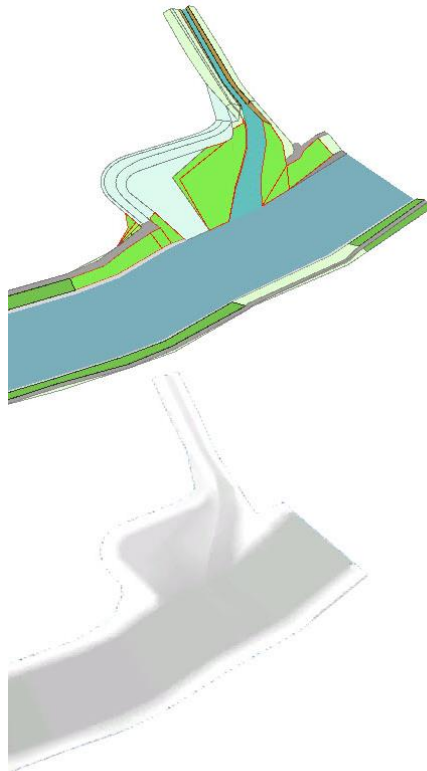




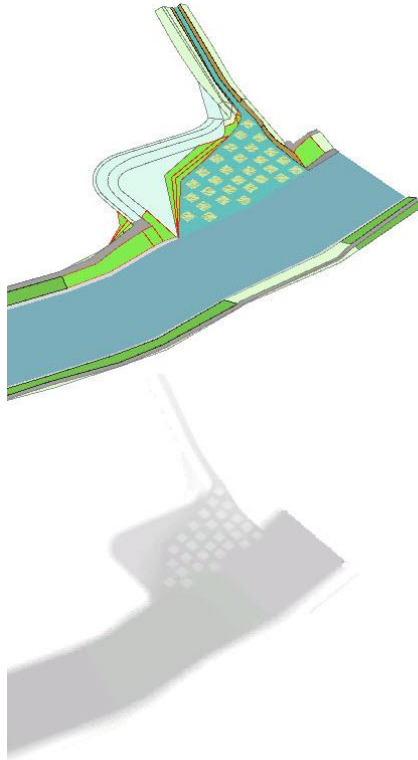
**Li\_03 :**



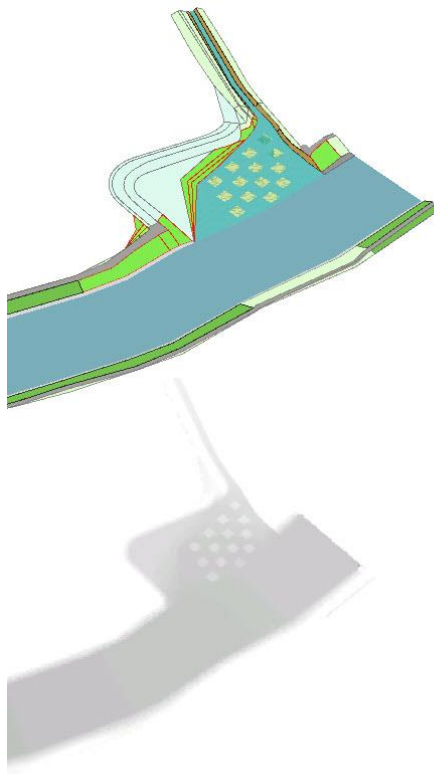
**Li\_1 :**



**Li\_2 :**



**Li\_2v1 :**



## Annexe 6 Fichiers Basement

- « model.json » :

```
{
  "SETUP": {
    "DOMAIN": {
      "BASEPLANE_2D": {
        "GEOMETRY": {
          "INTERPOLATION": {
            "method": "weighted"
          },
        },
        "REGIONDEF": [
          {
            "index": [
              1
            ],
            "name": "Rhone"
          },
          {
            "index": [
              2
            ],
            "name": "Affluent"
          },
          {
            "index": [
              3
            ],
            "name": "Berge"
          },
          {
            "index": [
              4
            ],
            "name": "Fixe"
          }
        ],
        "STRINGDEF": [
          {
            "name": "In_Rhone",
            "upstream_direction": "left"
          },
          {
            "name": "In_Borgne",
            "upstream_direction": "left"
          }
        ]
      }
    }
  }
}
```

## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

```
},  
{  
  "name": "Out_Rhone",  
  "upstream_direction": "left"  
}  
],  
"mesh_file": "Bo_01v1fixe.2dm"  
},  
"HYDRAULICS": {  
  "BOUNDARY": {  
    "STANDARD": [  
      {  
        "discharge_file": "Q100_Q30_Rhone_hydro.txt",  
        "name": "In_Rhone",  
        "slope": 0.004728,  
        "string_name": "In_Rhone",  
        "type": "uniform_in"  
      },  
      {  
        "discharge_file": "Q30_Q100_Borgne_hydro.txt",  
        "name": "In_Borgne",  
        "slope": 0.003,  
        "string_name": "In_Borgne",  
        "type": "uniform_in"  
      },  
      {  
        "name": "Out_Rhone",  
        "slope": 0.004,  
        "string_name": "Out_Rhone",  
        "type": "uniform_out"  
      }  
    ]  
  },  
  "FRICTION": {  
    "default_friction": 0.5,  
    "regions": [  
      {  
        "friction": 0.035,  
        "region_name": "Rhone"  
      },  
      {  
        "friction": 0.03,  
        "region_name": "Affluent"  
      }  
    ]  
  }  
}
```



## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

```
{
  "friction": 0.075,
  "region_name": "Berge"
},
{
  "friction": 0.03,
  "region_name": "Fixe"
}
},
"type": "manning"
},
"INITIAL": {
  "type": "dry"
},
"PARAMETER": {
  "CFL": 0.95,
  "fluid_density": 1000.0,
  "max_time_step": 100.0,
  "minimum_water_depth": 0.02,
  "safe_mode": "off"
}
},
"MORPHOLOGY": {
  "BEDLOAD": {
    "BOUNDARY": {
      "STANDARD": [
        {
          "name": "In_Rhone",
          "sediment_discharge_file": "Q100_Q30_Rhone_solid.txt",
          "string_name": "In_Rhone",
          "type": "sedimentograph"
        },
        {
          "name": "In_Borgne",
          "sediment_discharge_file": "Q30_Q100_Borgne_solid.txt",
          "string_name": "In_Borgne",
          "type": "sedimentograph"
        },
        {
          "name": "Out_Rhone",
          "reference_bed_elevation": 486.298,
          "string_name": "Out_Rhone",
          "type": "equilibrium_out"
        }
      ]
    }
  }
}
```

## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

```
]
},
"DIRECTION": {
  "LATERAL_SLOPE": {
    "factor": 1.5
  }
},
"FORMULA": {
  "factor": 1.0,
  "type": "MPM"
},
"BEDMATERIAL": {
  "FIXED_BED": {
    "correction_accuracy": 0.001,
    "max_iteration": 300,
    "regions": [
      {
        "region_name": "Affluent",
        "z_rel": -5.0
      },
      {
        "region_name": "Berge",
        "z_rel": -0.2
      },
      {
        "region_name": "Rhone",
        "z_rel": -5.0
      },
      {
        "region_name": "Fixe",
        "z_rel": 0.0
      }
    ],
    "type": "region_defined"
  },
  "GRAIN_CLASS": {
    "diameters": [
      0.031
    ]
  },
  "GRAVITATIONAL_TRANSPORT": {
    "critical_angle_dry": 40.0,
```

## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

```
"critical_angle_wet": 25.0
},
"INCIPIENT_MOTION": {
  "repose_angle": 30,
  "type_bed": "van_rijn"
},
"INITIAL": {
  "type": "mesh"
},
"PARAMETER": {
  "morphodynamic_start": 0.0,
  "sediment_density": 2680.0,
  "sediment_porosity": 0.4
}
}
},
"PHYSICAL_PROPERTIES": {
  "gravity": 9.81
}
},
"simulation_name": "Q30Bo_Q100Rho_Bo_01v1_5m"
}
}
```

- « simulation.json » :

```
{
  "SIMULATION": {
    "OUTPUT": [
      "water_depth",
      "flow_velocity",
      "delta_z"
    ],
    "TIME": {
      "end": 723600.0,
      "out": 3600.0,
      "start": 0.0
    },
    "TIMESTEP": {
      "init": 1.0,
      "minimum": 0.0001
    }
  }
}
```

## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

- « results.json » :

```
{
  "RESULTS":{
    "EXPORT": [
      {
        "format": "xdmf"
      }
    ]
  }
}
```

- Hydrogramme :

#TIME[s]	VALUE
0	500
3600	552
7200	603
10800	655
14400	707
18000	758
21600	810
25200	862
28800	913
32400	965
36000	1017
39600	1068
43200	1120
46800	976
50400	688
54000	400
57600	360
61200	320
64800	280
68400	240
72000	200
...	...



## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

- Solidogramme :

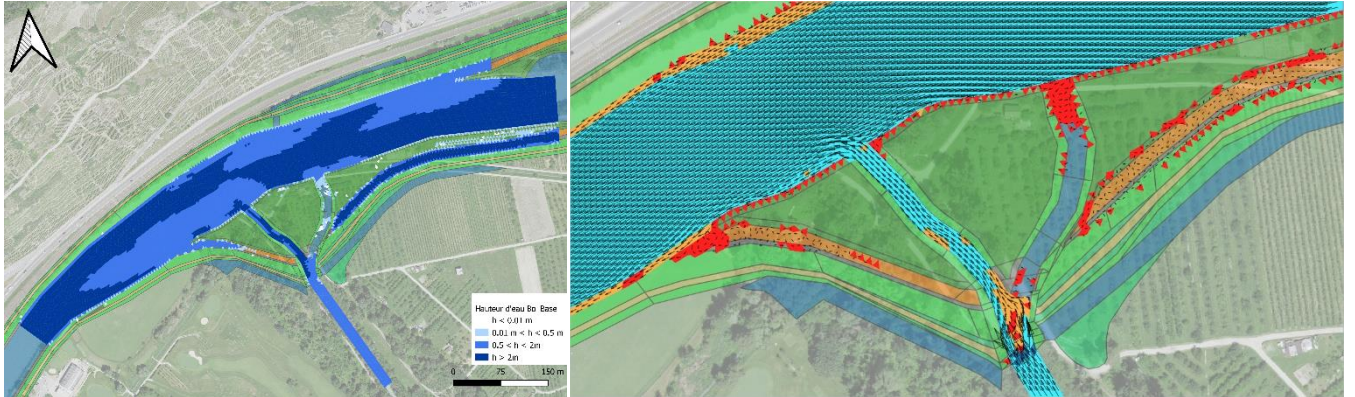
#TIME[s]	VALUE
0	0.07977
3600	0.09728
7200	0.11472
10800	0.13268
14400	0.15076
18000	0.16856
21600	0.18676
25200	0.20496
28800	0.22280
32400	0.24097
36000	0.25909
39600	0.27683
43200	0.29485
46800	0.24480
50400	0.14414
54000	0.04740
57600	0.03523
61200	0.02378
64800	0.01342
68400	0.00480
72000	0.00000
75600	0.00000
....	...



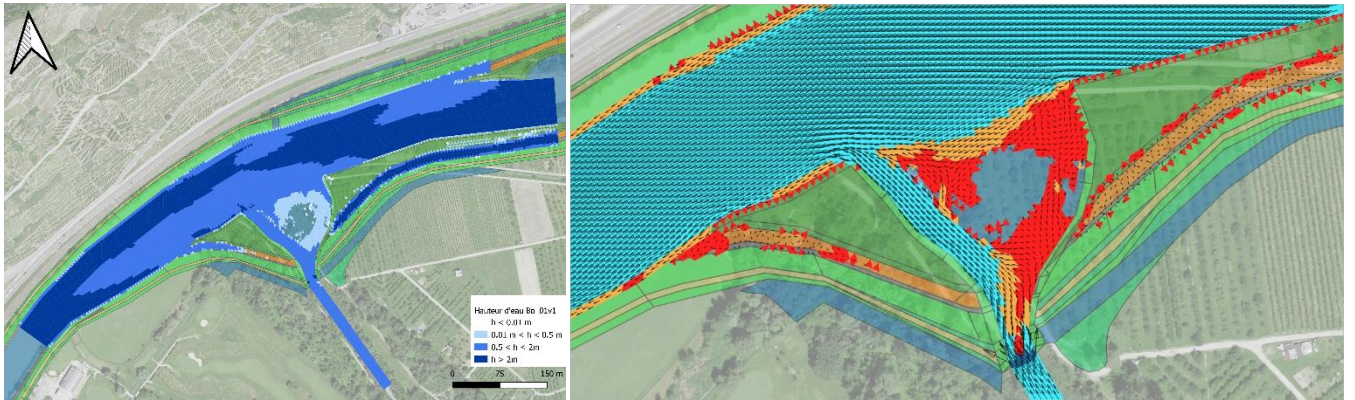
# Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

**Annexe 7** Hauteurs d'eau à gauche et vitesses (rouge (0.01 à 5m/s), orange (0.5 à 1m/s), bleu clair (1 à 3m/s), bleu foncé (>3m/s)) à droite. Borgne (fin de la concomitance des crues)

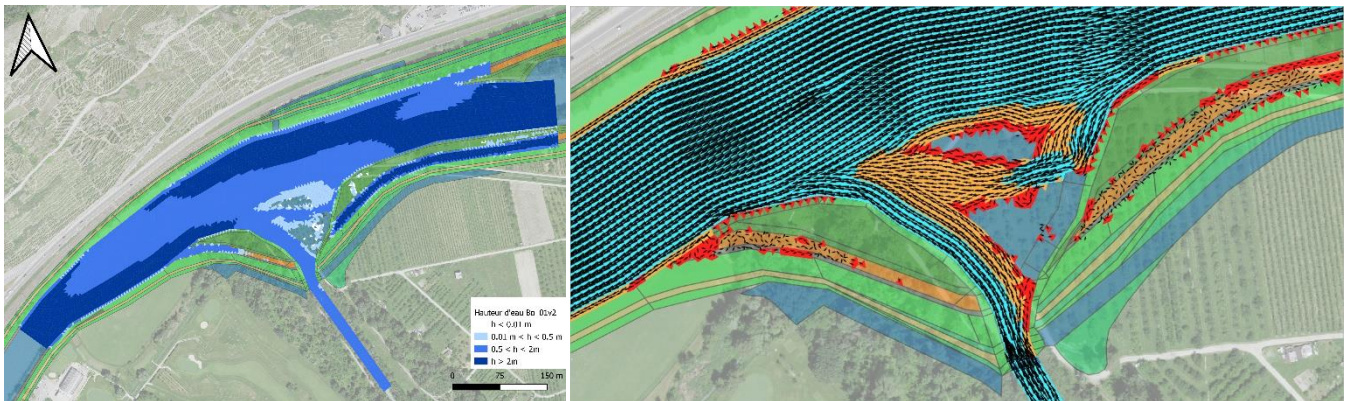
**Bo\_BASE :**



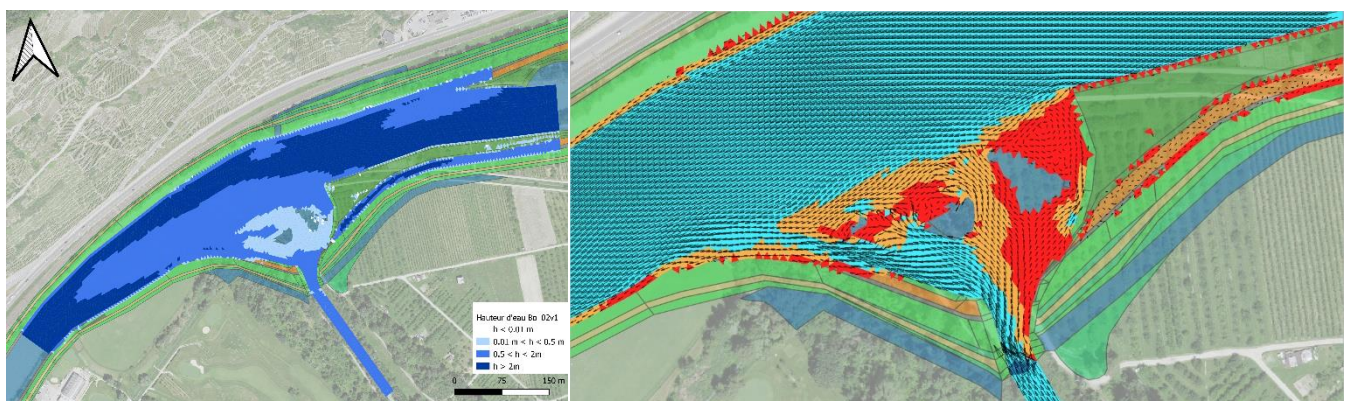
**Bo\_01v1 :**



**Bo\_01v2 :**



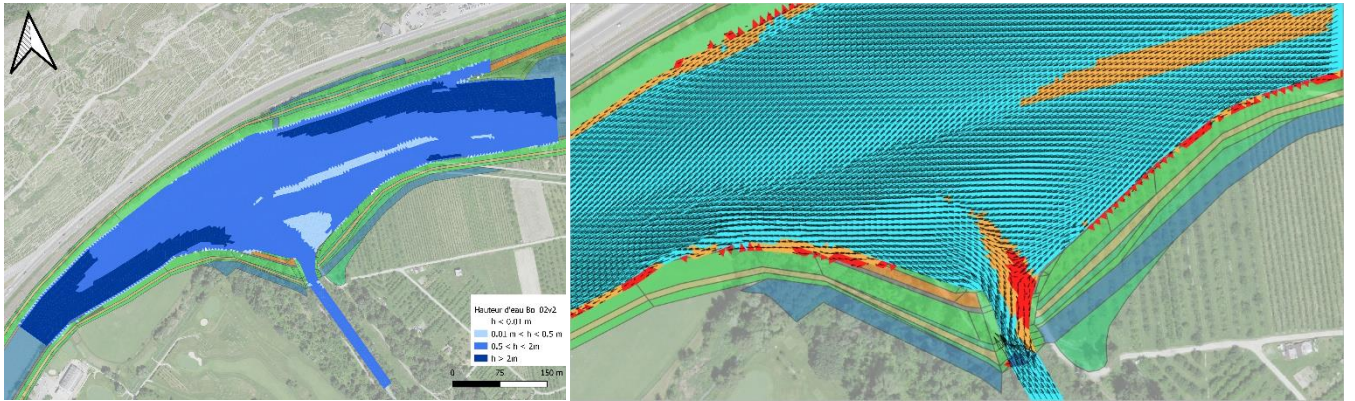
**Bo\_02v1 :**



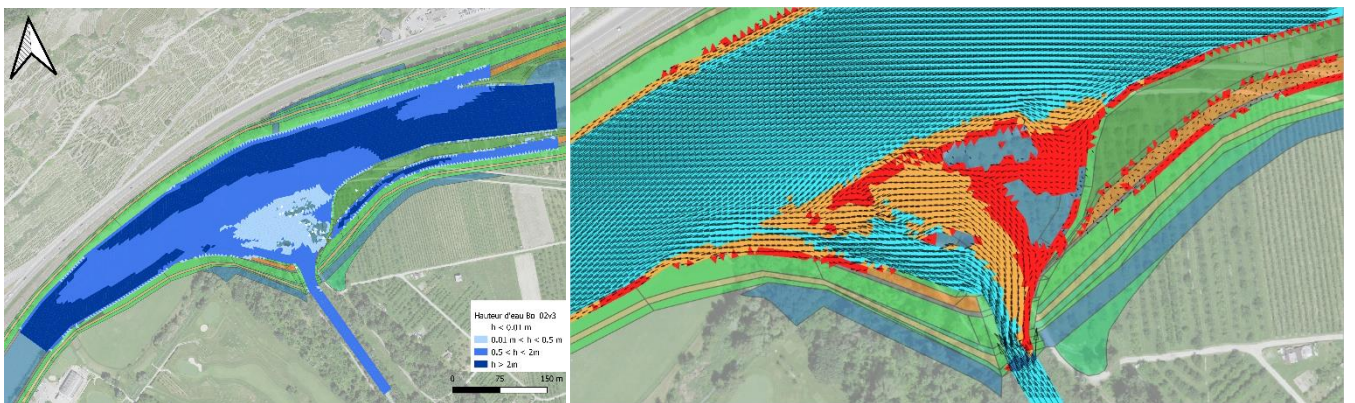


# Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

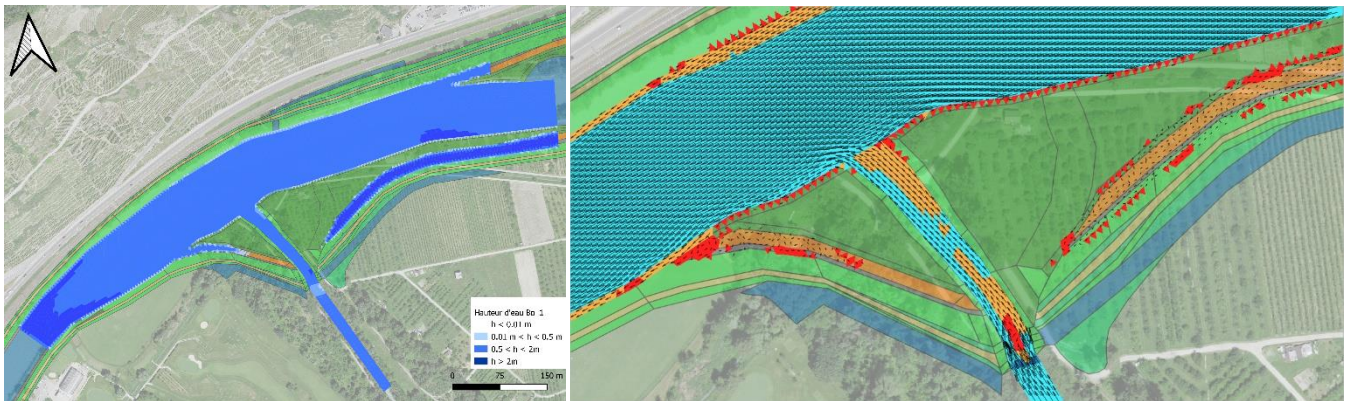
**Bo\_02v2 :**



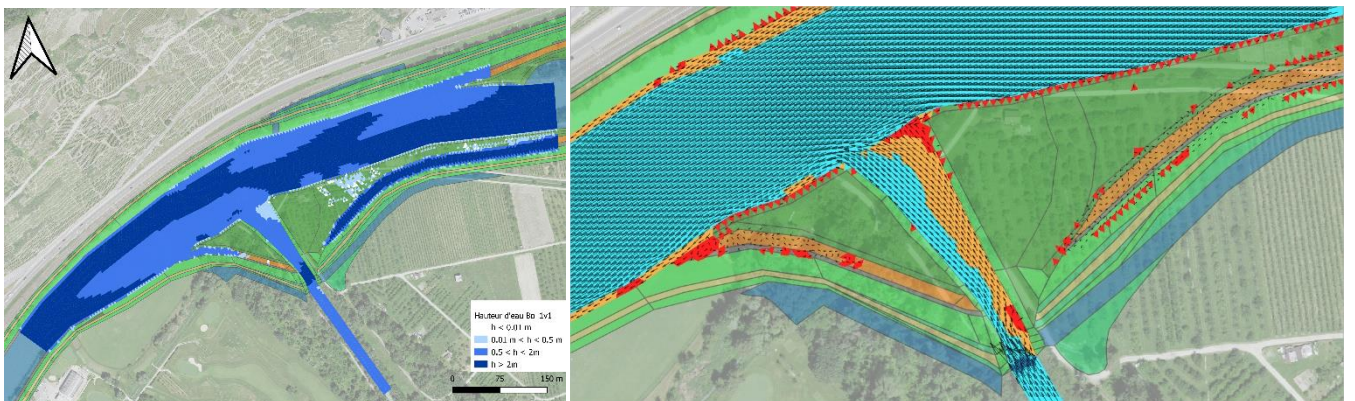
**Bo\_02v3 :**



**Bo\_1 :**

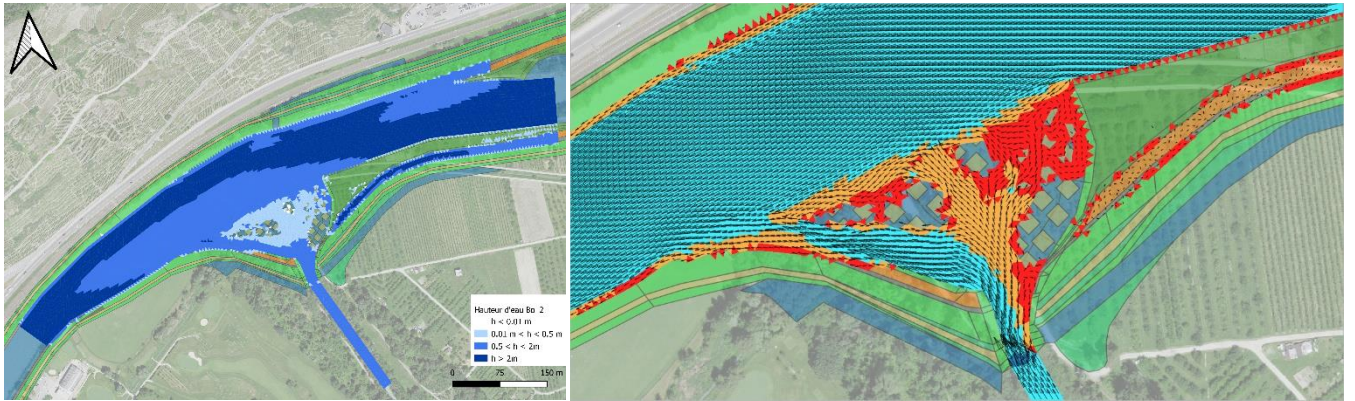


**Bo\_1v1 :**

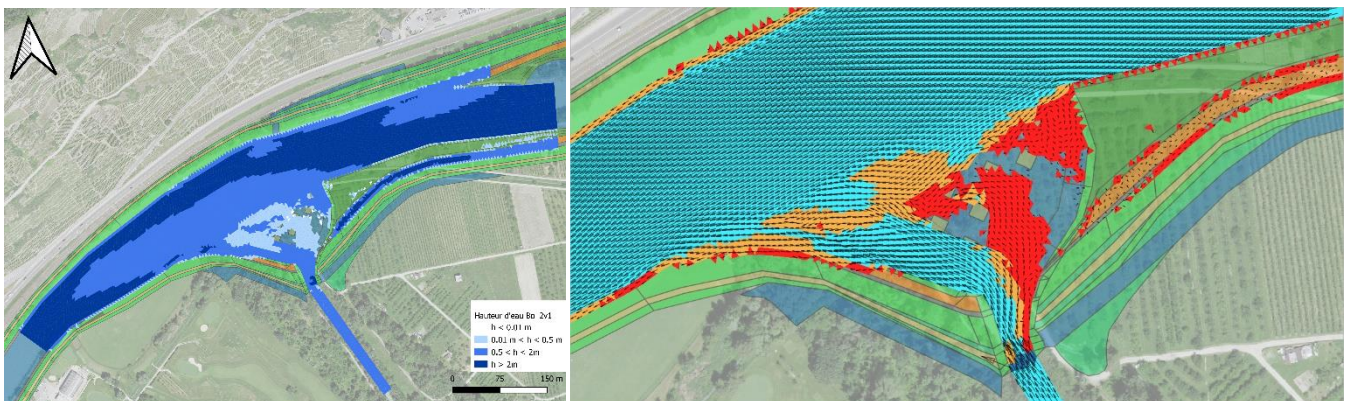




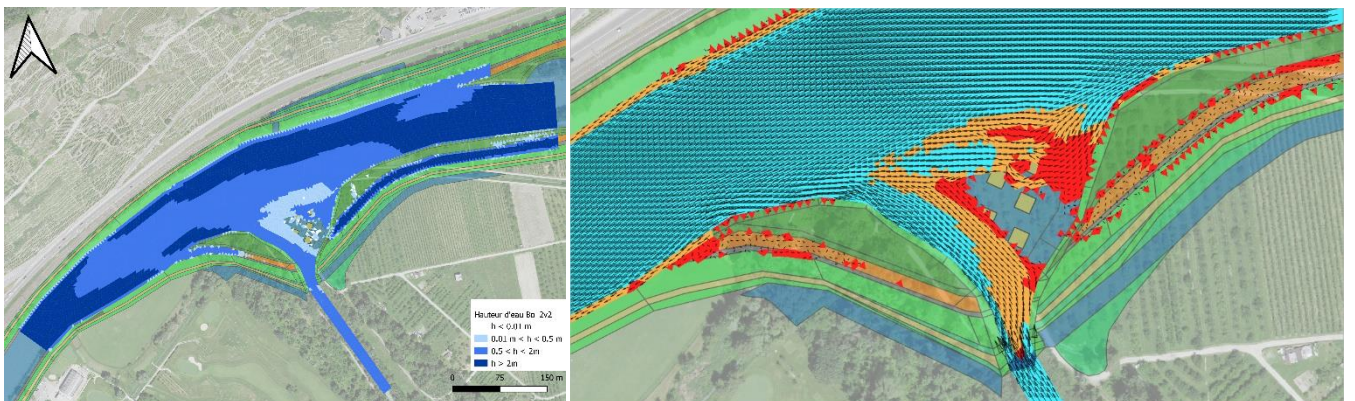
**Bo\_2 :**



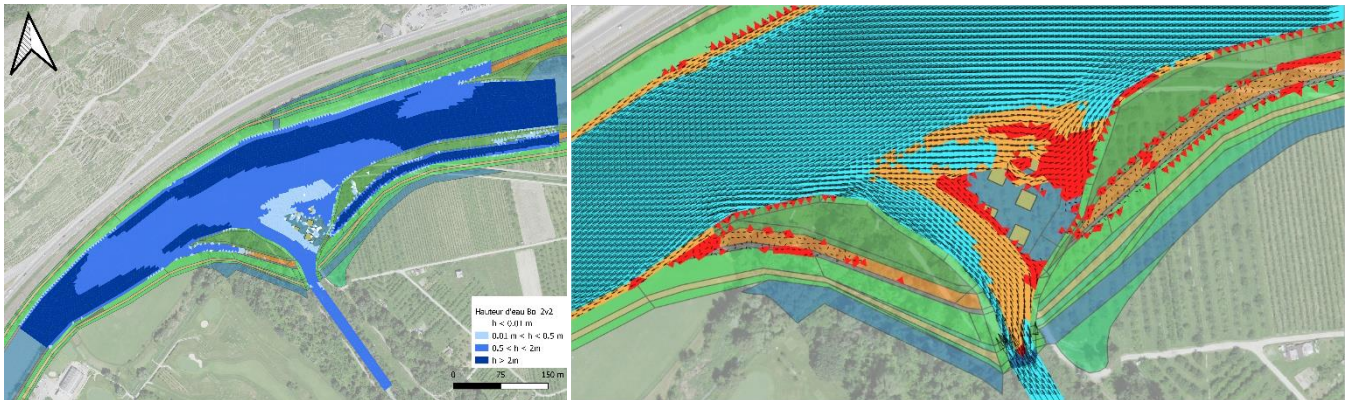
**Bo\_2v1 :**



**Bo\_2v2 :**

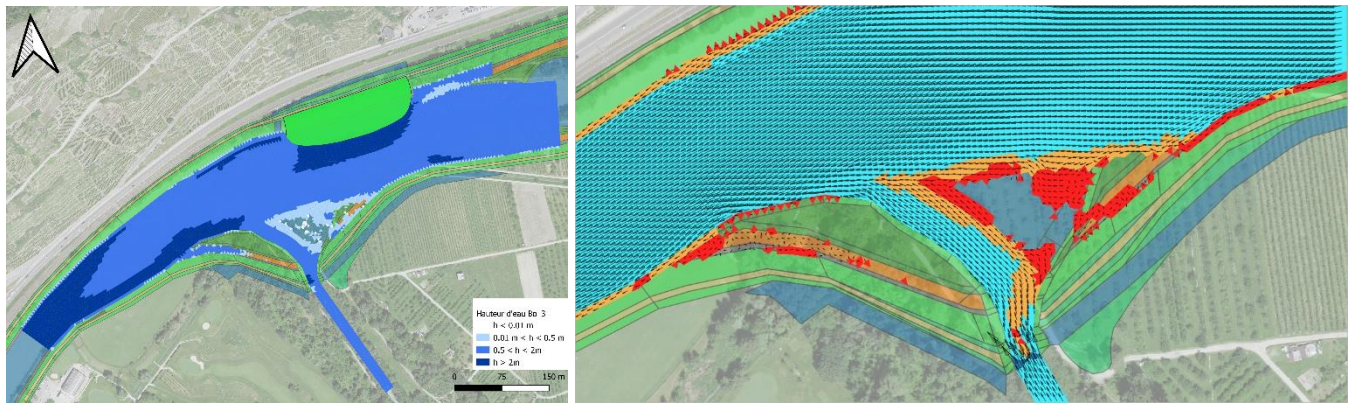


**Bo\_2v3 :**

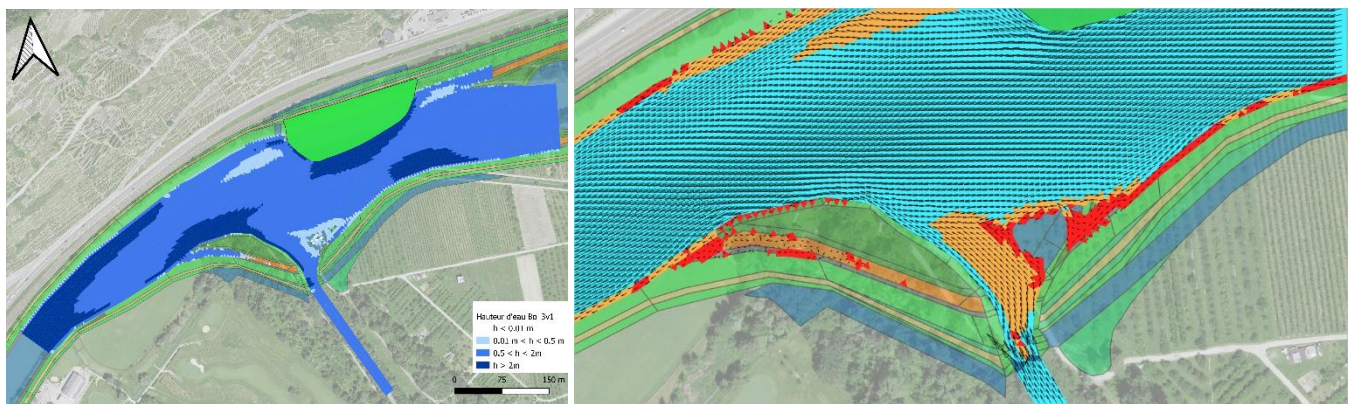




Bo\_3 :



Bo\_3v1 :

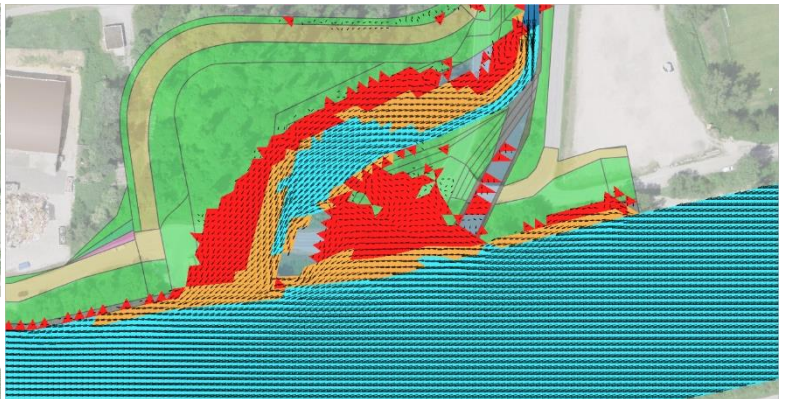
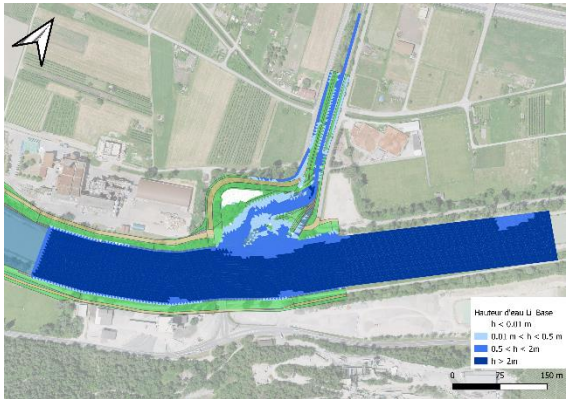




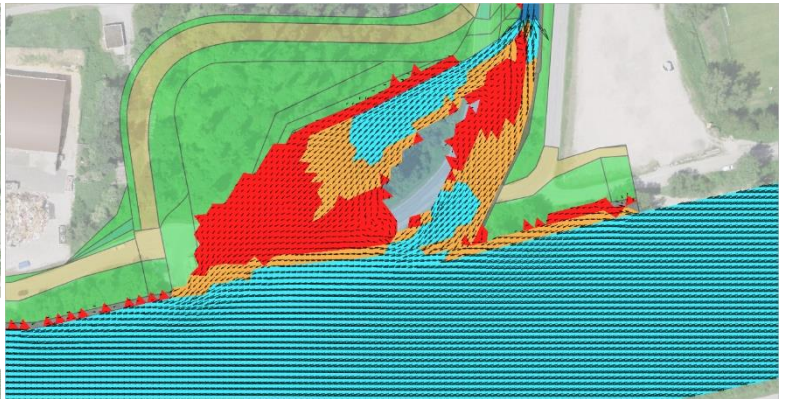
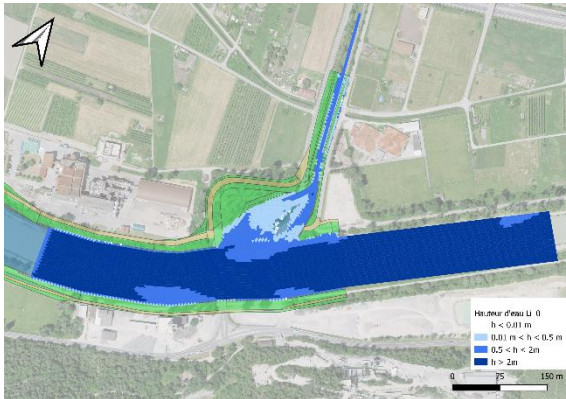
# Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

**Annexe 8** Hauteurs d'eau à gauche et vitesses (rouge (0.01 à 5m/s), orange (0.5 à 1m/s), bleu clair (1 à 3m/s), bleu foncé (>3m/s)) à droite. Borgne (fin de la concomitance des crues)

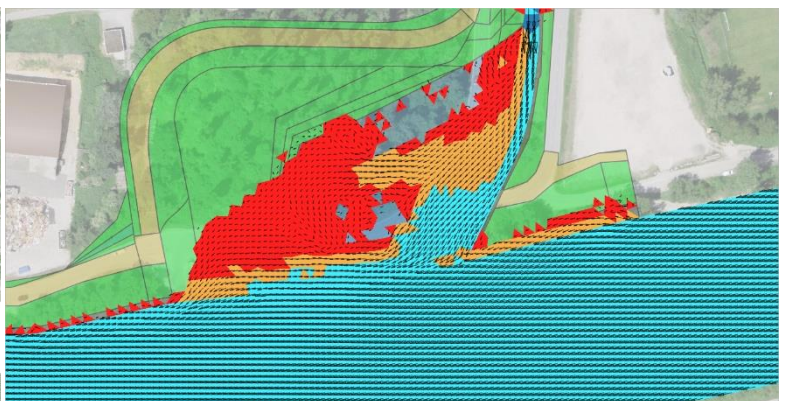
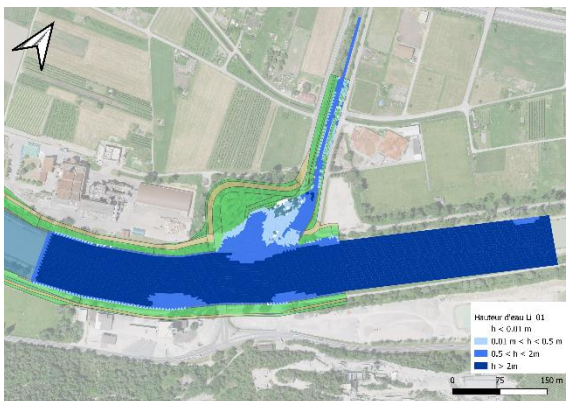
**Li\_BASE:**



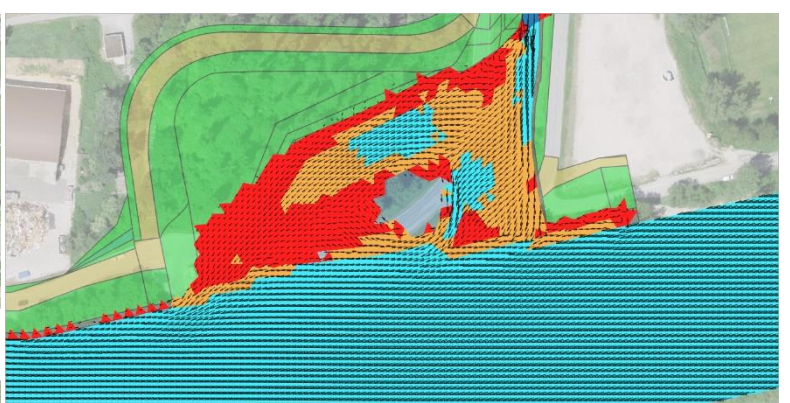
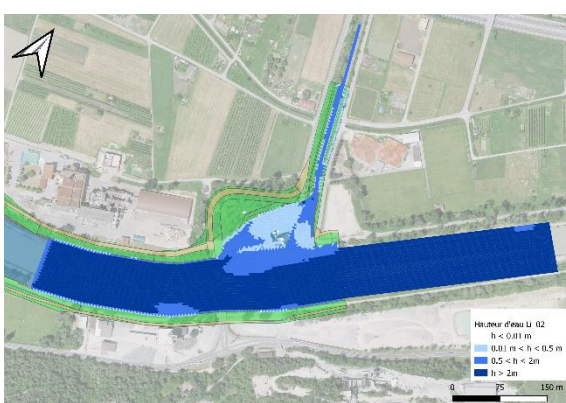
**Li\_0:**



**Li\_01:**

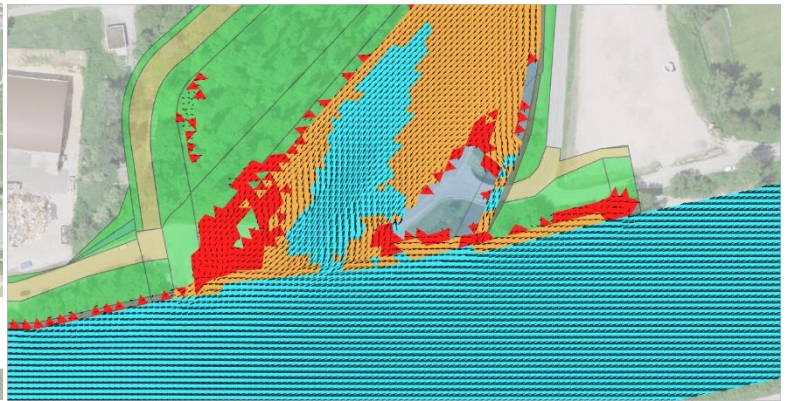
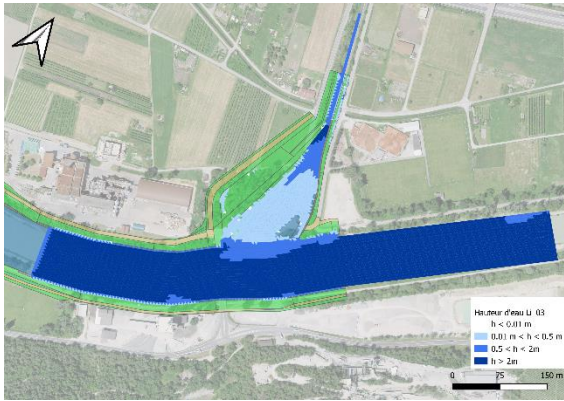


**Li\_02:**

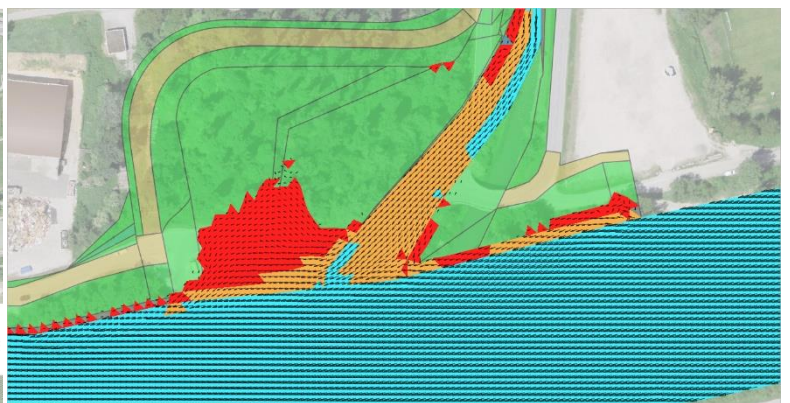
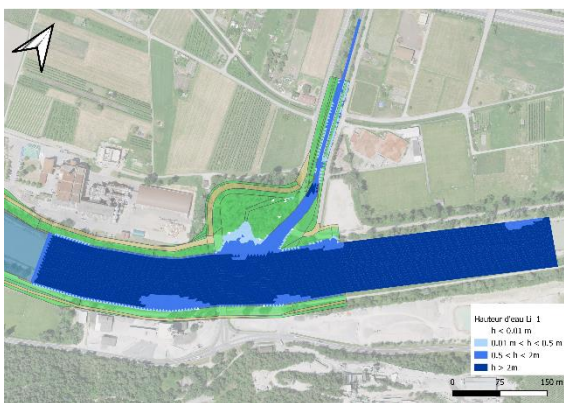




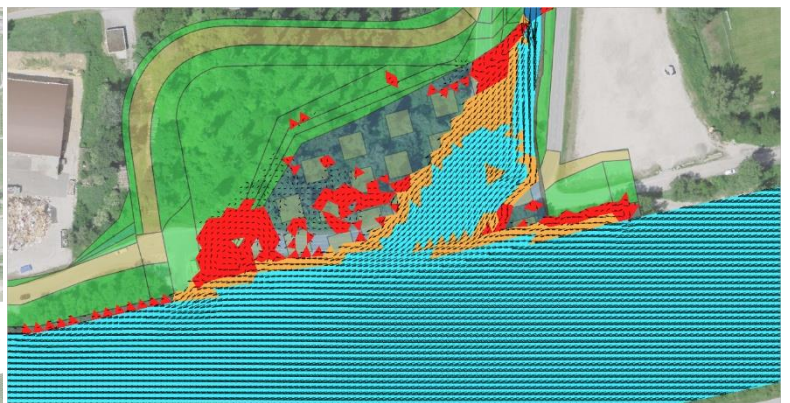
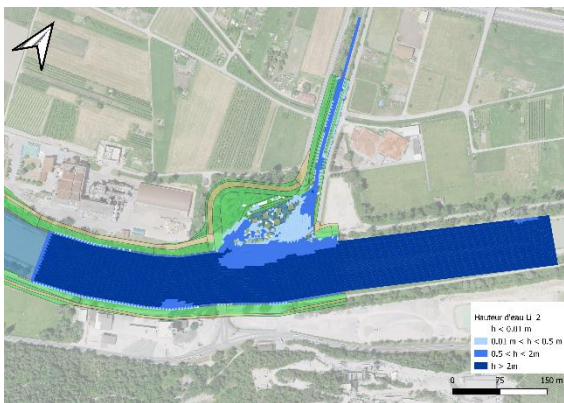
Li\_03:



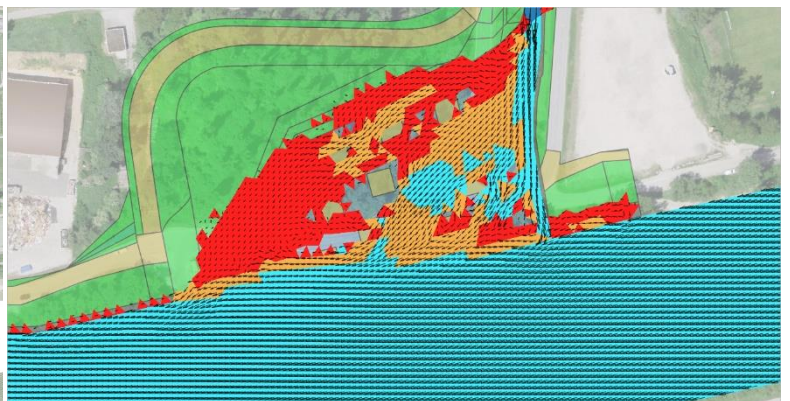
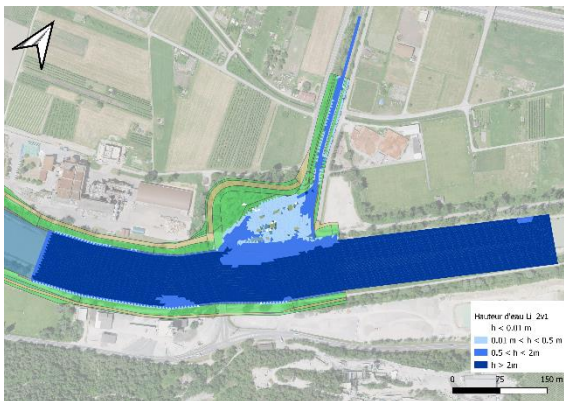
Li\_1:



Li\_2:



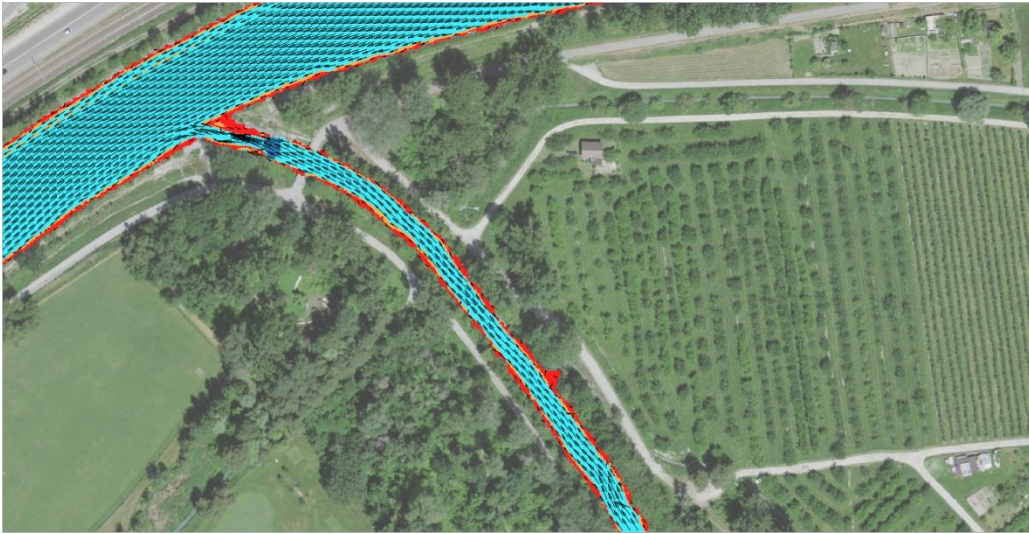
Li\_2v1:



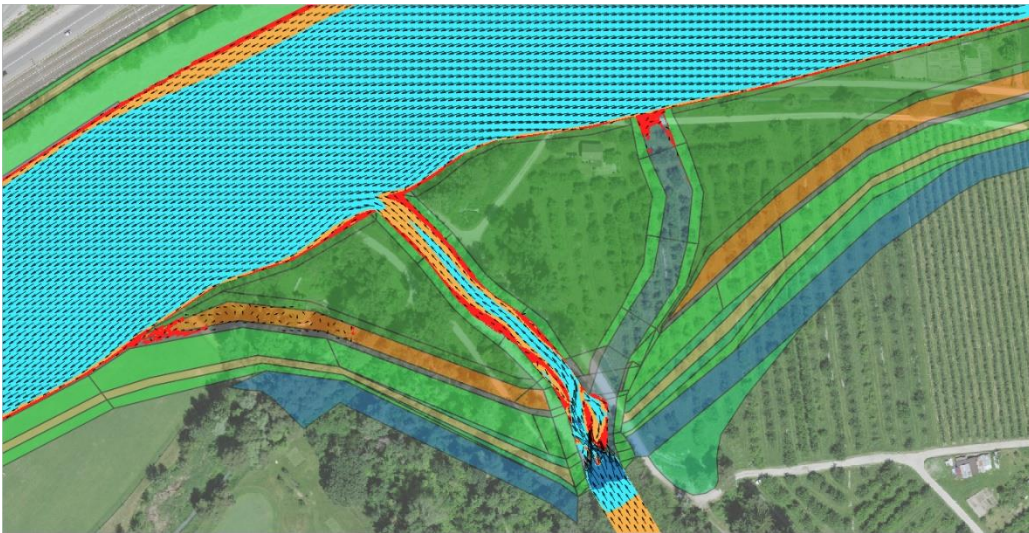


**Annexe 9** Vitesses d'écoulement stationnaire annuelle (rouge (0.01 à 5m/s), orange (0.5 à 1m/s), bleu clair (1 à 3m/s), bleu foncé (>3m/s)) pour la Borgne

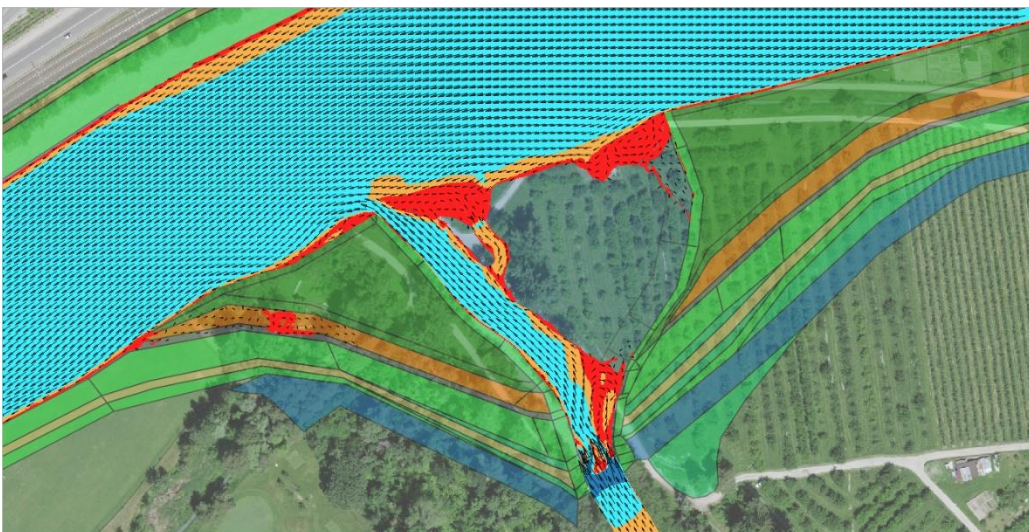
**Bo\_actu :**



**Bo\_BASE :**

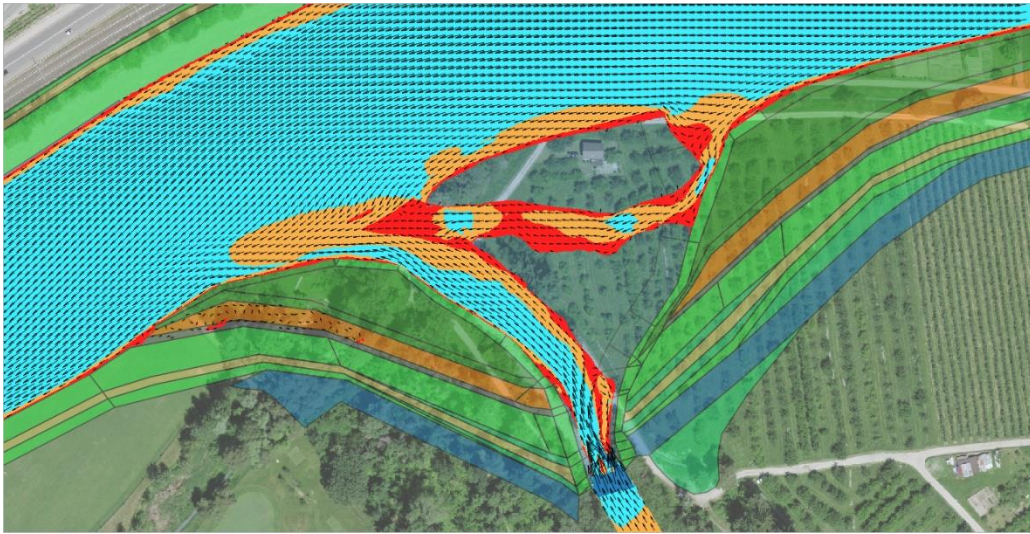


**Bo\_01v1 :**

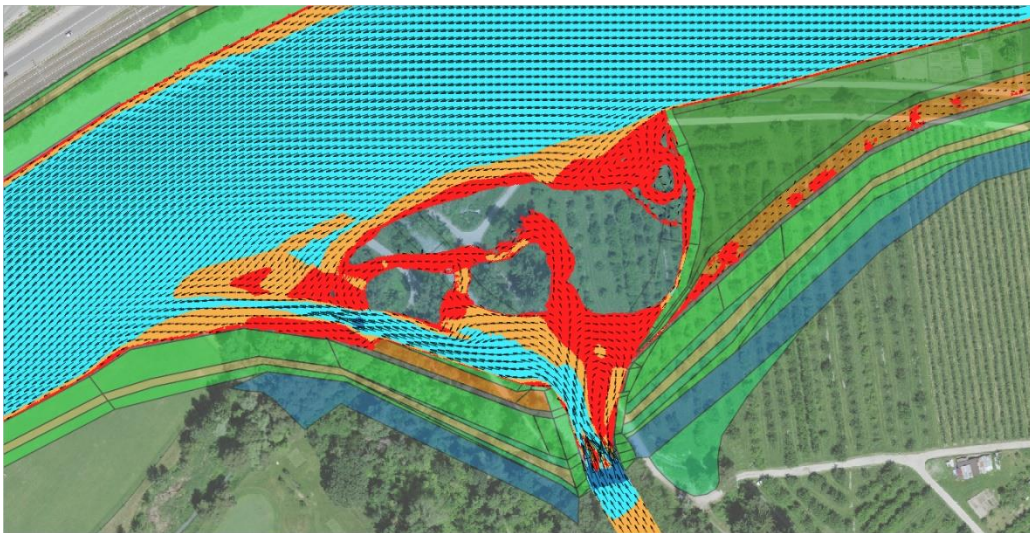




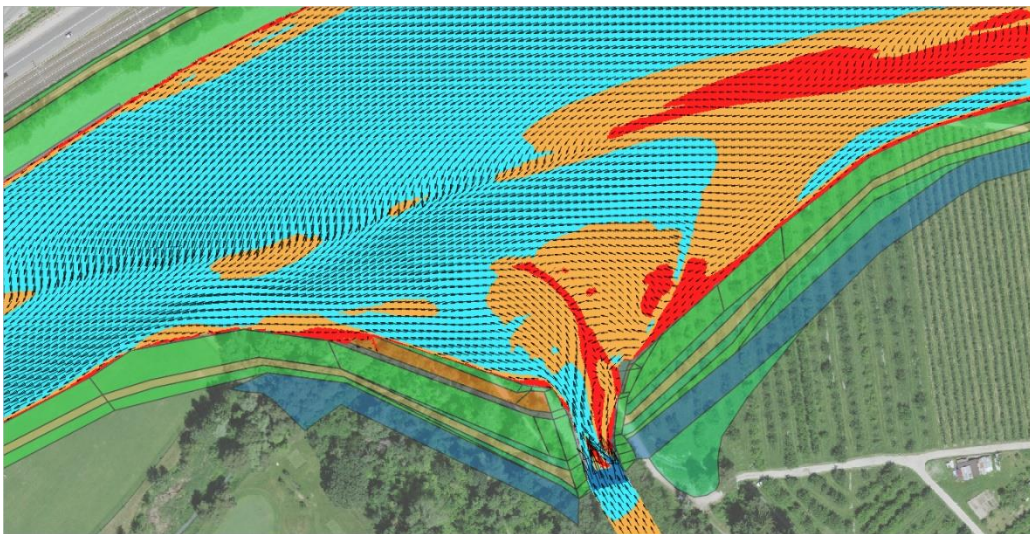
Bo\_01v2 :



Bo\_02v1 :

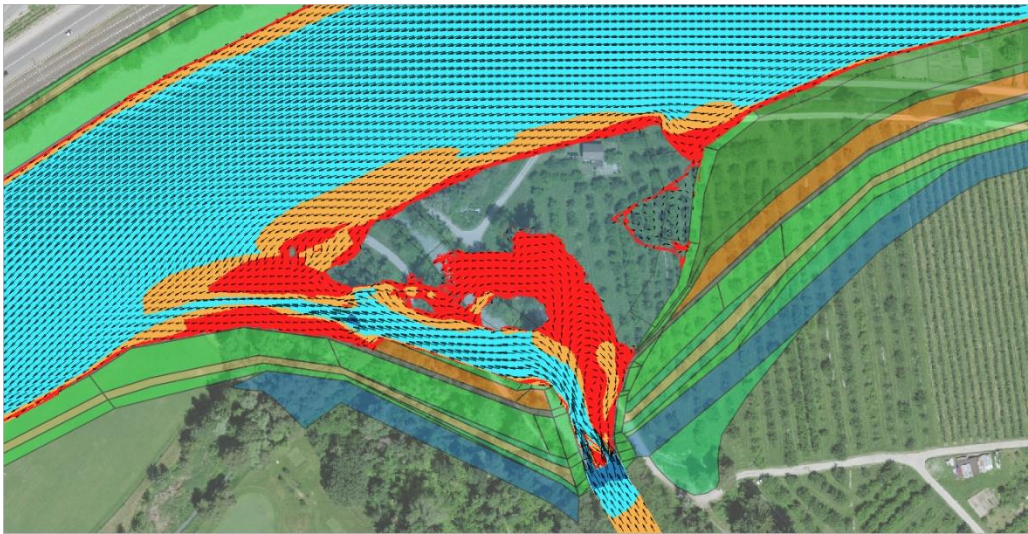


Bo\_02v2 :





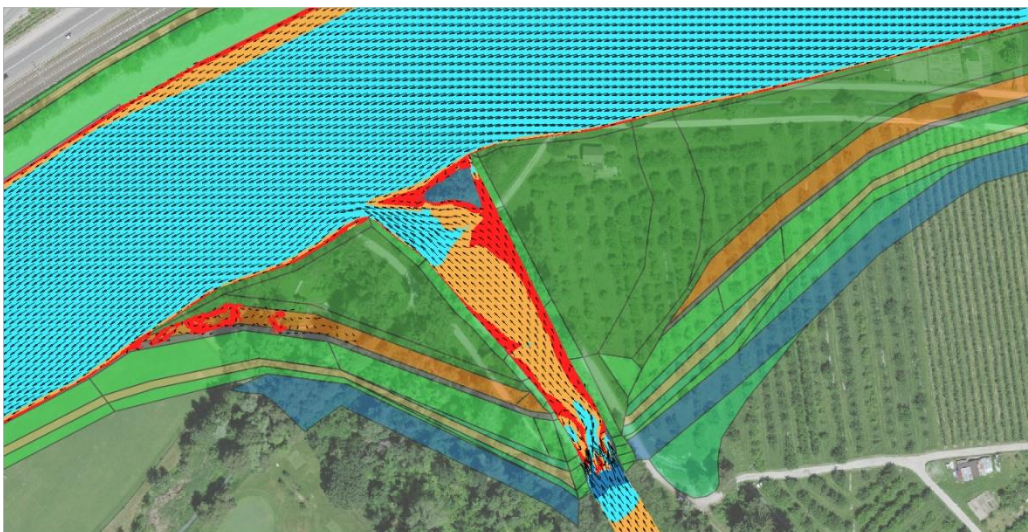
Bo\_02v3 :



Bo\_1 :

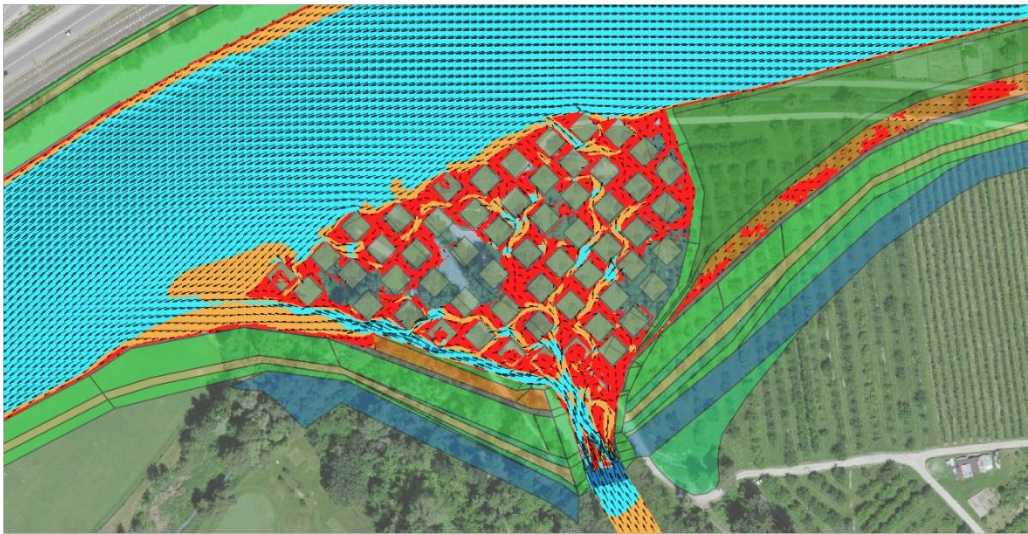


Bo\_1v1 :

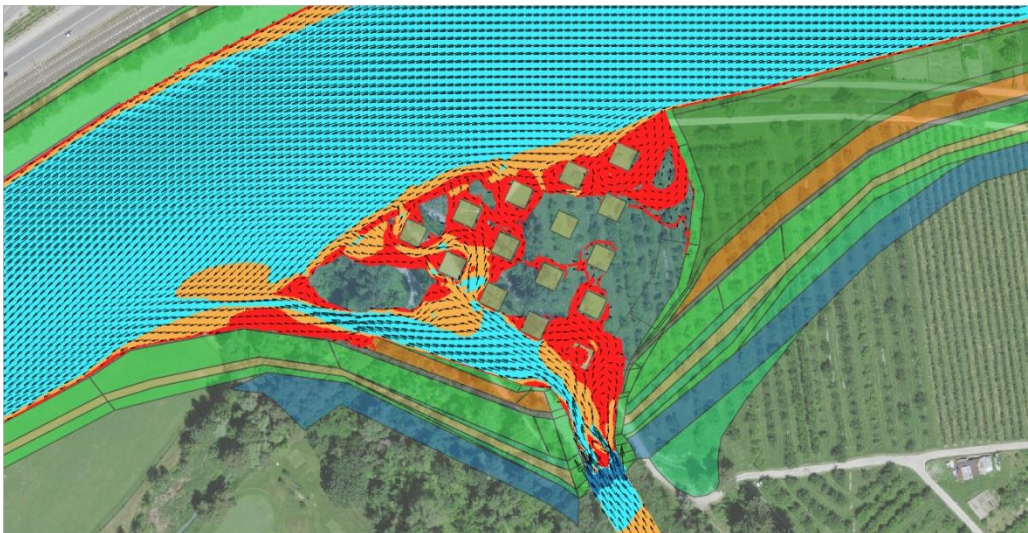




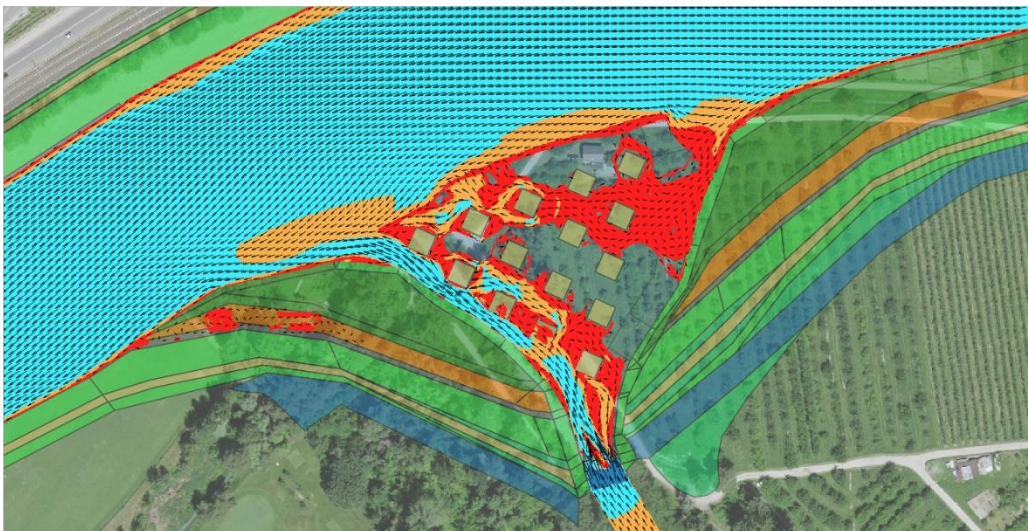
Bo\_2 :



Bo\_2v1 :

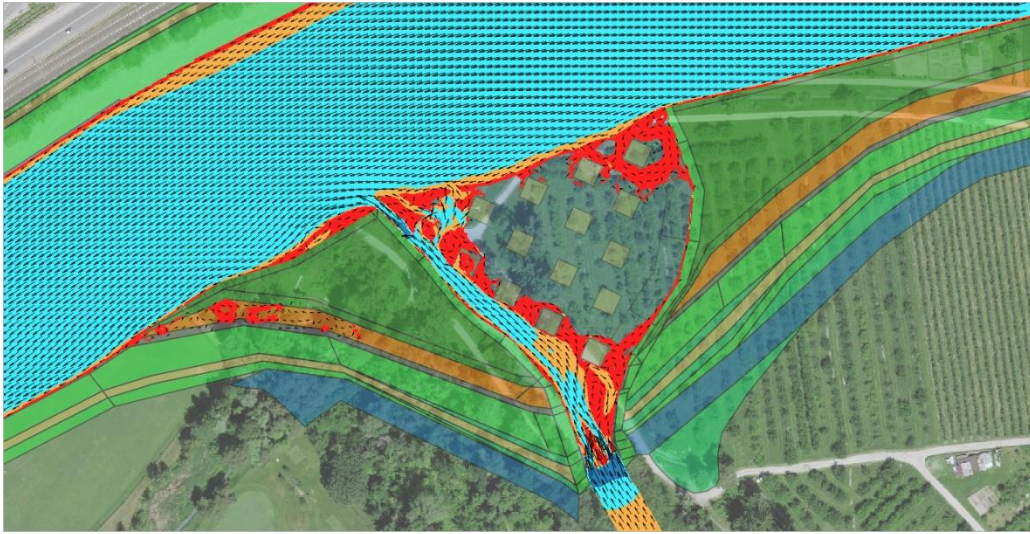


Bo\_2v2 :

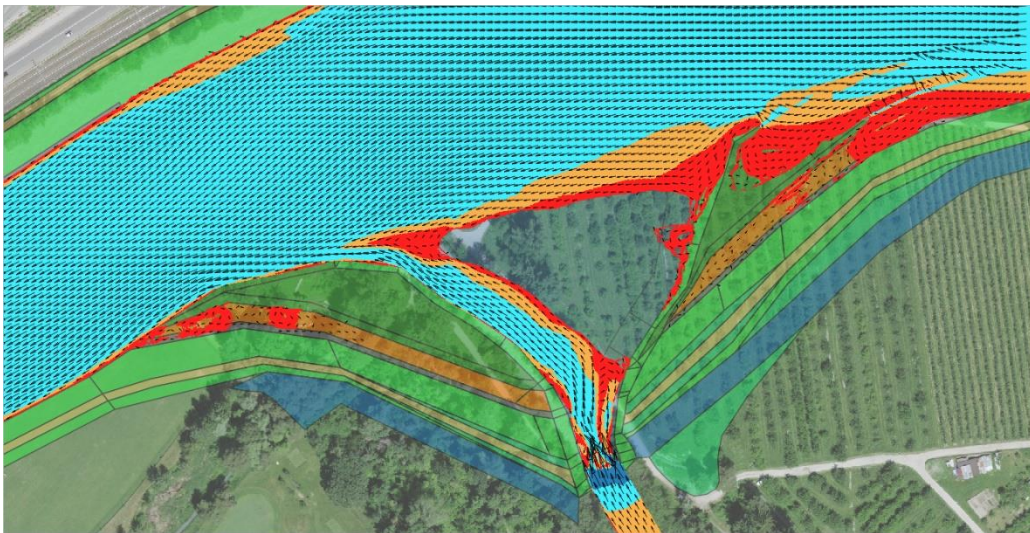




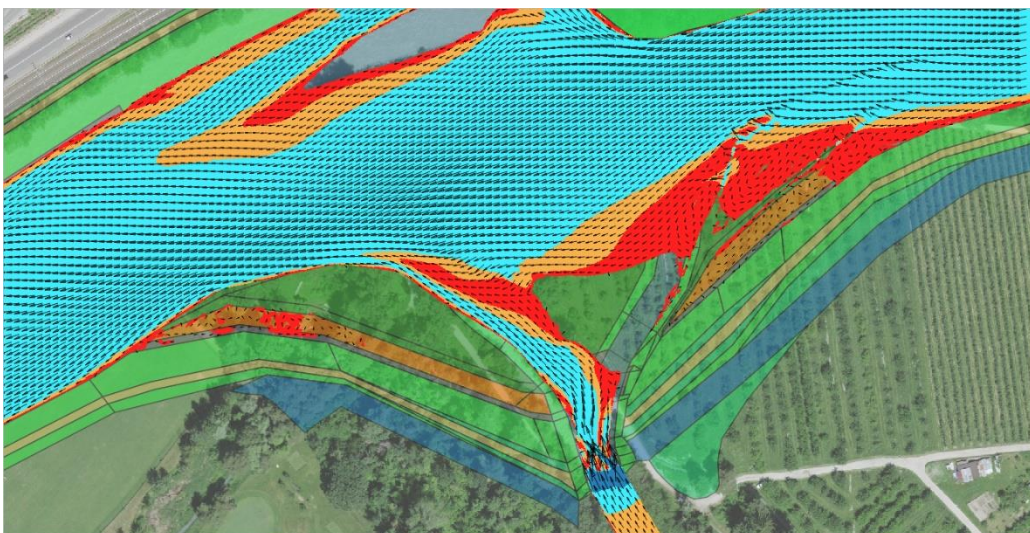
Bo\_2v3 :



Bo\_3 :



Bo\_3v1 :

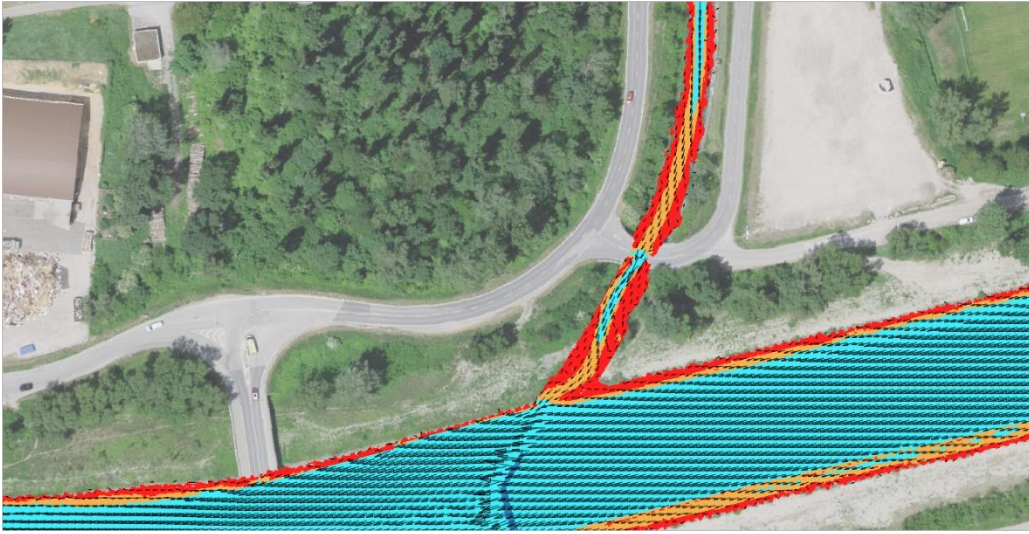




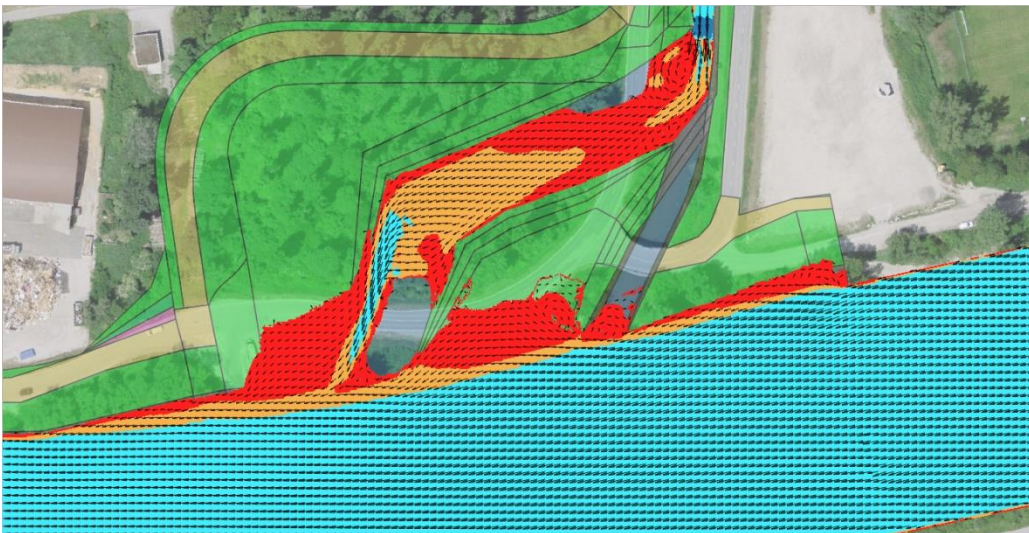
Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

**Annexe 10** Vitesses d'écoulement stationnaire annuelle (rouge (0.01 à 5m/s), orange (0.5 à 1m/s), bleu clair (1 à 3m/s), bleu foncé (>3m/s)) pour la Lienne

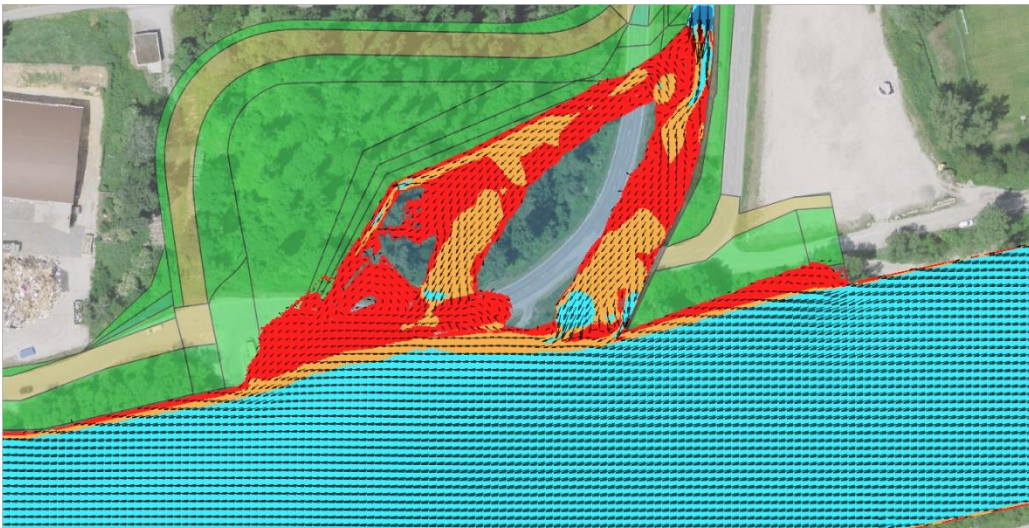
Li\_actu :



Li\_BASE :



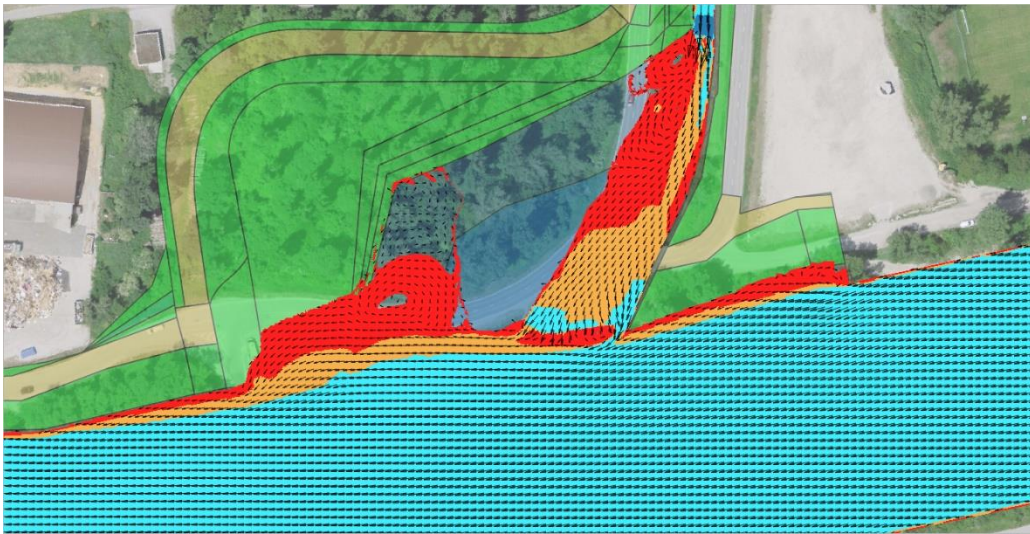
Li\_0 :



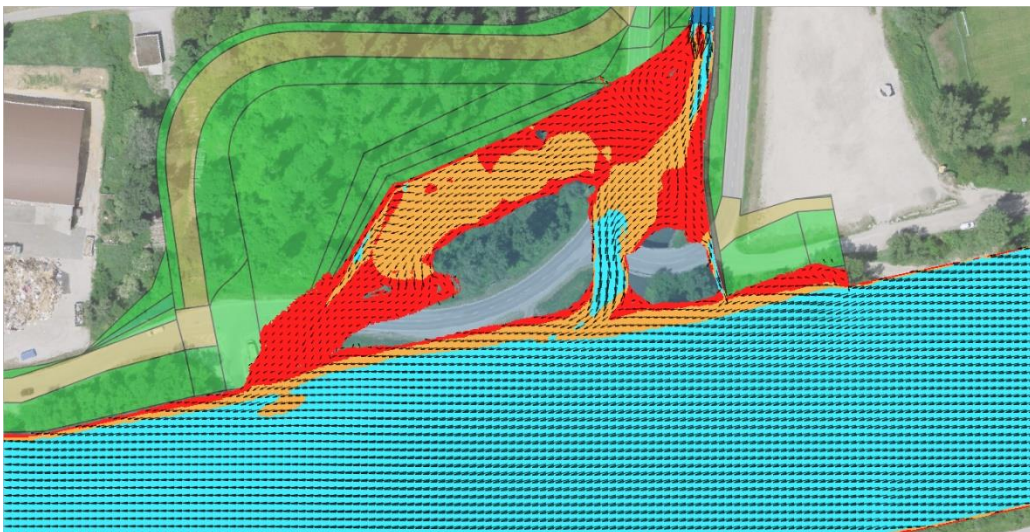


# Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

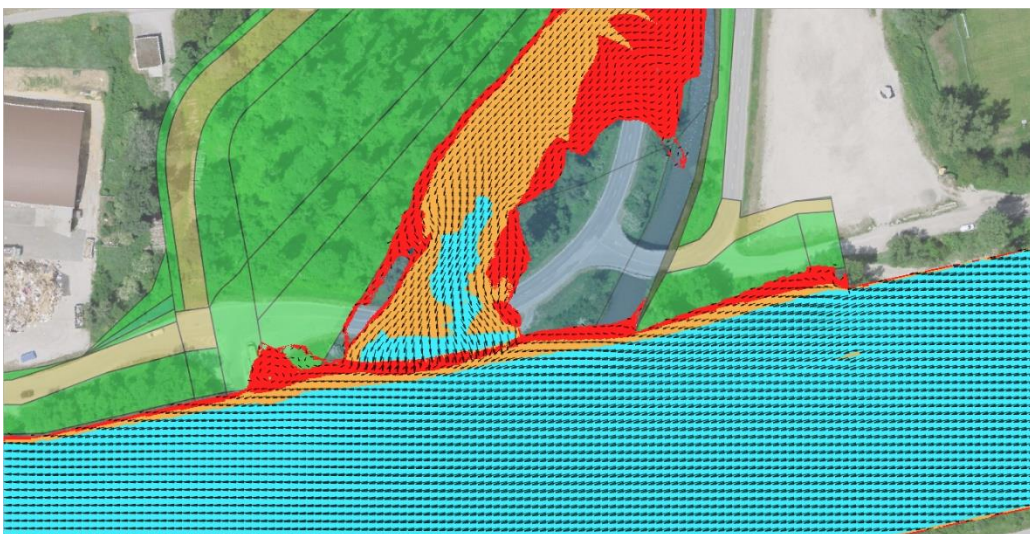
Li\_01 :



Li\_02 :



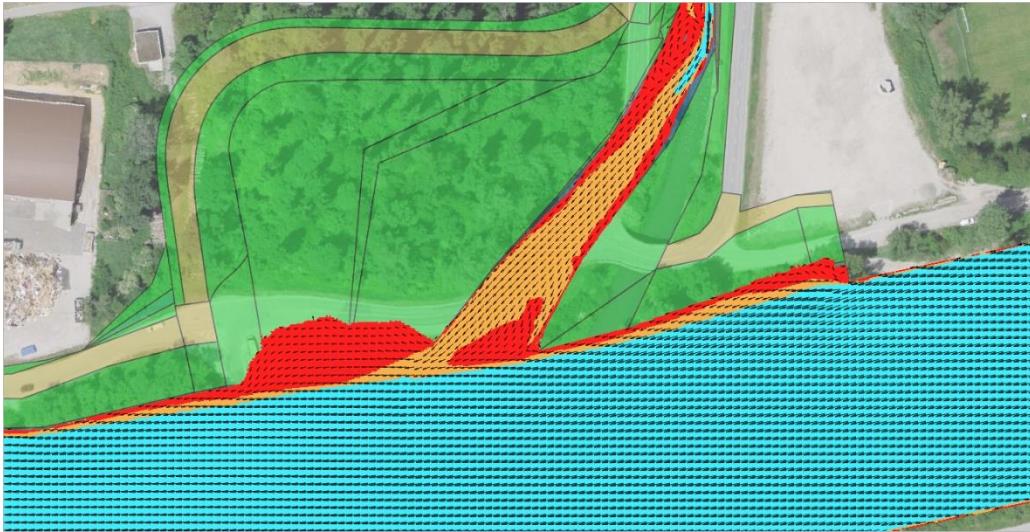
Li\_03 :



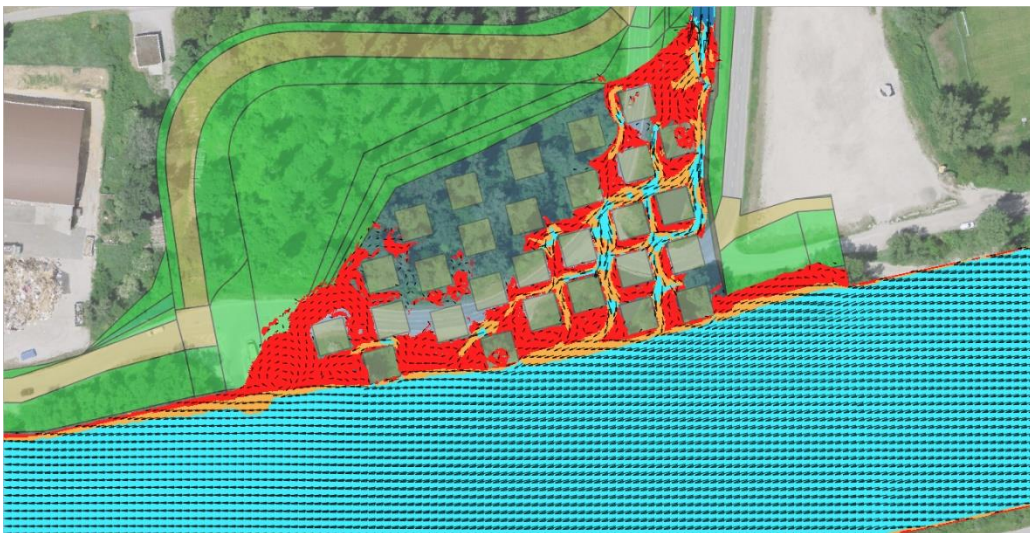


# Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Liéne

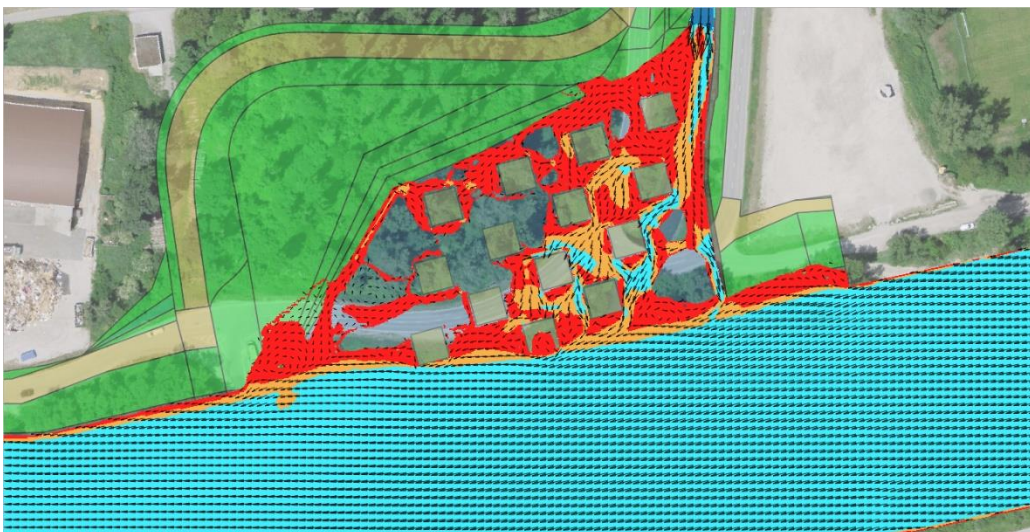
Li\_1 :



Li\_2 :



Li\_2v1 :



## Evaluation morphodynamique des confluences de la Borgne et de la Lienne

### Annexe 11 Tableau des valeurs calculées des indicateurs pour les variantes de la Borgne

Variantes	HMID (confluence)	Diversité des habitats			Dynamique		Connectivité	
		Structure du fond du lit	Profondeur d'eau	Vitesse d'écoulement	Dynamique de la structure du fond du lit	Modification du niveau du fond du lit	Dynamique d'inondation	Ligne de rive
Bo_actuel	4,48	3	35,4	66	1,00	0,0059	1,00	1,000
Bo_01v1	6,65	5	55,3	67,2	4,66	0,0287	4,84	0,784
Bo_01v2	9,09	5	80,3	68,3	5,73	0,0242	5,41	0,831
Bo_1	6,03	3	45,9	60,5	0,66	0,0287	3,53	0,820
Bo_1v1	5,54	4	46,6	81	1,35	0,0276	3,98	0,843
Bo_02v1	9,6	5	71,2	48,9	6,86	0,0251	6,51	0,914
Bo_02v2	7,31	3	81,7	89	5,85	0,0329	9,86	1,050
Bo_02v3	10,83	5	74,1	89,7	7,44	0,0254	6,05	0,761
Bo_2	8,54	5	54,1	75,9	5,50	0,0243	6,06	0,945
Bo_2v1	8,29	5	63,7	84,5	6,41	0,0264	6,42	0,882
Bo_2v2	10,01	5	71,5	72,2	5,37	0,0248	5,97	0,821
Bo_2v3	6,68	4	50,1	59,2	4,47	0,0273	4,73	0,878
Bo_3	6,83	4	64,1	56,1	5,77	0,0267	6,33	0,733
Bo_3v1	6,13	4	58,6	57,2	2,99	0,0287	7,61	0,786
Bo_BASE	4,36	3	32,9	56,3	1,10	0,0282	3,32	0,758

### Annexe 12 Tableau des valeurs calculées des indicateurs pour les variantes de la Lienne

Variantes	HMID (confluence)	Diversité des habitats			Dynamique		Connectivité	
		Structure du fond du lit	Profondeur d'eau	Vitesse d'écoulement	Dynamique de la structure du fond du lit	Modification du niveau du fond du lit	Dynamique d'inondation	Ligne de rive
Li_actuel	9,2	3	58,2	91,8	1,00	0,0080	1,00	1,00
Li_0	9,51	5	80,5	70,8	2,48	0,0209	4,75	0,93
Li_01	8,39	4	66,4	74	2,16	0,0210	4,40	0,87
Li_1	6,28	3	57,4	59,2	0,83	0,0207	3,50	0,90
Li_02	8,97	5	80,7	65,8	2,72	0,0202	4,94	0,97
Li_2	7,68	5	56,2	77,4	1,96	0,0196	3,91	0,93
Li_2v1	9,34	5	71,3	78,4	2,20	0,0223	4,51	0,96
Li_03	9,85	5	95	60,9	2,99	0,0096	5,11	0,89
Li_BASE	7,82	4	63,6	70,9	1,65	0,0165	4,27	0,81