

## Mémoire

**Auteur** : Jacquemain, Clémence

**Promoteur(s)** : Dewals, Benjamin; Houbrechts, Geoffrey

**Faculté** : Faculté des Sciences

**Diplôme** : Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

**Année académique** : 2023-2024

**URI/URL** : <http://hdl.handle.net/2268.2/20524>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



Faculté des sciences  
Département de géographie

# **Évaluation de l'impact des recharges sédimentaires sur la ligne d'eau au niveau de la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux**

Mémoire présenté par : **Clémence JACQUEMAIN**

pour l'obtention du titre de

**Master en Sciences géographiques, orientation Global Change à finalité  
approfondie géomorphologie et risques naturels**

Année académique :

**2023-2024**

Date de défense :

**Juin 2024**

Président de jury :

**Pr. Xavier FETTWEIS**

Promoteur :

**Pr. Benjamin DEWALS**

Jury de lecture :

**Pr. Geoffrey HOUBRECHTS**

**Pr. Pierre ARCHAMBEAU**

**Pr. Jean VAN CAMPENHOUT**



Faculté des sciences  
Département de géographie

# **Évaluation de l'impact des recharges sédimentaires sur la ligne d'eau au niveau de la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux**

Mémoire présenté par : **Clémence JACQUEMAIN**

pour l'obtention du titre de

**Master en Sciences géographiques, orientation Global Change à finalité  
approfondie géomorphologie et risques naturels**

Année académique :

**2023-2024**

Date de défense :

**Juin 2024**

Président de jury :

**Pr. Xavier FETTWEIS**

Promoteur :

**Pr. Benjamin DEWALS**

Jury de lecture :

**Pr. Geoffrey HOUBRECHTS**

**Pr. Pierre ARCHAMBEAU**

**Pr. Jean VAN CAMPENHOUT**



## Remerciements

Je tiens à remercier mon promoteur, le Professeur Benjamin Dewals, ainsi que mon co-promoteur, le Professeur Geoffrey Houbrechts, pour leur encadrement, leur implication et leurs conseils pertinents qui ont contribué à la bonne réalisation de ce travail.

Ce mémoire n'aurait pas vu le jour non plus sans l'aide de monsieur Damien Sansen. Je le remercie de m'avoir épaulée lors de l'apprentissage du logiciel Wolf. Merci pour son accompagnement constant, sa bienveillance, ses conseils avisés, sa disponibilité sans faille et sa capacité à transmettre ses connaissances de manière claire et concise.

Je tiens également à remercier le Professeur Pierre Archambeau qui a généreusement donné de son temps pour répondre à mes questions techniques concernant l'utilisation du logiciel Wolf.

Je souhaite également mettre en évidence la réactivité, la flexibilité et la disponibilité de monsieur Jean Van Campenhout, dont l'aide m'a été précieuse lors des journées de terrain.

Enfin, je remercie mes proches de m'avoir soutenue durant ce parcours universitaire.

Ce travail n'aurait pas pu être mené à bien, dans les délais impartis, sans l'aide et la présence de toutes ces personnes. Je leur suis profondément reconnaissante pour toute l'aide apportée qui a fait de ce mémoire une source d'enrichissement professionnel et personnel.

## Résumé

Les recharges de galets (*Gravel augmentation*) sont de plus en plus utilisées comme techniques de restauration des cours d'eau. Elles peuvent notamment être utilisées en réaction aux curages récurrents. Ceux – ci perturbent entre autres la dynamique sédimentaire, principalement le charriage et mettent à mal l'écosystème et la morphologie des cours d'eau. Les réinjections de galets peuvent se faire directement sur le terrain ou être testées en laboratoire à l'aide de simulations numériques.

Ce travail s'intéresse à l'évaluation de l'impact des recharges sédimentaires sur l'élévation de la ligne d'eau. Pour ce faire, à l'aide de simulations numériques réalisées sur base du système de modélisation intégrée WOLF développé au sein du groupe de recherche HECE de la faculté de sciences appliquées à l'université de Liège, différentes configurations de réinjections seront testées. L'intérêt est d'estimer la simulation occasionnant le moins d'impact sur l'allure de la ligne. Afin, de déterminer les répercussions des recharges sur l'écoulement, des situations avant et après réinjections seront comparées. Les variables étudiées seront l'altitude de la surface libre, la hauteur d'eau, la norme des vitesses de courants et le paramètres de Shields. Ce dernier est un indicateur de la mise en mouvement de la charge de fond. Dans le but de déterminer la configuration optimale de recharge sédimentaire, plusieurs paramètres propres à la réinjection seront testés individuellement pour déterminer leur impact sur l'élévation de la ligne. Ainsi, au travers de ce mémoire, l'influence de différents facteurs sur l'élévation de la ligne d'eau et la mise en mouvement des sédiments sera déterminée. Les facteurs testés seront le débit lors de la réinjection, le volume de la réinjection, le diamètre des galets présents dans la rivière, la localisation de la réinjection et la manière dont les galets sont réinjectés numériquement. Pour ce faire, différentes simulations numériques ont été réalisées à l'aide du modèle WOLF.

L'étude porte sur la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux. Cette zone se présente comme un choix pertinent puisqu'elle est sujette à des curages répétés au niveau du village d'Esneux et qu'elle est recensée comme une zone protégée selon différents statuts.

Les résultats de ces simulations révèlent que le modèle tend à sous-estimer le charriage et à surestimer le débit de mise en mouvement des sédiments par rapport à la littérature. Les écarts entre la littérature et les résultats issus des simulations ont conduit à la nécessité de réaliser une validation à l'aide de mesures de terrain. Cette validation a montré la présence d'un écart entre les observations de terrain et les résultats des simulations numériques. Cet écart est probablement lié au calage du Lidar à l'époque du levé d'altimétrie de 2002.

Les résultats des tests montrent que, la configuration de réinjection minimisant l'élévation de la ligne d'eau et favorisant la mise en mouvement de la charge de fond, présenterait un volume équivalent au charriage annuel, se situerait au sein du méandre de la boucle, avec des galets possédant un axe b d'environ 42 mm, un débit de [300 m<sup>3</sup>/s], et une réinjection numérique à hauteur constante. C'est-à-dire une élévation identique de la topographie sur chaque pixel. Cette configuration induirait une élévation de la ligne d'eau de 0.05 m à 0.1 m en amont de la zone de réinjection, une légère baisse de l'altitude d'environ 0.05 m dans la portion la plus aval de la réinjection. La majeure partie du domaine présenterait une variation d'altitude proche de zéro.

En conclusion, ce mémoire met en avant l'importance de combiner la modélisation numérique développée à l'aide du modèle WOLF 2D avec des validations sur le terrain pour développer des stratégies de restauration des cours d'eau efficaces, sur base de réinjections de galets au niveau de la boucle de l'Ourthe à Esneux. Ce mémoire tente également de valider les résultats proposés à l'aide de comparaisons avec la littérature.

## Abstract

Gravel augmentation techniques are increasingly used for river restoration. They can be employed in response to dredging, which disrupts sediment dynamics, hinders sediment transport, and harms the ecosystem and morphology of watercourses. Gravel injections can be implemented directly in the field or tested in laboratory using numerical simulations.

This study focuses on evaluating the impact of sediment recharges on water level elevation. By using numerical simulations based on the integrated modelling system WOLF developed at the Faculty of Applied Sciences at the University of Liège, various injection configurations will be tested to estimate those causing the least impact on the water level. To determine the repercussions of recharges on flow, we will compare situations before and after injections. Variables studied include free surface elevation, water depth, current velocities, and Shields parameters, which indicate sediment mobilization. To determine the optimal sediment recharge configuration, several injection parameters will be individually tested to assess their impact on water level elevation. Thus, through this study, we aim to determine the influence of injection flow rate, volume of injected gravel, diameter of gravel present in the river, injection location, and method of gravel injection on water level elevation and sediment mobilization. Various numerical simulations have been conducted using the WOLF model.

The study will focus on the Ourthe loop downstream of Esneux, a relevant choice due to its recurrent dredging and protected status under various designations.

The results of these simulations reveal that the model tends to underestimate sediment transport and overestimate sediment entrainment rates compared to the literature. Discrepancies between the literature and the simulation results have led to the need for validation using field measurements. This validation has shown a discrepancy between field observations and those from numerical simulations due to an issue with Lidar calibration at the time of the elevation survey.

However, the results show that the injection configuration minimizing water level elevation and favouring sediment transport would involve a volume equivalent to annual sediment transport, located within the meander, with gravel having a b-axis of approximately 42 mm, a flow rate of [300 m<sup>3</sup>/s], and constant-level digital injection. This configuration would result in a water level elevation of 0.05 m to 0.1 m upstream of the two injections, with a slight decrease in altitude of approximately 0.05 m in the most downstream portion of the injection. Most of the area would exhibit minimal altitude variations, approaching zero.

In conclusion, this thesis highlights the importance of combining numerical modeling developed using the WOLF 2D model with field validations to develop effective river restoration strategies, based on the reintroduction of pebbles at the Ourthe loop in Esneux. This thesis also attempts to validate the proposed results through comparison with the literature.

## Table des matières

1.	Introduction .....	13
1.1.	Contexte .....	13
1.2.	Objectif du travail .....	16
1.3.	Plan du mémoire .....	17
2.	Zone d'étude.....	19
2.1.	Matériel du fond du lit & Charge de fond.....	20
2.2.	Débits .....	22
2.3.	Statuts de protection.....	24
2.4.	Atterrissements & curages .....	26
2.5.	Canal de l'Ourthe & Barrage .....	27
3.	Introduction du paramètre de Shields.....	29
4.	Méthodologie.....	33
4.1.	Données utilisées .....	33
4.2.	Modèle .....	33
4.3.	Conditions avant réinjection .....	34
4.3.1.	Conditions limites.....	34
4.3.2.	Secteur avant réinjection.....	37
4.3.3.	Allure théorique de la ligne d'eau .....	46
4.4.	Réinjection de galets .....	47
4.4.1.	Diamètre des galets injectés.....	47
4.4.2.	Débit lors de la réinjection.....	48
4.4.3.	Volume de la réinjection.....	48
4.4.4.	Localisation de la réinjection.....	48
4.4.5.	Style de la réinjection .....	49
5.	Résultats .....	50
5.1.	Diamètre des galets injectés .....	50
5.2.	Débit lors de la réinjection.....	53
5.2.1.	150 m <sup>3</sup> /s .....	53
5.2.2.	300 m <sup>3</sup> /s .....	56
5.2.3.	726 m <sup>3</sup> /s .....	58
5.3.	Volume de la réinjection .....	60
5.3.1.	Débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	60
5.3.2.	Débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	64
5.4.	Localisation de la réinjection .....	66
5.4.1.	Axe rectiligne vs Méandre, débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	66

5.4.2.	Axe rectiligne vs Méandre, débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	69
5.4.3.	Valeur initiale du paramètre de Shields, débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	72
5.4.4.	Valeur initiale du paramètre de Shields, débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	75
5.5.	Style de la réinjection.....	77
5.5.1.	Débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	78
6.	Discussion & Validation.....	81
6.1.	Synthèse des marquages sur l'Ourthe.....	81
6.2.	Validation terrain des résultats.....	82
6.2.1.	Analyse de sensibilité.....	86
6.3.	Choix de la simulation optimale.....	88
6.4.	Discussion & Amélioration.....	91
7.	Conclusion.....	93
	Bibliographie.....	94
	Annexes.....	98

## Table des Figures

Figure 1. Présentation du site de la boucle de l'Ourthe à Esneux.....	19
Figure 2. Seuil de l'Ourthe en aval d'Esneux. Source : photo personnelle .....	20
Figure 3. Granulométrie wolman de l'Ourthe en aval d'Esneux.....	21
Figure 4. Exemple de galets prélevés au sein de l'Ourthe en aval d'Esneux. Source : photo personnelle. .....	21
Figure 5. Localisation des stations hydrologiques de mesures.....	23
Figure 6. Zone Natura 2000 au niveau de la boucle de l'Ourthe à Esneux.....	25
Figure 7. Légende des zones Natura 2000 (SPW, 2017).....	25
Figure 8. Exemple d'atterrissement et d'encoche d'érosion au niveau du pont d'Esneux en octobre 2021 (Eme <i>et al.</i> , 2022).....	27
Figure 9. Localisation des déversoir présents sur la Boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux. ....	28
Figure 10. Balance de Lane (Lane, 1955). ....	30
Figure 11. Simplification en section rectangulaire et en écoulement uniforme (Piroton, 2023, communication personnelle [cours écoulement à surface libre]). ....	31
Figure 12. Courbe de Shields (Miedema, 2010).....	32
Figure 13. Différence de hauteurs d'eau pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s pour un nombre de Froude égal à 0.3 et à 0.4. ....	35
Figure 14. Différence de normes de vitesse pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s pour un nombre de Froude égal à 0.3 et à 0.4. ....	36
Figure 15. Différence de hauteurs d'eau pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s pour un nombre de Froude égal à 0.5 et à 0.4. ....	37
Figure 16. Différence de normes de vitesse pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s pour un nombre de Froude égal à 0.5 et à 0.4. ....	37
Figure 17. Comparaison des hauteurs d'eau [m] pour les 4 débits simulés (5, 150, 300 & 726 m <sup>3</sup> /s). .	38
Figure 18. Histogramme des fréquences des hauteurs observées pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	39
Figure 19. Comparaison des normes de vitesse [m/s] pour les 4 débits simulés (5, 150, 300 & 726 m <sup>3</sup> /s). .....	40
Figure 20. Nombre de Froude observé pour les 4 débits simulés (5, 150, 300 & 726 m <sup>3</sup> /s).....	42
Figure 21. Comparaison des valeurs du paramètre de Shields pour les 4 débits simulés (5, 150, 300 & 726 m <sup>3</sup> /s).....	44
Figure 22. Fréquence d'apparition des valeurs du paramètre de Shields pour une simulation possédant un débit de 300 m <sup>3</sup> /s et un diamètre critique du matériel de fond égal au D <sub>16</sub> (42 mm). ....	45
Figure 23. Fréquence d'apparition des valeurs du paramètre de Shields pour une simulation possédant un débit de 726 m <sup>3</sup> /s et un diamètre critique du matériel de fond égal au D <sub>16</sub> (42 mm). ....	45
Figure 24. Forme de la surface libre d'écoulement d'eau au-dessus d'un obstacle (Ancey, s.d.).....	46
Figure 25. Localisation des réinjections par défaut.....	47
Figure 26. Localisation possible de réinjection .....	49
Figure 27. Configuration d'élévation de la topographie visualisation du profil en long (à gauche) et du profil en travers (à droite).....	50
Figure 28. Comparaison des valeurs du paramètre de Shields en fonction du diamètre critique pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s. ....	52
Figure 29. Comparaison des altitudes de surface libre avant/après réinjection pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s. .....	54
Figure 30. Comparaison de la norme des valeurs du paramètre de Shields avant/après réinjection pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s. ....	55
Figure 31. Différences d'altitudes de surface libre avant/après réinjection pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s	57

Figure 32. Comparaison de la norme des valeurs du paramètre de Shields avant/après réinjection pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s. ....	58
Figure 33. Différences d'altitudes de surface libre avant/après réinjection pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s	59
Figure 34. Comparaison de la norme des valeurs du paramètre de Shields avant/après réinjection pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s. ....	60
Figure 35. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m <sup>3</sup> (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	62
Figure 36. Comparaison des variations du paramètre de Shields pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m <sup>3</sup> (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	63
Figure 37. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m <sup>3</sup> (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	65
Figure 38. Comparaison des variations du paramètre de Shields pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m <sup>3</sup> (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	66
Figure 39. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	68
Figure 40. Comparaison du paramètre de Shields après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	69
Figure 41. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	70
Figure 42. Comparaison du paramètre de Shields après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	71
Figure 43. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	73
Figure 44. Comparaison des valeurs du paramètre de Shields après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale génère du mouvement (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	74
Figure 45. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	76
Figure 46. Comparaison des valeurs du paramètre de Shields après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale génère du mouvement (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	77
Figure 47. Différences d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour une élévation constante de 0.25 m de la topographie (A) et pour une altitude constante (B) pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> et un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	79
Figure 48. Comparaison du paramètre de Shields après réinjection pour une élévation constante de 0.25 m de la topographie (A) et pour une altitude constante (B) pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> et un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	80
Figure 49. Comparaison de l'altitude de surface libre entre les données terrain et numérique pour un débit de 42.8 m <sup>3</sup> /s pour les 10 premières coordonnées.....	83
Figure 50. Comparaison des données topographiques issues de données de terrain et de données numériques. ....	84
Figure 51. Points Fixes pour comparer l'altitude de surface libre. Source : Photos personnelles. ....	84

Figure 52. Comparaison des conditions limites imposées comparées aux données de terrain corrigée de 30 cm.....	85
Figure 53. Valeurs du paramètre de Shields pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s et un nombre de Froude de 0.4 imposé condition limite aval. ....	86
Figure 54. Valeurs du paramètre de Shields pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s et un nombre de Froude de 0.3 imposé condition limite aval. La couleur noire représente les valeurs dépassant l'échelle de mesure. ....	87
Figure 55. Valeurs du paramètre de Shields pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s, un diamètre des galets de 42 mm, un nombre de Froude de 0.4 imposé condition limite aval et un coefficient de frottement augmenté de 30 %.....	88
Figure 56. Différences d'altitudes de surfaces libres avant/ après réinjection pour une simulation optimale de réinjection. ....	90
Figure 57. Paramètre de Shields après réinjection pour une simulation optimales de réinjection. ....	91

## Table des Tableaux

Tableau 1. Granulométrie effectuée sur la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux (Eme <i>et al.</i> , 2022) ....	21
Tableau 2. Valeurs caractéristiques de l'Ourthe à la station de Sauheid (Houbrechts <i>et al.</i> , 2006). ....	23

## Table des Annexes

Annexe 1. Configurations géométriques de la réinjection. A. Volumes parallèles ; Volumes décalés de la moitié de la longueur de réapprovisionnement ; C. Volumes d'une longueur de réapprovisionnement décalés vers l'aval ; D. Volumes uniques et volumes parallèles placés sur les deux rives ; E. Volumes 3/4 de la longueur de réapprovisionnement décalé vers l'aval ; Volumes 1/4 de la longueur de réapprovisionnement décalé vers l'aval (Battissacco <i>et al.</i> , 2016).....	98
Annexe 2. Caractéristiques des galets prélevés sur l'Ourthe au niveau du seuil à Esneux (voir Figure 2) .....	98
Annexe 3. Hauteur d'eau [m] pour un débit de 5 m <sup>3</sup> /s .....	101
Annexe 4. Hauteur d'eau [m] pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s .....	101
Annexe 5. Hauteur d'eau [m] pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s .....	102
Annexe 6. Hauteur d'eau [m] pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s .....	102
Annexe 7. Fréquence d'apparition des hauteurs d'eau pour un débit de 5 m <sup>3</sup> /s. ....	103
Annexe 8. Fréquence d'apparition des hauteurs d'eau pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s. ....	103
Annexe 9. Fréquence d'apparition des hauteurs d'eau pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s. ....	104
Annexe 10. Norme des vitesses [m/s] pour le débit 5 m <sup>3</sup> /s en m/s.....	104
Annexe 11. Norme des vitesses [m/s] pour le débit 150 m <sup>3</sup> /s. ....	105
Annexe 12. Norme des vitesses [m/s] pour le débit 300 m <sup>3</sup> /s. ....	105
Annexe 13. Norme des vitesses [m/s] pour le débit 726 m <sup>3</sup> /s .....	106
Annexe 14. Nombre de Froude pour le débit 5 m <sup>3</sup> /s. ....	106
Annexe 15. Nombre de Froude pour le débit 150 m <sup>3</sup> /s. ....	107
Annexe 16. Nombre de Froude pour le débit 300 m <sup>3</sup> /s. ....	107
Annexe 17. Nombre de Froude pour le débit 726 m <sup>3</sup> /s. ....	108
Annexe 18. Paramètre de Shields pour un diamètre critique de 42 mm pour un débit de 5 m <sup>3</sup> /s.....	108
Annexe 19. Paramètre de Shields pour un diamètre critique de 42 mm pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s....	109
Annexe 20. Paramètre de Shields pour un diamètre critique de 42 mm pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s....	109
Annexe 21. Paramètre de Shields pour un diamètre critique de 42 mm pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s....	110
Annexe 22. Fréquence d'apparition des valeurs du paramètre de Shields pour une simulation possédant un débit de 150 m <sup>3</sup> /s et un diamètre critique du matériel de fond égal au D16 (42 mm). ....	110
Annexe 23. Fréquence d'apparition des valeurs du paramètre de Shields pour une simulation possédant un débit de 5 m <sup>3</sup> /s et un diamètre critique du matériel de matériel égal au D16 (42 mm). ....	111
Annexe 24. Comparaison des valeurs du paramètres de Shields en fonction du diamètre critique pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s. ....	112
Annexe 25. Comparaison des hauteurs d'eau avant/après réinjection pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s. ....	113
Annexe 26. Comparaison de la norme des vitesses avant/après réinjection pour un débit de 150 m <sup>3</sup> /s. ....	114
Annexe 27. Différences de hauteur d'eau avant/après réinjection pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	115
Annexe 28. Différences de normes des vitesses avant/après réinjection pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s...	116
Annexe 29. Différences de hauteur d'eau avant/après réinjection pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	117
Annexe 30. Différences de normes des vitesses avant/après réinjection pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s...	118
Annexe 31. Comparaison des variations de hauteur avant / après réinjection pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m <sup>3</sup> (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s .....	119
Annexe 32. Comparaison des variations de vitesse avant / après réinjection pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m <sup>3</sup> (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s .....	120
Annexe 33. Comparaison des variations de hauteur d'eau avant / après réinjection pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m <sup>3</sup> (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	121

Annexe 34. Comparaison des variations de vitesse avant / après réinjection pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m <sup>3</sup> (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	122
Annexe 35. Comparaison des variations des hauteurs d'eau avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	123
Annexe 36. Comparaison des variations de la norme des vitesses avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	124
Annexe 37. Comparaison des variations des hauteurs d'eau avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	125
Annexe 38. Comparaison des variations de la norme des vitesses avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	126
Annexe 39. Comparaison des variations de hauteurs avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation ou la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s .....	127
Annexe 40. Comparaison des variations des normes de vitesse avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	128
Annexe 41. Comparaison des variations de hauteurs d'eau avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initial d'une classe supérieure (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	129
Annexe 42. Comparaison des variations de normes de vitesse avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de 726 m <sup>3</sup> /s.....	130
Annexe 43. Différences de hauteurs d'eau avant / après réinjection pour une élévation constante de 0.25 m de la topographie (à gauche) et pour une altitude constante (à droite) pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> et un débit de 300 m <sup>3</sup> /s. ....	131
Annexe 44. Différences des normes de vitesse avant / après réinjection pour une élévation constante de 0.25 m de la topographie (à gauche) et pour une altitude constante (à droite) pour un volume de 2500 m <sup>3</sup> et un débit de 300 m <sup>3</sup> /s.....	132
Annexe 45. GPS - RTK.....	133
Annexe 46. Localisation des mesures de terrain d'altitude de surface libre. ....	133
Annexe 47. Fiche altimétrique SIJ9.1 (IGN, 2024).....	134
Annexe 48. Altitude de surface libre [m] pour un débit de 42.8 m <sup>3</sup> /s. ....	134
Annexe 49. Comparaison des altitudes de surface libre entre les données de terrain et numérique. ..	135
Annexe 50. Zones sélectionnées pour la réalisation des profils en travers (Brault, 2023).....	135

# 1. Introduction

## 1.1. Contexte

Au cours de l'Anthropocène, les rivières ont été fortement impactées et modifiées par l'homme afin d'exploiter leurs propriétés (Brousse *et al.*, 2020). Leurs lits ont été contraints pour permettre la navigation. Ces rivières ont été parsemées de barrages pour stocker de l'eau et augmenter la hauteur d'eau dans les chenaux (Chardon *et al.*, 2018). Elles ont également subi des extractions massives de galets (Brousse *et al.*, 2020), soit dans le but direct d'utiliser ces matériaux en tant que ressource, soit pour favoriser l'écoulement et limiter les débordements. Ce mémoire se concentrera principalement sur ce dernier type d'extraction, connue sous le nom de curages.

Les conséquences de ces extractions sur la dynamique des cours d'eau sont multiples. Bien qu'elles puissent améliorer l'écoulement de l'eau, les extractions de galets et la construction de barrages perturbent souvent le fonctionnement naturel des rivières (Chardon *et al.*, 2021). En effet, les barrages ont tendance à entraver le transport des sédiments, ce qui impacte négativement le processus de charriage (Habersack *et al.*, 2015), tandis que les curages peuvent altérer l'écosystème et la morphologie des cours d'eau.

Le charriage correspond à la dynamique sédimentaire des galets au sein des rivières c'est-à-dire l'aptitude de la charge de fond à se déplacer. Cette aptitude à se mouvoir s'interprète par des critères d'entraînement établis sur base de variables comme les débits unitaires, la puissance spécifique et les tensions de cisaillement. Ces différentes variables influencent le volume de galets charriés (Houbrechts *et al.*, 2006). Dans les rivières à lit caillouteux du massif ardennais, le charriage nécessite des débits relativement importants et, de ce fait, il ne se réalise que de façon épisodique. Généralement, la fréquence de charriage est estimée pour des débits équivalents à 0.6 fois celle du débit à plein bord. Cette valeur de débit entraînant la mobilisation a longtemps été surestimée à celle du plein bord (Houbrechts *et al.*, 2006). Cependant, l'évaluation des quantités charriées reste un défi majeur, limitant ainsi les recherches dans ce domaine. Les valeurs de pente, de débit, de rugosité et de granulométrie et de forme des sédiments peuvent influencer considérablement ces estimations. Dans le massif ardennais, le transport solide sur les rivières varie généralement entre 0,4 et 2,2 tonnes par kilomètre carré par an (Houbrechts *et al.*, 2006).

Le déficit de sédiments, notamment causé par les extractions, peut entraîner plusieurs conséquences dommageables pour les cours d'eau. Parmi celles-ci, une incision du lit du cours d'eau (Brousse *et al.*, 2020), une réduction de la mobilité latérale, un pavage des cours d'eau (Rollet *et al.*, 2014) et une perte d'habitats aquatiques (Habersack *et al.*, 2015) sont observées. Cette diminution des habitats aquatiques se traduit généralement par un manque de zones de frai pour les poissons et est directement liée à la réduction de la mobilité latérale (Rollet *et al.*, 2014).

Ces altérations hydromorphologiques ont été identifiées comme un problème majeur pour la gestion des cours d'eau, notamment, selon la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) (Habersack *et al.*, 2015). Ainsi, l'ensemble de ces modifications a entraîné la mise en place de techniques de restauration (Arnaud *et al.*, 2017). La méthode de restauration pertinente dans le cadre de ce mémoire est la réinjection de galets appelée « *Gravel augmentation* » (Arnaud *et al.*, 2017). Cette technique a été réalisée en aval de plusieurs barrages présents sur de grandes rivières européennes comme le Danube (Habersack *et al.*, 2015), l'Ain (Rollet *et al.*, 2014), la Buëch (Brousse *et al.*, 2020), le Rhône (Vázquez-Tarrío *et al.*, 2020), la Sarine (Stähly *et al.*, 2020) et le Rhin (Chardon *et al.*, 2021) & (Arnaud *et al.*, 2017). Les premières injections de gravier documentées ont été réalisées dans les années 1960, sur des rivières de l'ouest des États-Unis pour la réhabilitation des habitats piscicoles (Arnaud *et al.*, 2017). En Europe, les

premières réinjections ont été réalisées en 1978 sur le Rhin en aval du barrage d'Iffezheim pour contrecarrer l'incision du lit et maintenir un niveau d'eau stable pour la navigation (Chardon *et al.*, 2021). La réinjection de galets devient une pratique courante car elle permet une amélioration géomorphologique rapide en diversifiant les formes de lit, la taille des grains et les conditions d'écoulement (Chardon *et al.*, 2021).

Il existe plusieurs manières de pratiquer la réinjection de galets au sein d'une rivière. D'une part, l'approche passive qui consiste à simplement laisser la rivière agir en érodant ses bancs latéraux et ainsi en laissant réinjecter elle – même les galets. D'autre part, l'approche active qui consiste à injecter directement les galets (Chardon *et al.*, 2021). Cette seconde approche est la plus adéquate dans le cadre de ce travail puisqu'il est possible de modifier les paramètres de réinjection. Il existe cependant une troisième approche appelée « *Gravel placement* », celle – ci diffère des deux précédentes dans la manière dont les galets sont positionnés sur le fond du lit. En effet, les deux premières approches sont réalisées sur une base empirique et peu de considération est accordée aux processus fluviaux (Peeters *et al.*, 2021). Ce qui réduit fortement la longévité des frayères. Tandis que le *Gravel placement* cherche à optimiser la position pour recréer au mieux des habitats aquatiques (Peeters *et al.*, 2021). Certaines recherches visaient à évaluer la qualité du substrat de frai en mesurant le colmatage de sédiments fins dans le gravier du substrat de frai (Peeters *et al.*, 2021). Les sédiments fins (< 50 mm) sont indispensables car correspondent à la taille des galets de frayères. Le *Gravel placement* a ainsi pu être testé sur les rivières wallonnes, l'eau Blanche, le Bocq et le Leignon par Peeters *et al.* (2021).

Dans le cadre de ce travail, notre objectif est d'appliquer la réinjection de galets, similaire à celle réalisée sur les grandes rivières mentionnées précédemment, à la problématique des curages. Cela se fera en réalisant des simulations numériques de réinjections.

Le curage implique l'extraction de galets du lit mineur afin de réduire le niveau de l'eau (Pacyna, 2022). Suite aux inondations de juillet 2021, de nombreux curages ont été entrepris dans les bassins versants de l'Ourthe, de la Vesdre et de la Lesse. Les travaux pour restaurer l'écoulement ont été réalisés en deux phases après les crues majeures de 2021. La première phase, d'urgence, a vu la réalisation de curages pour sécuriser et réparer les premiers dégâts constatés. Ensuite, d'autres curages ont été entrepris dans les 6 mois suivants pour finaliser le nettoyage et la sécurisation (wallonie.be, s.d.). À titre d'exemple, sur la Vesdre, environ 2500 interventions ont été recensées, soit une tous les 35 m, pour un total de plus de 73000 m<sup>3</sup> de sédiments curés (Rtbf auvio, s.d.). Des travaux d'aménagement et de stabilisation des berges ont également été réalisés sur l'Ourthe et la Vesdre (Dierickx & Gailliez, 2024). Pour ces interventions, un budget de 465 millions d'euros a été alloué, dont 300 millions d'euros pour les cours d'eau non navigables. Dans le cadre de ces travaux, il existe une volonté et une obligation d'utiliser des solutions basées sur la nature.

Tout comme la présence de barrages, les curages entraînent des conséquences néfastes pour l'hydromorphologie de la rivière. Ceux-ci, suit eau piégeage des sédiments, provoquent l'incision du lit pouvant conduire à l'effondrement des berges, l'homogénéisation du lit, la perte d'habitats aquatiques initialement présents dans les atterrissements. Les curages favorisent également le colmatage du fond du lit puisque l'action de curer remet en suspension des éléments fins (limon et argile) qui sédimenteront par la suite. Ces enlèvements de sédiments engendrent également un abaissement de la ligne d'eau à l'étiage, ce qui est problématique durant les périodes d'étiage (Pacyna, 2022). Les curages n'entraînent pas uniquement des conséquences en termes d'hydromorphologie mais entraînent également des répercussions sur les inondations. En effet, les galets présents sur le fond du lit augmentent la rugosité de la rivière, lui permettant de dissiper son énergie cinétique et ainsi de freiner son écoulement (Rtbf

auvio, s.d.). Ainsi, à la vue de ces conséquences, la problématique des curages entraîne la nécessité de procéder à des techniques de restauration comme les recharges sédimentaires.

La nécessité de curer de sédiments n'est pas toujours évidente. Certes, ils sont nécessaires lorsqu'il y a des crues importantes et des déplacements significatifs de sédiments, ainsi que la formation d'atterrissements qui peuvent entraver l'écoulement et causer des débordements. Cependant, de manière générale, les galets se déplacent peu, avec une distance maximale de déplacement d'environ 100 mètres pour l'Ourthe en période de crue (Pacyna, 2022).

Cependant, les réinjections de galets ne se limitent pas aux seules interventions sur le terrain. En effet, des expériences en laboratoire ont été menées dans le but de comprendre et d'estimer le processus général d'érosion des dépôts, l'évolution des vagues et l'impact de l'apport de sédiments sur la morphologie du lit de la rivière. L'utilisation d'outils numériques offre une approche hybride et complémentaire aux résultats expérimentaux. Ces outils numériques permettent d'effectuer des études systématiques sur l'application de la réinjection de sédiments dans les rivières (Battissacco *et al.*, 2016).

Il existe plusieurs modèles numériques développés au cours de ces dernières décennies pour simuler la propagation des impulsions des sédiments grossiers. Ces modèles sont notamment le modèle d'évaluation express du retrait des barrages (DREAM), le modèle unifié gravier-sable (TUGS), le modèle morphodynamique et traceurs de sédiments en 1D (MAST 1D). La plupart des modèles sont essentiellement développés à partir de raisonnement mathématique créés sur base d'observations recueillies à l'aide d'expériences faites au sein d'un canal expérimental (Vázquez-Tarrío *et al.*, 2023).

Cependant, ces modèles ne sont pas conçus pour suivre le mouvement individuel des galets qui est une information essentielle pour déterminer le temps d'arrivée des galets au sein des zones sensibles. Ainsi, Vázquez-Tarrío *et al.* (2023) ont élaboré une modélisation pour analyser la propagation vers l'aval des sédiments réinjectés à l'aide de données issues du terrain et d'informations sur le charriage.

Les modèles numériques sont de plus en plus utilisés dans des projets d'ingénierie, pas seulement pour la recharge de galets. Par exemple, Sidoryakina *et al.* (2023) utilisent ces modèles pour étudier le transport des matières en suspension dans les systèmes marins côtiers de la mer d'Azov. Ces modèles permettent d'intégrer différents paramètres tels que la granulométrie, les processus de transport et de sédimentation. Cette étude a également démontré la stabilité, la fiabilité et l'importance pratique du modèle développé.

Les paragraphes suivants présenteront différentes études utilisant les simulations numériques pour évaluer l'efficacité des réinjections.

Battissacco *et al.* (2016) ont analysé l'impact de la géométrie des réinjections en testant six configurations différentes dans un canal expérimental. Les configurations testées comprenaient des volumes parallèles, des volumes décalés vers l'aval de différentes longueurs, et des volumes uniques ou doubles placés sur les rives. Les résultats ont montré que les configurations avec des volumes décalés vers l'aval sur plus d'un quart de la longueur de la réinjection présentaient une résistance élevée des bancs, tandis que les configurations avec des volumes presque parallèles induisaient un rétrécissement de la section transversale et une concentration du débit, entraînant une résistance plus faible des réinjections (Annexe 1).

Stähly *et al.* (2020) ont également étudié la configuration géométrique des réinjections, en présentant des résultats pour une configuration avec des dépôts multiples et une disposition alternative des barres.

Leurs résultats ont montré que le dépôt du matériel reconstitué dans le tronçon aval a entraîné une diversité morphologique.

Brousse *et al.* (2022) ont analysé les réinjections numériques en étudiant l'érosion des bermes et la propagation des ondes sédimentaires. Leurs résultats ont souligné l'importance de la géométrie des bancs de réinjection, de leur emplacement et des conditions d'apport en sédiments pour l'efficacité de la réinjection.

Des réinjections numériques ont été utilisées par Czapiga *et al.* (2022) pour évaluer l'importance du lieu de déversement, de la granulométrie et du volume des sédiments. Leurs résultats ont montré une atténuation de l'érosion avec une augmentation de la pente d'équilibre du canal, indiquant que l'ajout de sédiments à la surface rend le flux de sédiments plus grossier et réduit l'érosion.

Stähly *et al.* (2018) ont combiné une étude sur le terrain avec l'utilisation de PIT tags (Passive Integrated Transponder) à une étude en laboratoire, montrant que les résultats des deux méthodes étaient en accord.

Cependant, malgré ces études, un manque de connaissance persiste sur le lien entre l'apport de sédiments et la morphologie du lit du canal. Il est donc nécessaire d'étudier l'influence de divers facteurs tels que le débit, la quantité de sédiments requise, l'emplacement géométrique et le mécanisme de propagation des sédiments pour assurer le succès des projets de recharges sédimentaires (Sidoryakina *et al.*, 2023).

En outre, les simulations numériques ne sont pas exclusivement utilisées dans le cadre de la réinjection de galets. En effet, Ersnt *et al.* (2010), utilisent les simulations numériques dans le cadre d'analyse des risques d'inondation à micro-échelle, à l'aide d'une modélisation détaillée en 2D ainsi que sur base de données topographiques et d'utilisation des sols à haute résolution. Ces simulations ont pour but de traduire les changements de paramètres climatiques, de débits, tenant compte des évolutions attendues de l'utilisation des terres. L'objectif de l'étude était d'évaluer le risque d'inondation en termes d'impact social et de dommages économiques sans prendre en compte les aspects environnementaux. Ces simulations de débits sont réalisées à l'aide du modèle numérique bidimensionnel WOLF 2D. Ce modèle sera ultérieurement utilisé dans le cadre de ce mémoire.

## 1.2. Objectif du travail

Ce travail a donc pour intérêt de simuler une réinjection de galets curés et de déterminer les conditions optimales de la réinjection sans augmenter la hauteur de ligne d'eau en crue et le risque d'inondation. Ces simulations de réinjections se font au niveau de la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux. Ce site est intéressant puisqu'il a subi des curages récurrents et présente donc un déficit de sédiments. L'intérêt des simulations est de pouvoir faire varier la taille des galets, le volume injecté, la localisation des galets et le débit lors de la réinjection. Dans le cadre de ce mémoire, il sera ainsi question de répondre aux questions suivantes traitant de l'impact d'un paramètre sur l'élévation de la ligne d'eau et la mobilité des sédiments.

- Quel est l'impact du débit lors de la réinjection ?
- Quel est l'impact du volume de galets réinjectés ?
- Quel est l'impact du diamètre des galets présents dans la rivière ?
- Quel est l'impact de la localisation de la réinjection de galets ?
- Quel est l'impact de la manière dont les galets sont réinjectés numériquement ?

Ces différents impacts sur l'élévation de la ligne d'eau et la mobilité des sédiments seront présentés quantitativement et qualitativement.

Les simulations seront effectuées à l'aide du système de modélisation intégrée WOLF. Cette interface permet de simuler en 1D, 2D et 3D les thématiques d'écoulement et de transport en génie civil et environnemental. Les principales applications associées au modèle de simulation WOLF incluent l'analyse du risque d'inondation, la conception d'ouvrages hydrauliques, le transport sédimentaire et le transport des contaminants par écoulement de surface. Les écoulements de surface libre ainsi que les écoulements sous pression sont caractérisés par des approches mathématiques unidimensionnelles et bidimensionnelles intégrant les équations de Navier-Stokes et de Reynolds. Le modèle reprend également des équations du transport sédimentaire, telles que celle du paramètre de Shields, qui s'intéresse à la mise en mouvement des sédiments. Cette approche mathématique est combinée à une approche numérique représentant, sous forme de matrices monoblocs et multiblocs, les paramètres d'intérêt sur une portion de la zone étudiée pour un pas de temps déterminé. WOLF est largement utilisé pour la recherche et bénéficie d'une reconnaissance nationale et internationale. Ce logiciel est également retenu comme référence pour le calcul des simulations 2D d'inondations en Belgique (uee.uliege.be, s.d.) (Ersnt *et al.*, 2010).

### 1.3. Plan du mémoire

Le mémoire présenté s'articulera comme suit. Le chapitre intitulé « Zone d'étude » s'intéressera à la présentation de la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux. Au travers de ce chapitre, les caractéristiques de l'Ourthe seront présentées : la granulométrie, les stations de mesures (Tabreux et Sauheid), valeurs des débits caractéristiques (débit plein bord, débit de mise en mouvement, ...). La boucle de l'Ourthe est une zone protégée ainsi les différents statuts de protection qui lui sont attribués seront également présentés au sein de ce chapitre. La boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux est pertinente pour l'étude de l'évaluation de l'impact des recharges sédimentaires sur la ligne d'eau puisque celle-ci présente un historique de curages importants et qu'elle possédait avant 1994 un barrage lié à la navigation entravant le chenal principal. Ainsi le premier chapitre présentera également ces deux thématiques.

Le chapitre suivant (3. Introduction du paramètre de Shields) présentera quant à lui l'ensemble des équations utilisées dans le but d'estimer la mobilité de la charge de fond : la puissance d'écoulement, la contrainte de cisaillement  $\tau_b$ , la contrainte de cisaillement des grains ( $\tau'$ ) et la contrainte de cisaillement associée aux formes du lit ( $\tau''$ ). Ces équations permettent de dériver l'équation du paramètre de Shields, qui est essentielle pour évaluer le transport de la charge de fond. Le phénomène de charriage sera également expliqué en détail dans ce chapitre.

Le chapitre « Méthodologie » tentera de déterminer une méthode visant à répondre à la problématique de l'évaluation de l'impact des recharges sédimentaires sur la ligne d'eau. Dans un premier temps, les conditions avant réinjection seront présentées (hauteur d'eau, vitesses, nombre de Froude et le paramètre de Shields) pour quatre débits (5, 150, 300 et 726 m<sup>3</sup>/s). Il sera également question de présenter les conditions limites imposées aux bornes aval du domaine. La seconde partie de ce troisième chapitre présentera les simulations qui seront réalisées pour déterminer l'impact de chaque paramètre sur l'élévation de la ligne d'eau. Le premier paramètre étudié est le diamètre des galets présents dans le chenal : la simulation tentera de déterminer quel est l'impact de la variation du diamètre des matériaux du fond sur l'élévation de la ligne d'eau et la mobilité des sédiments. Le second paramètre étudié est le débit lors de la réinjection : les simulations associées tenteront de répondre à la question : « Quel est l'impact de la variation du débit sur l'élévation de la ligne d'eau et la mobilité des sédiments ? ». Le troisième paramètre étudié est le volume de la réinjection : les simulations tenteront de déterminer quel est l'impact de la variation du volume de galets réinjectés sur l'élévation de la ligne d'eau et la mobilité des sédiments. Le quatrième paramètre étudié est la localisation de la réinjection : les simulations auront pour intérêt de déterminer la localisation qui entraîne le moins de variation de la ligne d'eau. Finalement,

le cinquième et dernier paramètre étudié est le style de la réinjection c'est – à – dire la manière dont les galets sont réinjectés numériquement. Les simulations sur ce paramètre estimeront si la manière dont la réinjection est effectuée impacte la mobilité des sédiments et l'élévation de la ligne d'eau.

Le chapitre (5. Résultats) présentera les résultats des différentes simulations expliquées dans le troisième chapitre. Les variations avant/après réinjection seront analysées en termes d'altitude de surface libre, de vitesse et de mobilité des sédiments à l'aide du paramètre de Shields. Les résultats seront exprimés aussi bien de manière qualitative que quantitative. Les variations de l'altitude de la surface libre seront chiffrées et cela permettra ultérieurement de tenter de déterminer la configuration occasionnant le moins de répercussions sur la ligne d'eau.

Le chapitre (6. Discussion & Validation) exposera la discussion des résultats présentés au sein du quatrième chapitre. Il tentera de relativiser les résultats obtenus en fonction des données utilisées et des données existantes. Un historique de la littérature sera également réalisée dans le but d'être comparé avec les données issues des simulations numériques.

Le dernier chapitre (7. Conclusion) tentera de synthétiser l'ensemble des chapitres précédemment exposés en répondant à la problématique : « Quel est l'impact de la réinjection de galets sur la ligne d'eau au niveau de la Boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux ». Il sera également question de déterminer la configuration optimale de réinjection sur base des résultats obtenus.

## 2. Zone d'étude

La zone étudiée au travers de ce mémoire est la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux (Figure 1). Cette zone a été choisie pour sa pertinence en lien avec l'étude présentée. En effet, l'amont de la boucle de l'Ourthe est régulièrement curé au niveau du village d'Esneux. De plus, cette zone présente également l'avantage d'avoir des données topographiques et bathymétriques disponibles.

A cet endroit, la rivière décrit une courbe de 6 km pour un rayon de courbure d'environ 550 m. Le pédoncule du méandre formé par la boucle de l'Ourthe porte le nom de presqu'île de Ham. Cette boucle est la résultante d'un phénomène de surimposition issue du soulèvement du socle ardennais (CRO, 2011). Au niveau de la boucle de l'Ourthe, la vallée est caractérisée de semi confinée c'est-à-dire que la rivière n'a la possibilité de déborder que d'un seul côté du lit (Eme *et al.*, 2022).



Figure 1. Présentation du site de la boucle de l'Ourthe à Esneux

L'Ourthe dont la superficie de son bassin est de 3672 km<sup>2</sup> est un affluent de la Meuse long de 165 km. Elle peut être décomposée en deux parties : l'Ourthe occidentale de 56 km et l'Ourthe orientale de 44.5 km. Ces deux portions de l'Ourthe prennent leur source en province de Luxembourg. L'orientale dans le village d'Ourt à une altitude de 515 m et l'occidentale dans la commune de Gouvy (riviereseffleuves.eu, 2017) (Eme *et al.*, 2022). La boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux fait partie de l'Ourthe inférieure (Houbrechts *et al.*, 2006). L'incision de l'Ourthe a commencé il y a environ deux millions d'années au travers de roches de résistances variées (CRO, 2011). Cette rivière possède comme affluent important l'Aisne à Bomal, le Néblon à Hamoir, l'Amblève à Comblain-au-Pont et la Vesdre à Chénée (Bernimolin *et al.*, 1993). L'Ourthe est qualifiée de navigable et flottable (Bernimolin *et al.*, 1993). Elle possède également sur son cours, le barrage de Nisramont qui est un ouvrage de retenue géré par la direction des voies hydrauliques de Liège (Bernimolin *et al.*, 1993).

## 2.1. Matériel du fond du lit & Charge de fond

Cette rivière présente un lit caillouteux avec un bassin versant développé sur un socle paléozoïque composé en majorité de roches imperméables et de calcaire. Elle appartient à un groupe de rivières descendant de la retombée septentrionale de l'Ardenne (Eme *et al.*, 2022). Ces rivières présentent des puissances à plein bord comprises entre 50 et 100 W/m<sup>2</sup> avec le D<sub>50</sub> de la charge de fond compris entre 50 et 100 mm (Houbrechts *et al.*, 2006). La taille des éléments peut être caractérisée par 3 dimensions perpendiculaires : la longueur (axe a), la largeur (axe b) et l'épaisseur (axe c). Ainsi, 100 galets prélevés sur la boucle de l'Ourthe ont été mesurés (Annexe 2) et une granulométrie par la méthode Wolman a été réalisée sur un seuil en rive droite (Figure 1 & 2). Il a été ainsi possible de mesurer l'axe b des 100 galets et d'ainsi déterminer le D<sub>50</sub>, D<sub>84</sub>, D<sub>16</sub> et D<sub>99</sub> du lit (Figure 3 & 4). La méthode Wolman se résume à échantillonner, à intervalle régulier le long d'un décamètre, 100 galets. Puisqu'il y a 100 éléments échantillonnés, chaque élément correspond à 1 % de l'échantillon total. Il est nécessaire que la distance entre chaque galet prélevé soit supérieure à la taille de l'élément le plus grossier pour éviter de comptabiliser plusieurs fois l'élément le plus grossier (Wolman, 1954). Plusieurs granulométries ont été réalisées par Eme *et al.* (2022) sur différents atterrissements présents au sein de la boucle de l'Ourthe (Tableau 1). Ces valeurs peuvent être comparées à celle déterminées par la méthode Wolman.



Figure 2. Seuil de l'Ourthe en aval d'Esneux. Source : photo personnelle

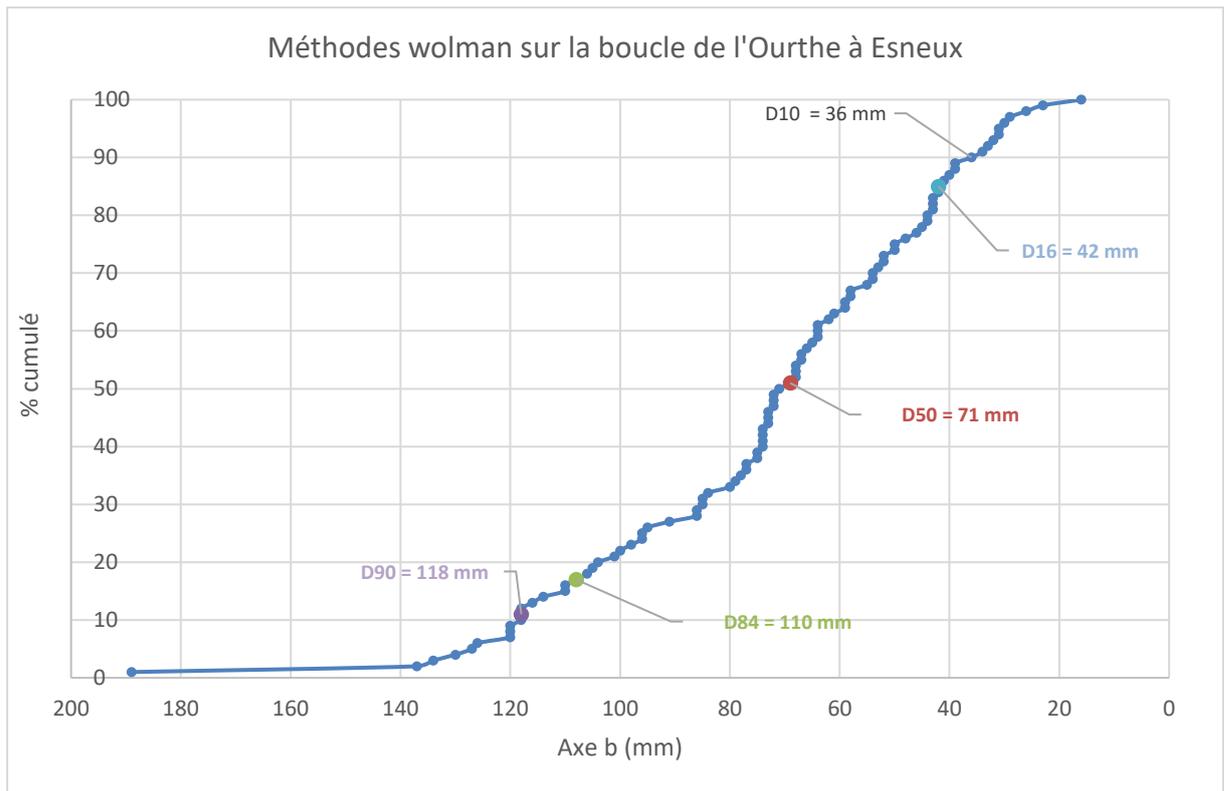


Figure 3. Granulométrie wolman de l'Ourthe en aval d'Esneux.



Figure 4. Exemple de galets prélevés au sein de l'Ourthe en aval d'Esneux. Source : photo personnelle.

Tableau 1. Caractéristiques granulométriques des atterrissements de la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux (Eme et al., 2022)

Atterrissement	D <sub>50</sub>	D <sub>84</sub>	D <sub>90</sub>
12 d	85 mm	148 mm	170 mm
17	63 mm	88 mm	92 mm
25	58 mm	80 mm	85 mm
30	71 mm	98 mm	103 mm
33	84 mm	117 mm	123 mm

## 2.2. Débits

L'Ourthe présente une variation significative de débits, attribuable au substrat imperméable constitué de phyllades, de quartzophyllades et de quartzites du Cambrien et du Dévonien inférieur sur lesquels elle s'écoule (Ek *et al.*, 2004). Des calcaires sont également présents dans le lit de l'Ourthe.

La boucle de l'Ourthe à Esneux se trouve entre les stations de Sauheid et de Tabreux (Figure 5) (Hydrometrie.wallonie.be, s. d.). La station de Sauheid a été choisie comme référence pour caractériser les débits au niveau de la boucle de l'Ourthe à Esneux. Les valeurs types de l'Ourthe à Sauheid ont été répertoriées dans le Tableau 2. Le charriage sur l'Ourthe est estimé à environ 1 à 2 tonnes/km<sup>2</sup>/an pour un bassin versant d'environ 3000 km<sup>2</sup> soit un volume d'environ 3000 m<sup>3</sup>/an. Houbrechts *et al.* (2006) ont déterminé un débit mobilisateur de l'ordre de 230 m<sup>3</sup>/s à Tabreux soit un seuil de mobilisation à 0,77 Q<sub>b</sub> avec Q<sub>b</sub>, le débit à pleins bord. Le débit de mise en mouvement a pu être déterminé à l'aide de campagnes de marquage à la peinture réalisées sur des dépôts émergés, permettant de laisser intacte l'agencement du matériel du lit. La récurrence du débit mobilisateur a pu être déterminée sur base de la série partielle des débits. À l'aide de la courbe des débits classés propres à la station de Sauheid, il a été possible de déterminer les jours de charriage (Houbrechts *et al.*, 2006).

Il existe d'autres techniques pour déterminer le débit mobilisateur de la charge de fond. La dispersion des scories sidérurgiques par les rivières depuis la fin du Moyen Âge a également été utilisée sur l'Ourthe pour déterminer sa compétence (Houbrechts & Petit, 2003) & (Houbrechts *et al.*, 2011). Le marquage de galets à l'aide de PIT Tags permet également cet effet (Houbrechts *et al.*, 2015). Un marquage de galets avait initialement prévu d'être réalisé dans le cadre de ce mémoire au niveau de la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux. Cependant, au vu des débits extrêmement élevés recensés cet automne et cet hiver, il a été impossible de les placer. Les galets prélevés ont néanmoins été mesurés et pesés (Annexe 2).

Les galets ayant un axe b de l'ordre de 78 mm, présents au niveau de l'Ourthe à Esneux se déplaceraient en moyenne de 5.5 m pour une crue de l'ordre de 206 m<sup>3</sup>/s à Sauheid (Eme *et al.*, 2022). Cette valeur de distance parcourue par les galets est toutefois à nuancer puisqu'il s'agit du premier déplacement après réinjection. Dès lors, cette distance correspond à la réorganisation des galets dans la rivière et peut être donc surestimée.

De plus, selon Houbrechts *et al.* (2015), pour un débit à plein bord de 300 m<sup>3</sup>/s, une largeur au plein bord de 49.8 m, une pente de 0.12 %, dans l'Ourthe à Esneux, la puissance spécifique est de 71 W/m<sup>2</sup>. En conséquence, la taille maximale mobilisable des éléments est estimée entre 83 mm et 128 mm, ce qui correspond aux valeurs de D<sub>50</sub> et D<sub>90</sub> (Tableau 2). En revanche, lors de la crue de juillet 2021 possédant un débit de 1 151 m<sup>3</sup>/s à Sauheid, la puissance spécifique est de 262 W/m<sup>2</sup>. Cette augmentation de la puissance spécifique entraîne une taille de galets mobilisable comprise entre 213 mm et 356 mm (Houbrechts *et al.*, 2015).

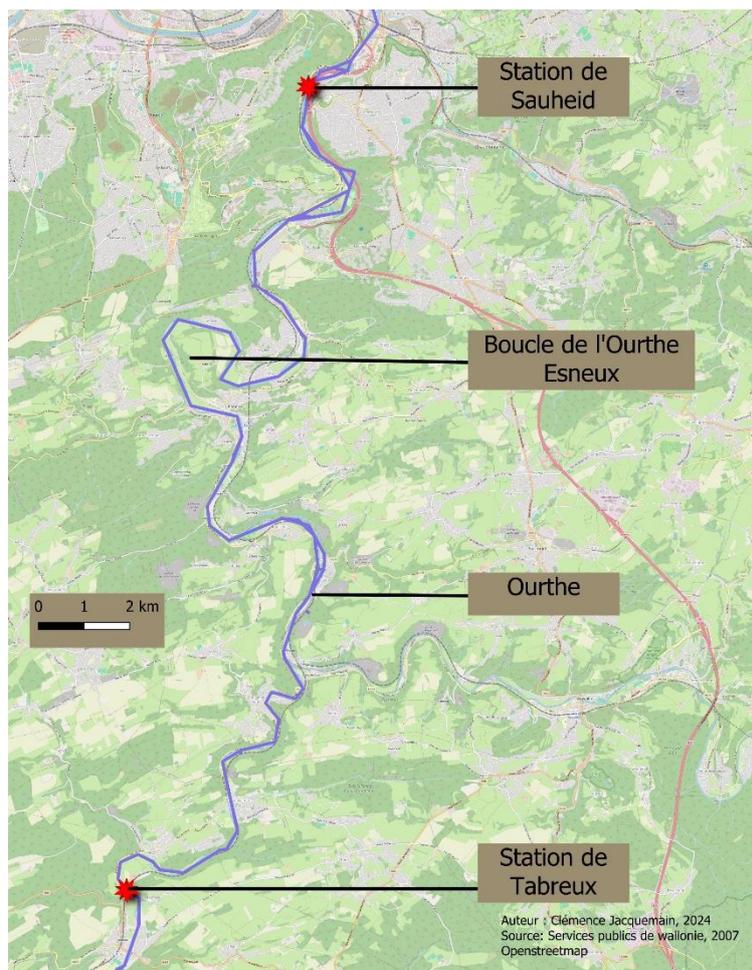


Figure 5. Localisation des stations hydrologiques de mesures.

Tableau 2. Valeurs caractéristiques de l'Ourthe à la station de Sauheid (Houbrechts et al., 2006).

Taille (km <sup>2</sup> )	Débit à plein bord (Q <sub>b</sub> )	Récurrance du Q <sub>b</sub>	Débit de mise en mouvement (Q <sub>mm</sub> )	Récurrance du Q <sub>mm</sub>	Nombre de jour de charriage par an
2904	300	0.97	230	0.49	6.3

L'Ourthe présente un historique de crues assez important et sort régulièrement de son lit. Les crues les plus importantes ayant marqué l'histoire de l'Ourthe sont les crues de 1993 (741 m<sup>3</sup>/s) et de 2021 (1 092 m<sup>3</sup>/s). Ces valeurs de débits sont celles recensées à la station de Sauheid (Eme *et al.*, 2022). Sur base des débits maximum des 20 dernières années, le Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale (LHGF) de l'Université de Liège, a pu analyser les récurrences des crues ayant eu lieu sur l'Ourthe à Sauheid. Le laboratoire a dénombré quatre événements possédant une récurrence supérieure à cinq ans (2002, 2003, 2011 et 2021) (Eme *et al.*, 2022). Selon Houbrechts *et al.* (2006), « Le débit à plein bord de chaque rivière a été identifié par des observations de terrain et sa récurrence déterminée par ajustement des crues maximales dans la distribution de Gumbel, en utilisant la série partielle des débits ».

Les événements de 2002 et de 2003 présentaient un débit de respectivement de 570 m<sup>3</sup>/s et de 508 m<sup>3</sup>/s. Ces valeurs hydrologiques sont obtenues sur base d'une analyse statistique d'une série chronologique de 30 ans de débits mesurés dans une station de jaugeage voisine de l'Ourthe (Ernst *et al.*, 2010).

### 2.3. Statuts de protection

La boucle de l'Ourthe est caractérisée par différents statuts de protections établis sur base de certaines caractéristiques notamment la faune et la flore. L'ensemble de ces statuts de protection rend la zone de la boucle de l'Ourthe extrêmement intéressante et pertinente pour la restauration et la mise en place de recharges granulométriques.

La boucle de l'Ourthe est caractérisée d'une part par une flore telle que l'aulne glutineux, le frêne et le saule. L'aulne glutineux constitue l'espèce arbustive principale des bords de l'Ourthe. Il existe deux espèces invasives principales bordant la rivière. La renouée du Japon est pourvue d'une tige pouvant s'élever jusque deux mètres. La deuxième plante est invasive est la balsamine de l'Himalaya recouverte de fleurs jaunes (Les Collèges d'Esneux, 2007).

La zone d'étude est également caractérisée par une faune propre. Ainsi, la zone est composée de barbeaux, de vairons, d'ablettes, de truites, de brêmes, de loches, de brochets et de perches. Les environs sont parcourus par plusieurs espèces d'oiseaux majoritaires tels que le héron cendré, le canard colvert, la bergeronnette grise, la bergeronnette des ruisseaux, la foulque macroule et la poule d'eau. Tout comme pour la flore, la faune de la boucle de l'Ourthe présente plusieurs espèces invasives telles que le castor, le rat musqué et la bernache du Canada (Les Collèges d'Esneux, 2007).

La boucle de l'Ourthe a progressivement été classée depuis 1936 jusqu'en 1981 où l'ensemble du méandre a été caractérisé comme site. Depuis 1993, l'ensemble du site a été reconnu par la Wallonie sur la liste du Patrimoine exceptionnel. La Commission Royale des Monuments et Sites a travaillé pour le classement intégral de la Boucle de l'Ourthe. Plusieurs associations naquirent pour perpétuer la protection du site comme la « Ligue des Amis des arbres » en 1905 et l'Association pour la protection de l'Environnement à Esneux (APEE) en 1975 (Les Collèges d'Esneux, 2007).

Dorénavant, la boucle de l'Ourthe est reprise dans les zones Natura 2000 (Figure 6) (Les Collèges d'Esneux, 2007). Les zones Natura 2000 font parties d'un réseau de sites protégés à l'échelle de l'Union Européenne ayant pour objectif de préserver la diversité des habitats et des espèces menacées (Géoportail de la Wallonie, s.d.). Le réseau Natura est principalement basé sur la Directive oiseaux et la Directive habitats (Portail de la Wallonie.be, s.d.). La boucle de l'Ourthe à Esneux fait partie du site BE33014 correspondant à la vallée de l'Ourthe entre Comblain-au-Pont et Angleur constituant plus de 700 hectares (Portail wallonie.be, s.d.).

L'Ourthe est également soumise aux projets de restauration LIFE+ (CRO, 2011). Ces projets sont financés en partie par l'Europe et se focalisent sur la restauration des habitats et des espèces protégées par les zones Natura 2000. Ils sont scindés en trois composantes : Nature et Biodiversité, Politique et gouvernance environnementale, Information et Communication. La première composante s'intéresse directement à la mise en œuvre de projets de restauration des zones Natura 2000. La seconde composante, quant à elle, se focalise sur l'aspect d'amélioration des législations environnementales, d'établissement de référentiels de politiques environnementales et de développement de sources d'informations environnementales. Finalement, la troisième et dernière composante s'intéresse aux financements de projets visant à la diffusion d'informations sur la conservation de l'environnement et la nature (Biodiversite.wallonie.be, s.d.). Ainsi, les pelouses présentent sur les roches calcaires au sein du bassin de l'Ourthe ont été soumises au projet LIFE+ appelé Hélianthème. Ce projet débutant en 2009 a duré cinq ans et a permis la restauration de ces pelouses (Biodiversite.wallonie.be, s.d.).

## Boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux, zone Natura 2000

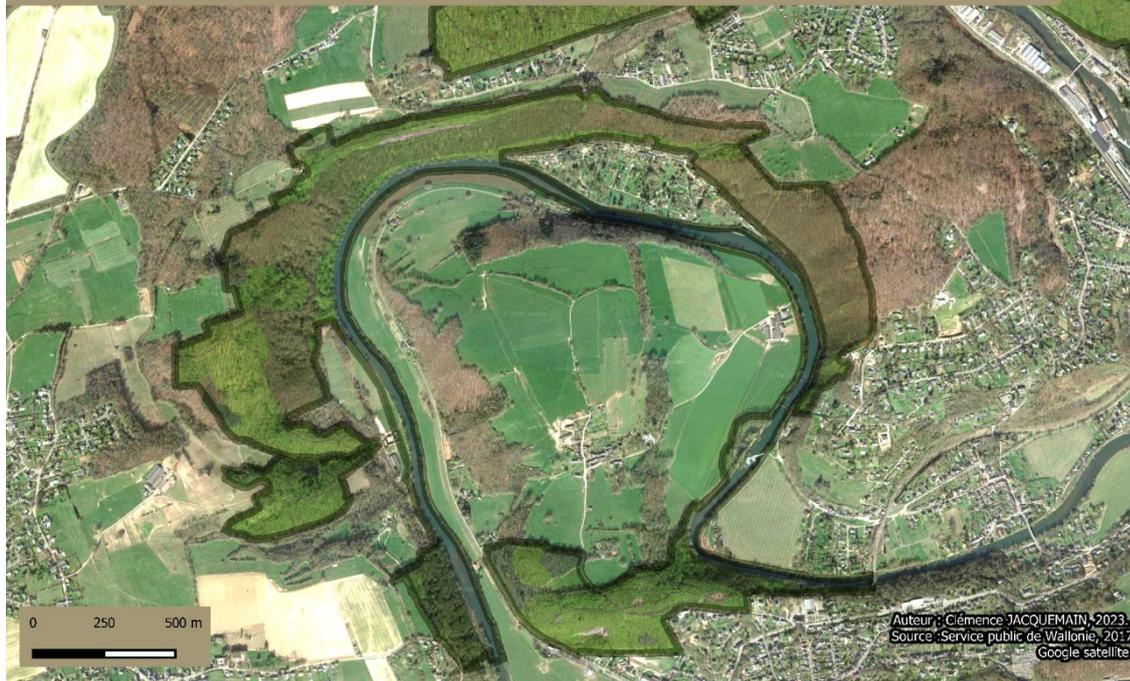


Figure 6. Zone Natura 2000 au niveau de la boucle de l'Ourthe à Esneux

<p><b>Unité de gestion en surimpression S2 linéaires (1)</b></p> <p>— damier de la succise</p> <p><b>Unité de gestion en surimpression S2 (2)</b></p> <p>▨ damier de la succise</p> <p><b>Unités de gestion en surimpression S1 linéaires (3)</b></p> <p>— moule perlière et mulette épaisse</p> <p><b>Unités de gestion en surimpression S1 (4)</b></p> <p>▨ moule perlière et mulette épaisse</p> <p><b>Unités de gestion ponctuelle (5)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ UG 01 : milieux aquatiques</li> <li>○ UG 02 : milieux ouverts prioritaires</li> <li>○ UG 03 : prairies d'habitats d'espèces</li> <li>○ UG 04 : bandes extensives</li> <li>○ UG 05 : prairies de liaison</li> <li>○ UG 06 : forêts prioritaires</li> <li>○ UG 07 : forêts prioritaires alluviales</li> <li>○ UG 08 : forêts indigènes de grand intérêt biologique</li> <li>○ UG 09 : forêts habitat d'espèces</li> <li>○ UG 10 : forêts non indigènes de liaison</li> <li>○ UG 11 : terres de cultures et éléments anthropiques</li> </ul>	<p><b>Unités de gestion (7)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ UG 01 : milieux aquatiques</li> <li>□ UG 02 : milieux ouverts prioritaires</li> <li>□ UG 03 : prairies d'habitats d'espèces</li> <li>□ UG 04 : bandes extensives</li> <li>□ UG 05 : prairies de liaison</li> <li>□ UG 06 : forêts prioritaires</li> <li>□ UG 07 : forêts prioritaires alluviales</li> <li>□ UG 08 : forêts indigènes de grand intérêt biologique</li> <li>□ UG 09 : forêts habitat d'espèces</li> <li>□ UG 10 : forêts non indigènes de liaison</li> <li>□ UG 11 : terres de cultures et éléments anthropiques</li> <li>□ UG Temp 01 : zones sous statut de protection</li> <li>□ UG Temp 02 : zones à gestion publique</li> <li>□ UG Temp 03 : forêts indigènes à statut temporaire</li> </ul> <p><b>Périmètres des sites en vigueur (&gt; 50.000) (9)</b></p> <p>▨ Site Natura 2000</p> <p><b>Périmètres des sites en vigueur (&lt;= 50.000) (10)</b></p> <p>□ Site Natura 2000</p>
<p><b>Unités de gestion linéaires (6)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— UG 01 : milieux aquatiques</li> <li>— UG 02 : milieux ouverts prioritaires</li> <li>— UG 03 : prairies d'habitats d'espèces</li> <li>— UG 05 : prairies de liaison</li> <li>— UG 06 : forêts prioritaires</li> <li>— UG 07 : forêts prioritaires alluviales</li> <li>— UG 08 : forêts indigènes de grand intérêt biologique</li> <li>— UG 09 : forêts habitat d'espèces</li> <li>— UG 10 : forêts non indigènes de liaison</li> <li>— UG 11 : terres de cultures et éléments anthropiques</li> </ul>	

Figure 7. Légende des zones Natura 2000 (SPW, 2017).

De plus, l'Ourthe comme l'ensemble des cours d'eau européen est soumise à la Directive Cadre sur l'Eau. Cette Directive a été mise en place le 23 octobre 2000 visant l'atteinte d'un bon état écologique initialement prévu pour 2015. Cependant, cet objectif n'a pas été atteint. Dès lors, il a été postposé et est toujours d'actualité (DCE, 2000/60/CE). La Directive prône la gestion des bassins versants ainsi que la surveillance biologique des habitats sur base de plans d'actions imposés aux états européens pour une meilleure gestion des cours d'eau (Newson & Large, 2006). L'Ourthe possède un état hydromorphologique allant de bon à très bon dû à la présence d'une grande diversité d'habitats (Eme *et al.*, 2022).

#### 2.4. Atterrissements & curages

La boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux présentait 16 atterrissements en octobre 2021 avant les travaux de curage en réponse aux inondations de juillet 2021 (Eme *et al.*, 2022). Les atterrissements, également appelés plages de dépôts, sont des dépôts de la charge de fond (galets, graviers, sables, ...) formés lorsque la vitesse de la rivière ne permet plus leur transport. Ils peuvent se végétaliser et former un dépôt de plus grande ampleur dénommé : bancs. Ces bancs doivent être gérés pour perdurer des conditions optimales d'écoulement. Les atterrissements se forment préférentiellement en rive convexe ou à l'aval des seuils et des barrages (Eme *et al.*, 2022) & (Actu-Environnement, 2015).

Le Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale de l'université de Liège (Eme *et al.*, 2022) a recensé un historique complet de l'évolution des curages et atterrissement présent dans le centre d'Esneux au niveau du pont (Figure 8) pour la période comprise entre 2009 et 2022. Cet historique a pu être réalisé à l'aide d'orthophotoplans et de modèles numériques de terrain. Les années 2009, 2010 et 2011 présentent une accumulation de dépôt. Les volumes accumulés en 2010 sont de l'ordre de 1000 m<sup>3</sup> alors qu'en 2011, le volume de galets déposés est nettement plus important soit environ 2500 à 3000 m<sup>3</sup> à la suite de la crue de janvier. L'année 2012, quant-à-elle, correspond à une année où un curage de 3 442 m<sup>3</sup> a été réalisés. Ensuite, la période comprise entre 2012 et 2019 présente une accalmie hydrologique puisqu'on comptabilise uniquement deux jours possédant un débit supérieur au plein bord. Ce manque de crue limite le charriage et génère un faible dépôt sédimentaire de l'ordre de 400 m<sup>3</sup>. L'année 2013 est également une année où un curage de 3442 m<sup>3</sup> a été réalisé. Une accumulation de l'ordre de 1000 m<sup>3</sup> a eu lieu entre le curage de 2013 et la crue de juillet 2021. Finalement, la crue pluricentennale de juillet 2021 a généré un dépôt de l'ordre de 7700 m<sup>3</sup>. En 2022, des curages de 8666 et 9320 m<sup>3</sup> ont été réalisés (Eme *et al.*, 2022). Historiquement, entre 1955 et 1994, plus de 230 000 m<sup>3</sup> de sédiments ont été curés sur l'Ourthe (Petit *et al.*, 1994 cités dans Eme *et al.*, 2022).

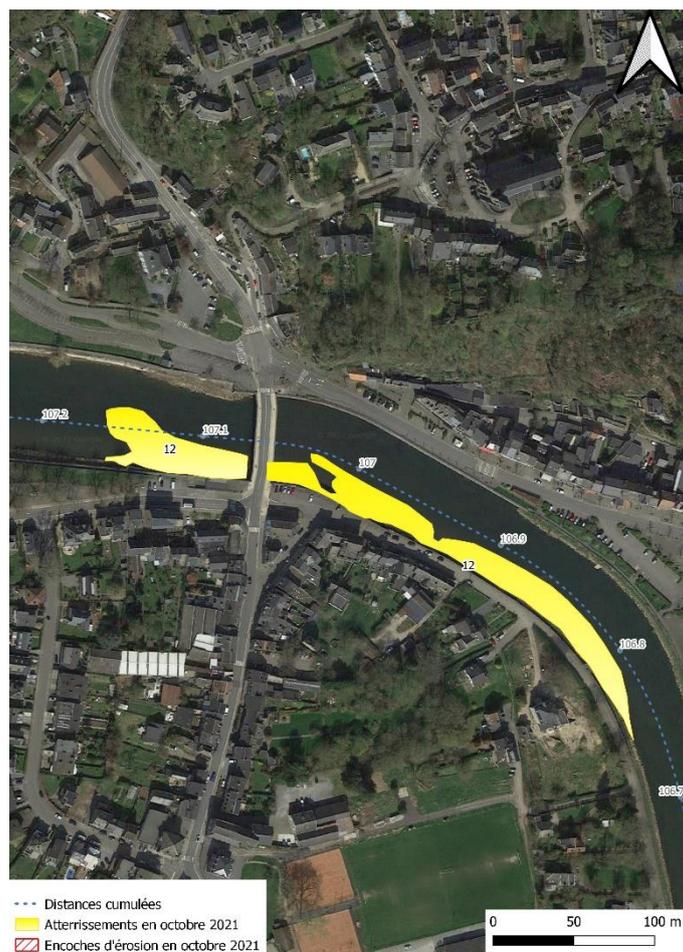


Figure 8. Exemple d'atterrissement et d'encoche d'érosion au niveau du pont d'Esneux en octobre 2021 (Eme et al., 2022).

## 2.5. Canal de l'Ourthe & Barrage

L'Ourthe a été longtemps exploitée pour la navigation et l'approvisionnement en eau des moulins la bordant, utiles notamment pour les fonderies, fenderies et les forges. Ces deux utilisations étaient auparavant en conflit pour la garde du débit de l'Ourthe. En effet, les propriétaires de moulins dérivèrent le courant vers leurs installations en construisant des venues diminuant l'eau disponible pour la navigation. Ces ouvrages ont également généré en aval des dégâts considérables par érosion, et la formation d'îles et de dépôts. Ces conflits ont pu trouver comme compromis, la construction en 1847 du canal de l'Ourthe. Ce projet avait pour objectif d'adjoindre à la rivière des dérivations vers les moulins et les écluses nécessaires. Il servait également de canal de dérivation lors d'inondations importantes. Le canal de l'Ourthe perdit de l'intérêt lors de l'apparition des voies de chemins de fer. Par la suite, de nombreux tronçons furent progressivement remblayés (Bernimolin, 1993).

La boucle de l'Ourthe présente également un intérêt pour la recharge granulométrique par la présence dans le passé d'un barrage-déversoir au niveau d'Esneux (Figure 9). Celui-ci a été en activité de 1840 à 1994. Il a été construit pour alimenter le canal de l'Ourthe et également permettre la navigation en surélevant le niveau de l'eau.

Cependant, il a été démantelé en 1994 pour abaisser le niveau d'eau en crue à la suite de l'inondation de 1993. Il semblerait que cet ouvrage laissait passer la charge de fond puisque des atterrissements sont visibles à l'aval de celui-ci. Cependant, il semblerait que l'arasement du seuil ait provoqué une déstabilisation du fond du lit et une érosion régressive (Eme et al., 2022). La Figure 9 présente un

déversoir à Hony qui était autrefois un barrage servant à alimenter le canal de l'Ourthe (Figure 9). Comme expliqué précédemment dans l'introduction, la présence de barrage peut générer un piégeage de sédiments. Cependant, en aval de ce barrage situé à Hony se trouve ainsi la formation d'atterrissement (Eme *et al.*, 2022). On en déduit donc, comme Peeters *et al.* (2020), que les déversoirs ne piègent plus la charge de fond et que les galets peuvent les franchir.

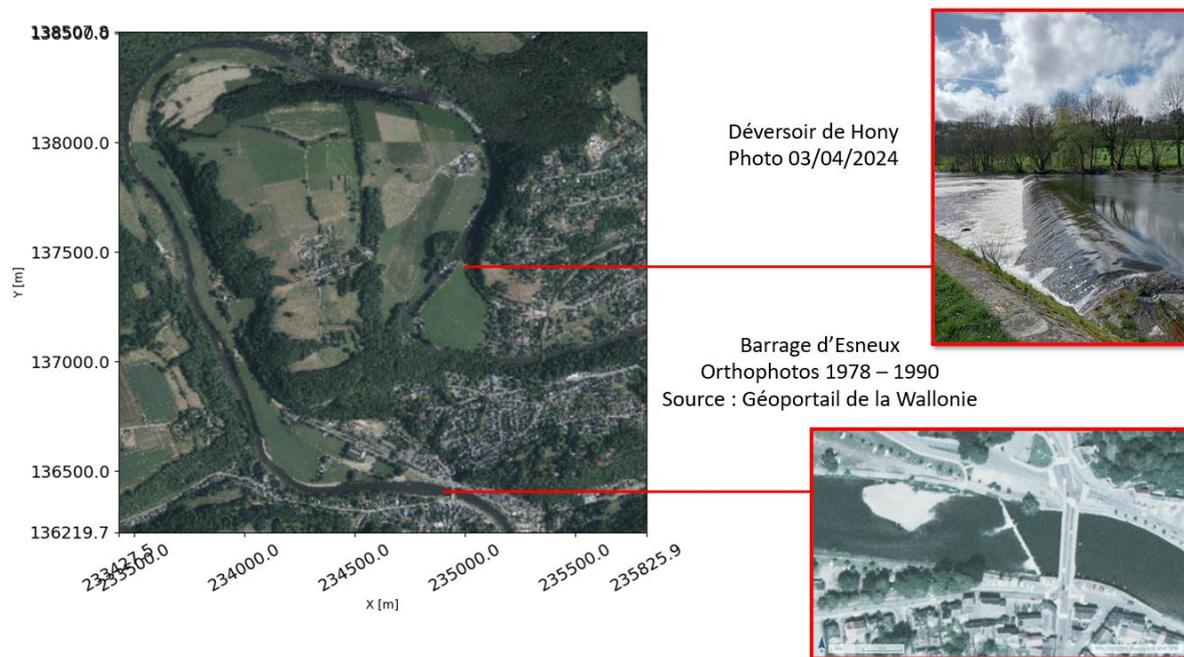


Figure 9. Localisation des déversoirs présents sur la Boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux.

### 3. Introduction du paramètre de Shields

Au sein de cette partie, l'évolution spatio-temporelle de la rivière sera explorée. Cette évolution se manifeste longitudinalement (transfert des sources vers les zones de stockage), latéralement (de la rivière vers la plaine alluviale), verticalement (vers la nappe alluviale) et temporellement (Arnaud & Schmitt, 2018). La puissance de l'écoulement, qui traduit la capacité de transport de la rivière, peut être représentée par l'équation suivante :

$$\Omega \left[ \frac{W}{m} \right] = \rho \times g \times Q \times J$$

avec

- $g$ , l'accélération de la pesanteur  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$
- $\rho$ , la masse volumique de l'eau  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
- $J$ , la pente de la ligne d'énergie fonction de la topographie  $\left[ \frac{m}{m} \right]$
- $Q$ , le débit liquide fonction du type de climat et de la nature du bassin versant  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$

La puissance d'écoulement peut également être traduite par la puissance spécifique permettant la comparaison entre les cours d'eau. Celle-ci représente la quantité de travail qu'une rivière peut effectuer, est présentée par l'équation suivante (Petit *et al.*, 2005) :

$$\omega \left[ \frac{W}{m^2} \right] = \frac{(\rho \times g \times Q \times s)}{w}$$

avec

- $Q$ , le débit  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$
- $w$ , la largeur de la surface de l'eau  $[m]$
- $s$ , la pente longitudinale  $\left[ \frac{m}{m} \right]$
- $\rho$ , la masse volumique de l'eau  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
- $g$ , l'accélération de pesanteur  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

La puissance spécifique permet de créer une typologie de rivières et d'évaluer la qualité hydromorphologique des eaux de surface sur base de données hydromorphologiques de terrain (Hallot *et al.*, 2010).

Le transport expliqué par la puissance du cours d'eau est scindé en différentes catégories selon la taille des sédiments. Si le sédiment est grossier ( $> 0.5$  mm), il est transporté par charriage (roulement et saltation) tandis que si le sédiment est fin, il est transporté par suspension (Bravard & Petit, 1997) (Piasny, 2023). Dans le cas de ce mémoire, il sera question de s'intéresser uniquement au charriage puisque que les galets représentent des sédiments grossiers supérieurs à 0.5mm.

Pour faciliter au mieux le passage du débit et ainsi augmenter la puissance et donc le transport des sédiments, la rivière a tendance à varier la morphologie et la rugosité du lit en modifiant sa pente de fond  $i$ , sa largeur  $W$  et sa hauteur d'eau  $h$ . Ces processus d'ajustement du cours d'eau sont traduits par un équilibre entre les débits solides et liquides appelé la balance de Lane expliquant les différentes morphologies fluviales (Malavoi & Bravard, 2010) (Lane, 1955) (Figure 10).

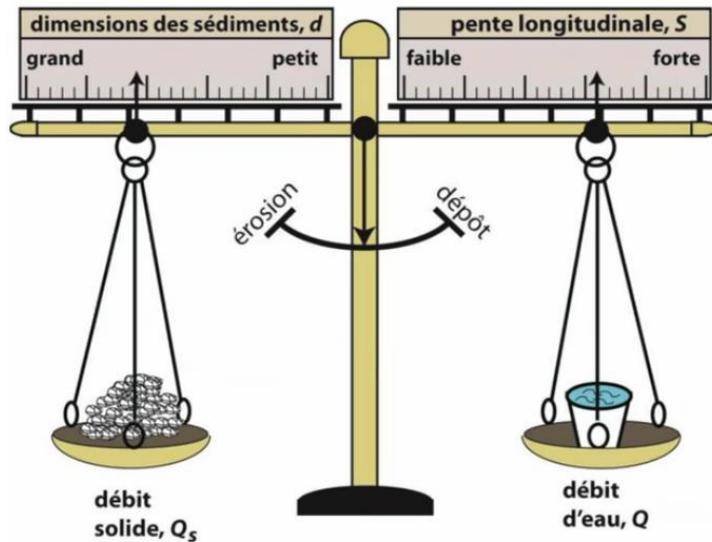


Figure 10. Balance de Lane (Lane, 1955).

Selon Piasny (2023), la mise en mouvement de particules se produit lorsque les forces hydrodynamiques (liées à la vitesse appliquée sur la particule) deviennent prépondérantes sur les forces stabilisatrices (équivalentes à la différence entre le poids et la poussée d'Archimède).

Dans le but de déterminer la mobilisation des sédiments au sein de la rivière, il est essentiel de déterminer la contrainte de cisaillement au fond  $\tau_b$  ( $N/m^2$ ). Celle – ci correspond à la force d'écoulement appliquée sur les berges et le fond de la rivière. Selon l'hypothèse d'un écoulement uniforme, les forces de frottements équilibrent le poids selon l'équation suivante :

$$\tau_b \times \chi \times L = \rho \times g \times \Omega \times L \times \sin \theta$$

avec

- $\chi$ , le périmètre mouillé [m]
- $\Omega$ , la section mouillée [ $m^2$ ]
- $L$ , largeur du volume d'eau [m]
- $\theta$ , l'angle de la pente du cours d'eau

Selon l'hypothèse d'une rivière à faible pente et à section rectangulaire, l'équation peut être approximée comme suit :

$$\tau_b = \rho \times g \times \frac{\Omega}{\chi} \times \sin \theta = \rho \times g \times h \times S$$

En effet, pour les rivières à faible pente, le sinus de la pente peut être approximé par la pente elle-même. De même, le rayon hydraulique, qui est le rapport entre la section mouillée et le périmètre mouillé, peut être approximé par la hauteur. Toutefois, dans la réalité, il y a des frottements dus à la présence de sédiments, représentés par le coefficient de frottement  $n$  (Figure 11) (Piroton, 2023, communication personnelle [cours écoulement à surface libre]) (Petit *et al.*, 2015).

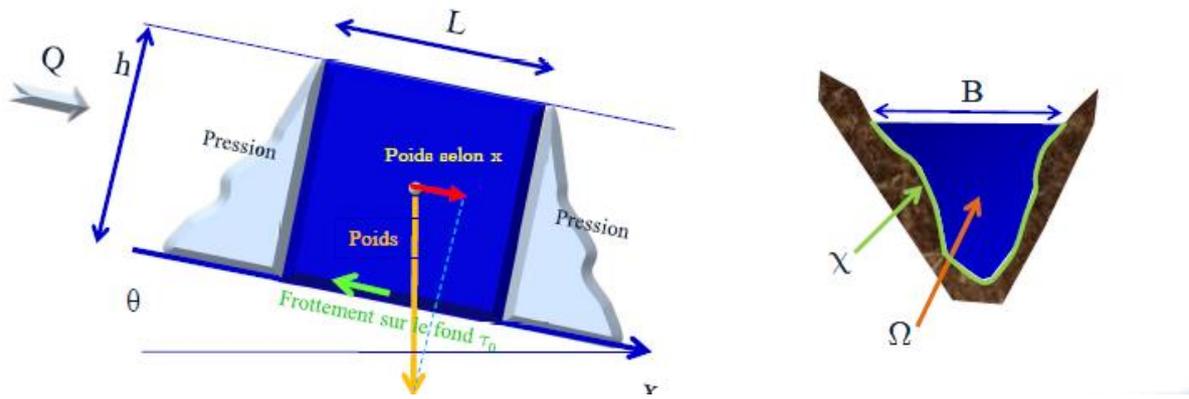


Figure 11. Simplification en section rectangulaire et en écoulement uniforme (Pirotton, 2023, communication personnelle [cours écoulement à surface libre]).

La contrainte de cisaillement totale ( $\tau$ ) se divise en deux composantes : la contrainte de cisaillement des grains ( $\tau'$ ) et la contrainte de cisaillement liée à la forme du lit ( $\tau''$ ). La contrainte de cisaillement des grains ( $\tau'$ ) intervient uniquement dans le transport et l'initiation du mouvement du charriage (Petit *et al.*, 2015). D'autre part, la contrainte de cisaillement liée à la forme du lit ( $\tau''$ ) reflète la rugosité du fond, les rides de courants et l'ensemble des formes du lit. Cette contrainte de cisaillement peut également être exprimée comme une fonction de la vitesse :

$$\tau_b = gh \frac{n^2 \|u\|^2}{h^{\frac{4}{3}}}$$

avec

- $u$ , la vitesse spécifique [m/s]
- $n$ , le coefficient de frottement [ $s/m^{1/3}$ ]

Les contraintes de cisaillement, associées aux vitesses de courant, sont essentielles pour comprendre les changements géomorphologiques du lit d'une rivière à charge caillouteuse. Elles expliquent notamment l'érosion et le transport de la charge caillouteuse. Cependant, les valeurs de la contrainte de cisaillement varient suivant le site et le débit. Lors des débits faibles, les mouilles présentent des contraintes de cisaillement faibles à l'inverse des seuils qui présentent des contraintes de cisaillement élevées. Il est alors possible d'observer une accumulation de dépôts sur les mouilles et de l'érosion sur les seuils. Lorsque les débits se rapprochent du débit à pleins bords, les valeurs des contraintes de cisaillement s'inversent. En effet, les contraintes de cisaillement deviennent plus importantes au niveau des mouilles qu'au niveau des seuils. Cette configuration permet un remaniement des éléments bloqués dans les mouilles. Les seuils symbolisent des lieux de piégeage des éléments et permettent de déterminer la compétence effective de la rivière (Petit *et al.*, 1987).

À partir de la contrainte de cisaillement, il est possible d'estimer le paramètre de Shields ( $\theta$ ) fournissant une valeur critique de mise en mouvement des particules en fonction du diamètre de celles-ci. Ce paramètre correspond à la contrainte de cisaillement sans dimension et est donné par la formule suivante :

$$\theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho) \times g \times D}$$

avec

- $\rho_s$ , la masse volumique de la particule (2650 kg/m<sup>3</sup> pour les galets)
- $D$ , le diamètre de la particule

Le paramètre de Shields correspond ainsi au rapport entre les forces stabilisatrices et les forces déstabilisatrices. La valeur du paramètre permet de dire si les particules sont stables ou non et si l'on observe du transport ou de l'érosion.

Selon Petit *et al.* (2015), il est possible d'attribuer une valeur critique au paramètre de Shields ( $\theta_c$ ) résolvant cette équation pour une valeur de diamètre donné. La valeur de  $\theta_c$  est fonction du nombre de Reynolds de grain traduisant de la turbulence de la rivière et pouvant être calculé sur base de la formule suivante :

$$Re = \frac{(u \times D)}{\nu}$$

avec

- $\nu$ , la viscosité [Pa. S]

Sur base d'expérimentations en laboratoire, la valeur de  $\theta_c$  est égale à une valeur constante de 0.05-0.06 pour des lits hydrauliquement rugueux c'est-à-dire avec un nombre de Reynolds supérieur à 1000. Ainsi, pour des rivières naturelles possédant un nombre de Reynolds supérieur à 500, le seuil de mise en mouvement est constant (Figure 12). Cependant, cette valeur de  $\theta_c$  peut varier entre 0.03 et 0.07 selon la méthode utilisée pour la définir (Dewals, 2024, communication personnelle [cours d'Hydrodynamique fluviale]). La variation de cette valeur critique peut également être temporelle, liée à la réorganisation des sédiments au cours des événements hydrologiques. (Petit *et al.*,2015) & (Piasny, 2023). La Figure 12 montre également que sous la courbe, il y a une absence de mouvement. Contrairement à la présence de mouvement au-dessus de la courbe.

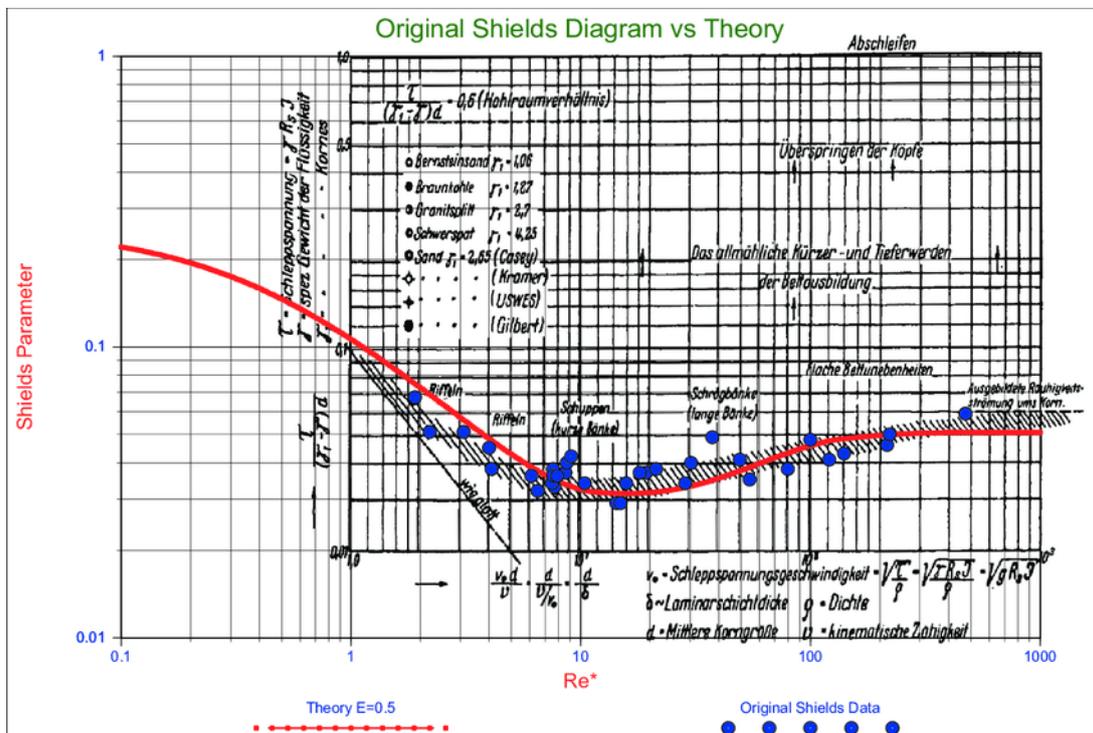


Figure 12. Courbe de Shields (Miedema, 2010).

La valeur critique du paramètre de Shields tend à varier également si la granulométrie est étendue, à savoir non uniforme. En effet, les particules grossières ont tendance à se positionner sur les particules fines ce qui rend les particules grossières plus exposées à l'écoulement que les particules fines. Ainsi la valeur critique du paramètre de Shields a tendance à augmenter pour les particules fines et à diminuer pour les particules grossières (Piasny, 2023). Cette tendance se prénomme l'effet de saillie (Petit *et al.*, 2000).

La valeur critique du paramètre de Shields peut être estimée sur base du diamètre des éléments maximaux. Mais ce diamètre maximal est parfois difficile à estimer. Selon Houbrechts *et al.* (2011), le  $D_{95}$  peut être utilisé et déterminé sur base du diamètre des dix plus grosses particules. Cette valeur servira à déterminer la compétence du cours d'eau (Piasny, 2023).

Lorsque le seuil de la mise en mouvement des particules est estimé, il est également possible d'estimer le transport effectué par charriage. L'estimation du transport ne fera pas l'objet de ce mémoire puisque celui-ci s'intéresse uniquement à la mise en mouvement des sédiments.

## 4. Méthodologie

Au travers de la méthodologie, il sera question d'expliquer la réalisation des simulations de réinjections de galets. Comme expliqué précédemment dans l'introduction, ces simulations ont été réalisées avec le système de modélisation intégrée WOLF

L'objectif est de déterminer la configuration optimale d'injection de galets qui occasionnerait une surélévation du plan d'eau minimale et une mise en mouvement des galets. Pour établir cette configuration optimale, les analyses seront basées sur les équations exprimées dans le chapitre 3.

### 4.1. Données utilisées

Les données utilisées sont issues de simulations précédemment réalisées pour l'étude d'une modélisation détaillée des inondations en 2D. Les données topographiques sont issues d'une altimétrie laser de haute précision de 2000 – 2002 (Ernst *et al.*, 2010). La topographie du fond, quant à elle, découle de profils réalisés sur le terrain en hiver entre 1960-1970 fourni par le SPW.

Le coefficient de frottement présent est imposé à un coefficient de Manning de  $0.0238 \text{ s/m}^{1/3}$ . Les mailles présentes au sein de la simulation sont de 2 m sur 2 m.

### 4.2. Modèle

La modélisation hydrodynamique a été effectuée sur base de matrices monoblocs et multiblocs en bidimensionnelle. L'ensemble des simulations réalisées sont considérées comme se trouvant dans une configuration où le débit est stationnaire, c'est-à-dire avec des profondeurs et des vitesses d'écoulement variant uniquement dans l'espace et fixées dans le temps. Pour ce faire, les simulations ont tourné pendant une durée suffisante pour les faire converger, c'est-à-dire que la simulation a atteint son état stationnaire. En pratique, les différences de hauteur entre les pas successifs sont inférieures au millimètre. Le modèle se base sur une méthode de volumes finis en résolvant les *shallow water equations*.

L'hypothèse d'un régime permanent peut être établie pour les affluents de la Meuse dans le massif Ardennais, tels que l'Ourthe, en raison de la combinaison de gradients de pente importants et de vallées présentant des sections transversales relativement étroites. Cette configuration se traduit par une capacité de stockage très faible dans les plaines inondables (Ernst *et al.*, 2010).

### 4.3. Conditions avant réinjection

Les simulations seront réalisées à partir de conditions initiales dans le but de pouvoir effectuer une comparaison entre les caractéristiques d'écoulement avant et après la réinjection de galets. L'intérêt sera de confronter l'état initial (avant réinjection) avec l'état final (après réinjection) du point de vue des hauteurs d'eau, des vitesses d'écoulement, du nombre de Froude et du paramètre de Shields. Ces conditions initiales sont observées sous différents débits : un débit d'étiage ( $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ), un débit de même ordre de grandeur que celui à plein bord ( $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ), un débit intermédiaire ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et finalement un débit correspondant à une crue de récurrence de 25 ans ( $726 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Ce dernier débit est particulièrement intéressant pour l'analyse et la gestion du risque d'inondations. L'objectif d'observer les conditions initiales sur plusieurs débits est d'identifier les conditions initiales les plus propices aux déplacements des galets.

#### 4.3.1. Conditions limites

Le nombre de Froude a été imposé à 0.4 à la limite aval du domaine dans le but de fixer les conditions limites de surface libre sur l'ensemble du domaine. Pour rappel, le nombre de Froude correspond au rapport entre l'énergie cinétique sur l'énergie potentielle et sert à classer les régimes d'écoulement. Lorsque le nombre de Froude est supérieure à l'unité, l'écoulement est qualifié de supercritique. Inversement, si le nombre de Froude est inférieure à l'unité, l'écoulement est qualifié d'infécritique. La condition limite, lorsque le nombre de Froude est égal à l'unité, correspond à un écoulement qualifié de critique (Piroton, 2023, communication personnelle [cours d'écoulement à surface libre]). Pour déterminer les conditions initiales de surface libre, une valeur de 0.4 est imposée au nombre de Froude.

Le nombre de Froude est fonction du débit et de la hauteur d'eau présents au sein de la rivière.

Ainsi, en utilisant le débit imposé propre à chaque situation et le nombre de Froude choisi, il devient possible de déterminer la hauteur d'eau en aval du domaine. L'intérêt de définir une condition limite aval de Froude est d'établir la relation entre la hauteur et la vitesse, créant ainsi une corrélation entre les inconnues du problème. Sans cette relation fixée, la résolution du système est impossible. Il est préférable d'imposer une valeur au nombre de Froude comme condition limite qu'une valeur de débit. En effet, le nombre de Froude génère plus de stabilité et engendre moins de variation de hauteurs d'eau. Ensuite, il est essentiel de voir si les conditions limites imposées n'ont pas de répercussions sur les résultats observés. Pour ce faire, d'autres valeurs du nombre de Froude (0.3 et 0.5) sont imposées et comparées aux résultats obtenus pour un nombre de Froude fixé à 0.4. Cette analyse permet d'examiner les différences entre le scénario testé (Froude = 0.3) et la référence (Froude = 0.4) en termes de hauteurs d'eau (Figure 13) et de normes de vitesse (Figure 14). Il est également envisageable d'effectuer la même analyse avec un scénario testé où le nombre de Froude est fixé à 0.5 (Figure 15 & 16). Comme les différences observées sont minimales, les résultats sont considérés comme peu sensibles à la valeur du nombre de Froude imposé. On peut noter que les disparités tendent à être plus prononcées à proximité de la limite aval où les conditions ont été imposées, puis diminuent en remontant le cours. Ainsi, il est préconisé de réaliser les simulations en amont de la zone d'étude où les variations de hauteurs et de normes de vitesses sont moindres.

L'intérêt est porté sur les différences de hauteurs et de vitesses puisque ces deux paramètres interviennent dans le calcul du paramètre de Shields par l'intermédiaire de la tension de cisaillement.

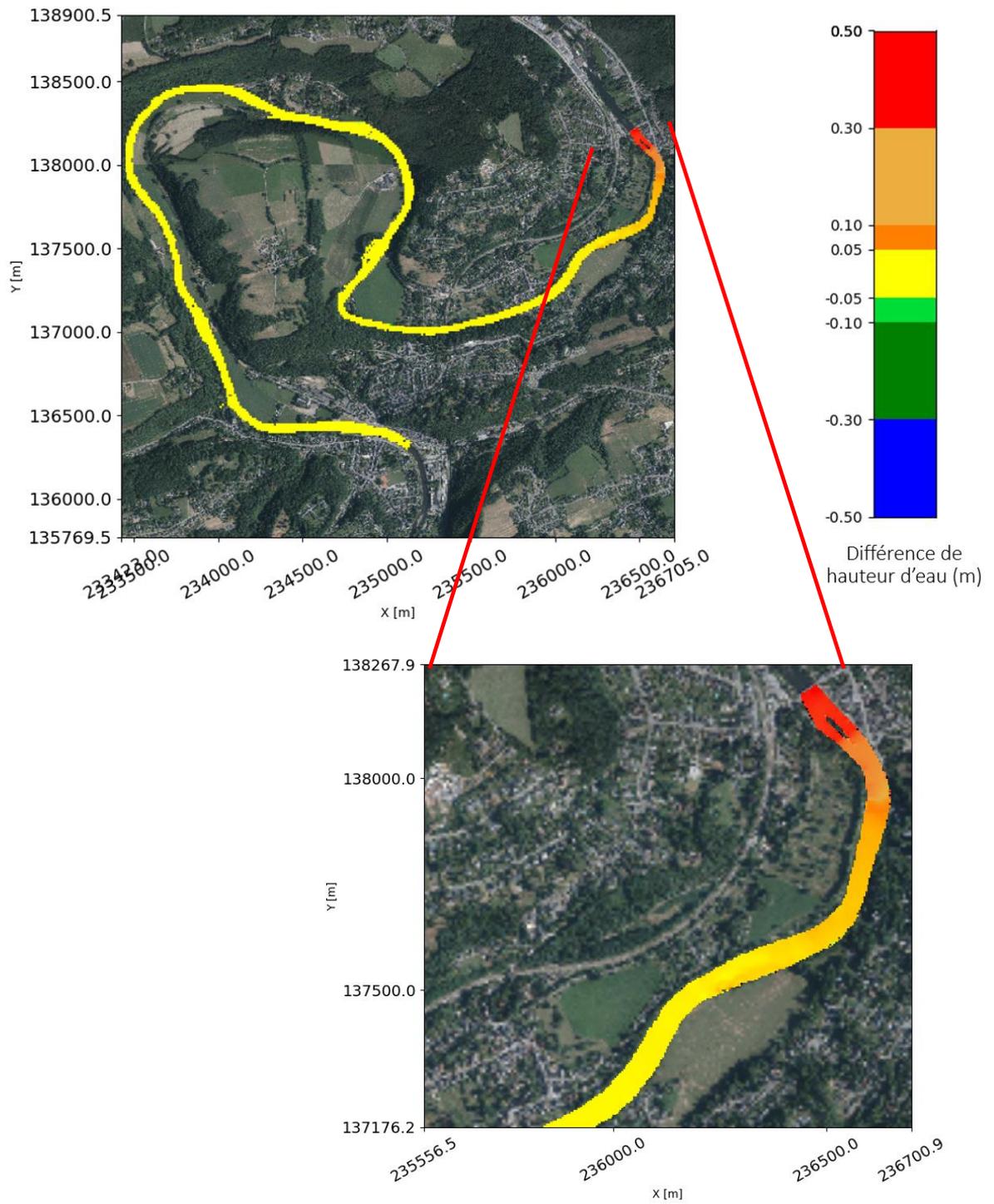


Figure 13. Différence de hauteurs d'eau pour un débit de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  pour un nombre de Froude égal à 0.3 et à 0.4.

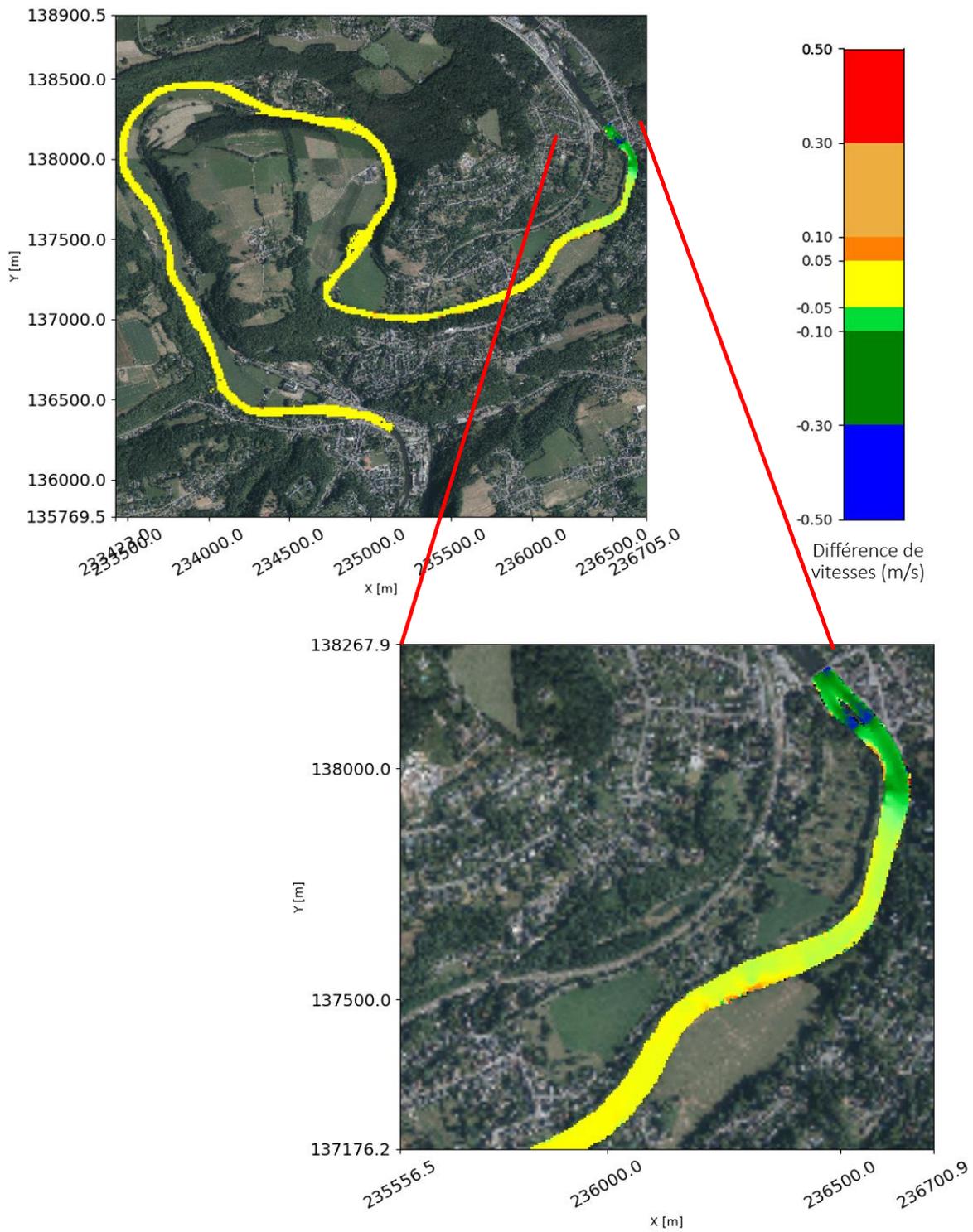


Figure 14. Différence de normes de vitesse pour un débit de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  pour un nombre de Froude égal à 0.3 et à 0.4.

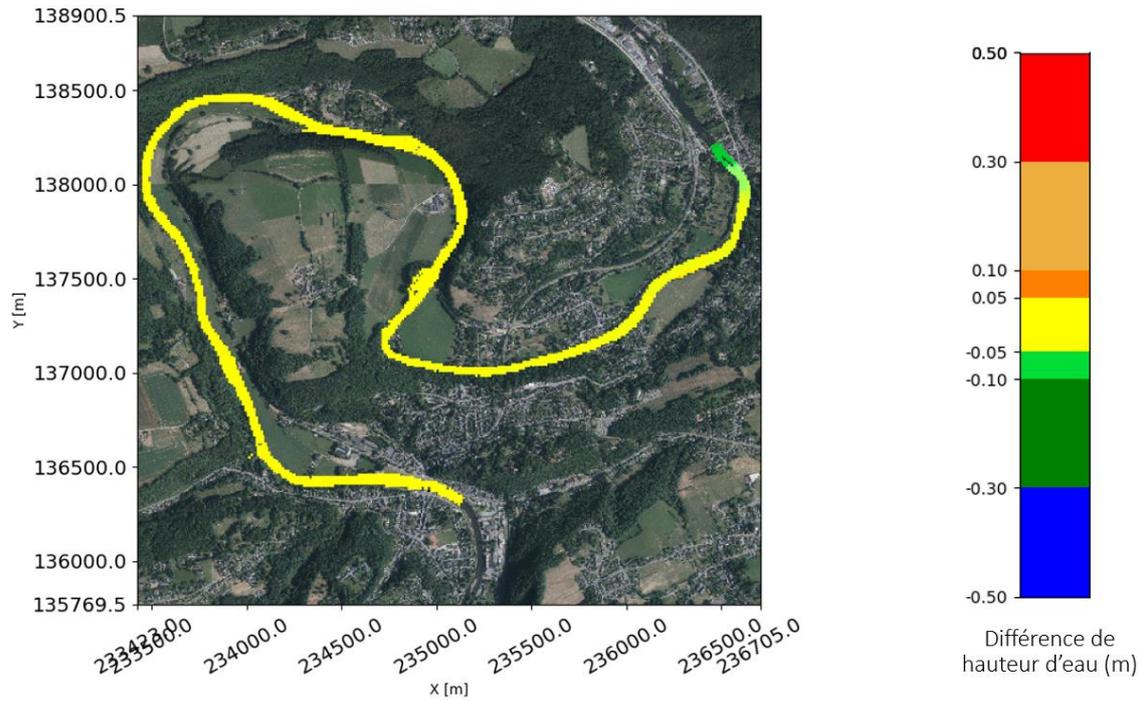


Figure 15. Différence de hauteurs d'eau pour un débit de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  pour un nombre de Froude égal à 0.5 et à 0.4.

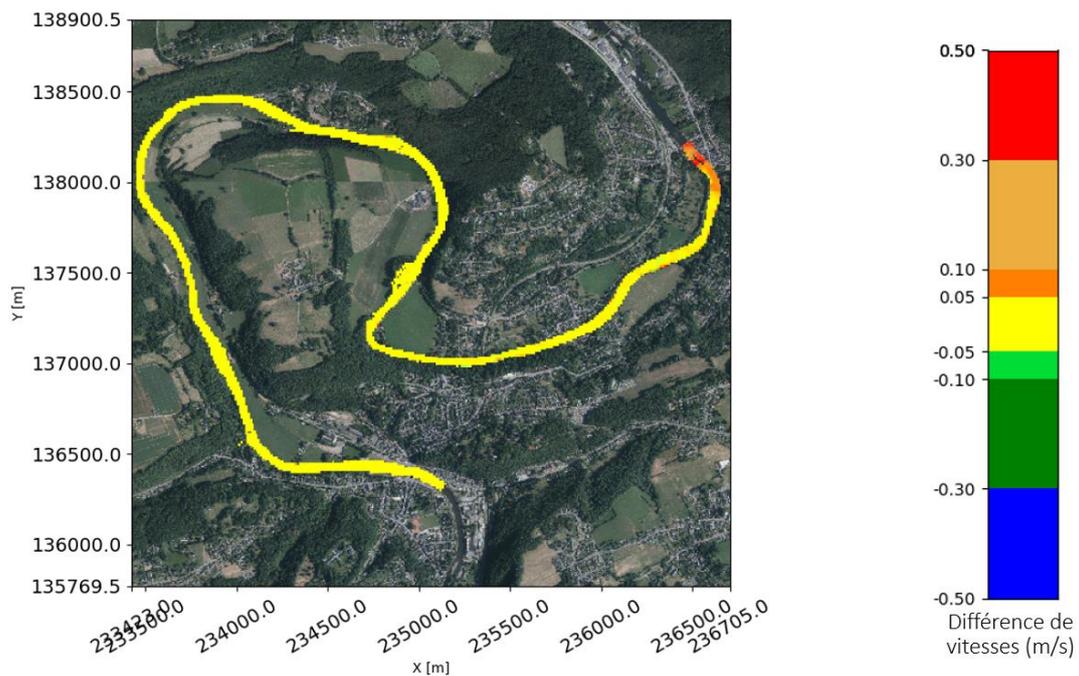


Figure 16. Différence de normes de vitesse pour un débit de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  pour un nombre de Froude égal à 0.5 et à 0.4.

#### 4.3.2. Secteur avant réinjection

##### A. Hauteur d'eau

Dans un premier temps, l'attention sera centrée sur la hauteur d'eau. La Figure 17 présente ainsi les hauteurs d'eau pour les quatre débits simulés. Les différentes grandeurs hydrauliques seront comparées entre les quatre situations sur une région à une échelle plus fine dans le but de mieux observer les variations entre les différentes configurations.

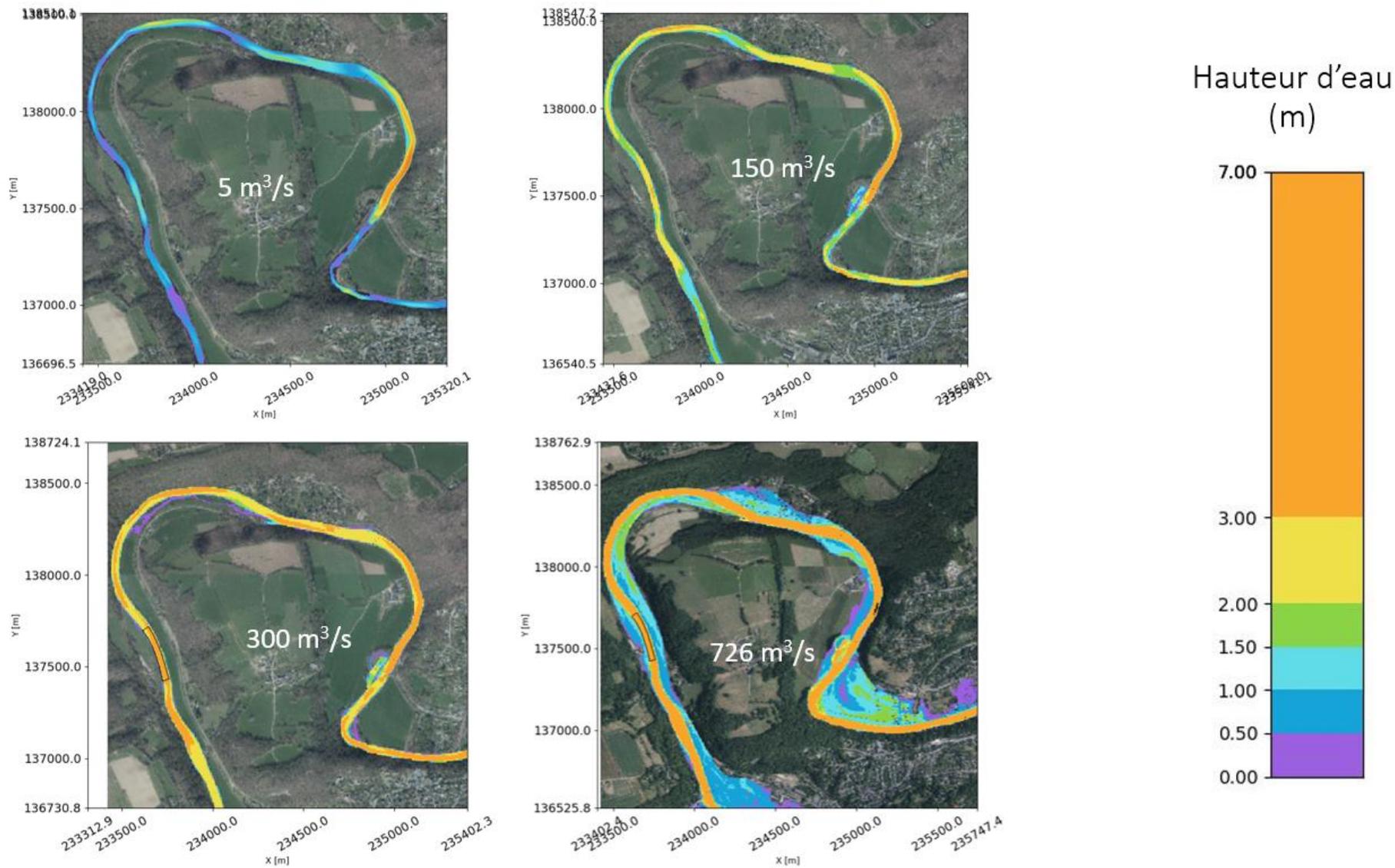


Figure 17. Comparaison des hauteurs d'eau [m] pour les 4 débits simulés (5, 150, 300 & 726 m³/s).

Les hauteurs d'eau augmentent logiquement avec le débit. Pour un débit d'étiage d'environ  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , les hauteurs sont généralement comprises entre 0 et 1 mètre. En revanche, avec un débit d'environ  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ , les hauteurs d'eau varient entre 1 et 3 mètres, parfois dépassant cette valeur. Un débit de crue de l'ordre de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  provoque des débordements notamment au niveau de la boucle du méandre et du déversoir de Hony, avec des hauteurs d'eau dépassant régulièrement les 2 à 3 mètres. Dans toutes les situations, une alternance de hauteurs plus petites et plus grandes est observée, correspondant à la variabilité naturelle du fond du lit. Les Annexes 3, 4, 5 et 6 présentent les hauteurs d'eau pour l'ensemble de la zone pour chaque débit simulé.

Pour comparer les simulations de manière quantitative, l'histogramme des fréquences cumulées a été représenté pour des hauteurs d'eau observées pour une simulation avec un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figure 18). Cette Figure montre que les hauteurs d'eau sont essentiellement comprises entre 2 et 4 m. Cependant, on peut remarquer que la fréquence des hauteurs faibles (proches de 0 m) est importante. Cette augmentation de fréquence est liée à la présence de débordement et d'hauteurs d'eau plus faible que celle présente dans le lit du cours d'eau. Les Annexes 7, 8 et 9 montrent les histogrammes des fréquences d'apparition des hauteurs d'eau pour un débit de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $726 \text{ m}^3/\text{s}$ .

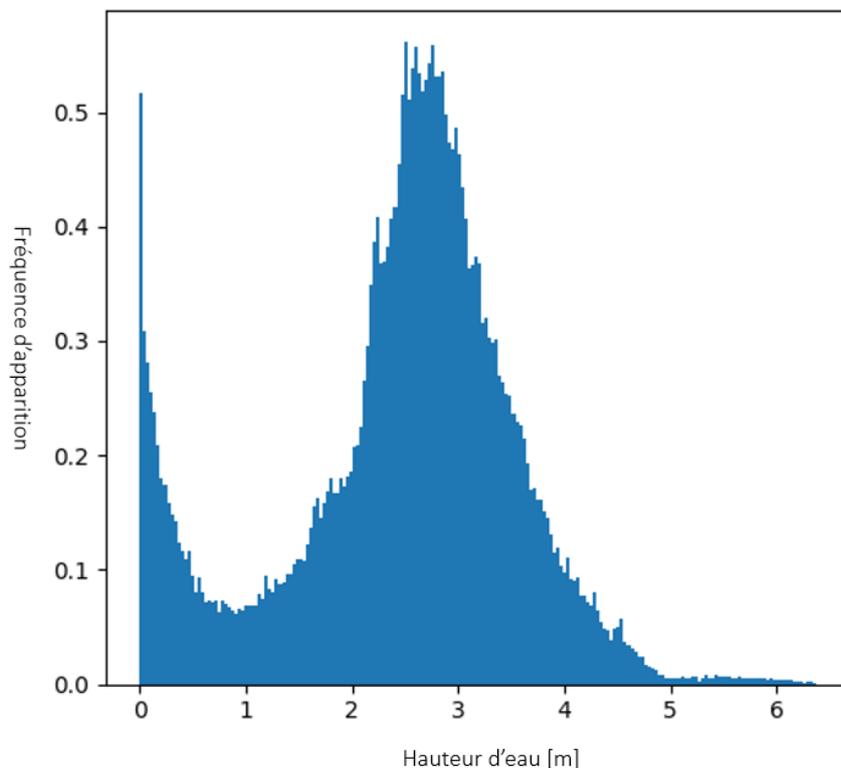


Figure 18. Histogramme des fréquences des hauteurs observées pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### B. Normes de vitesse

Il a également été possible de comparer les normes de vitesse selon les directions x et y de chaque situation hydrologique présentée (Figure 19). Notons qu'il y a un ralentissement visible à l'amont de l'ancien barrage pour des débits de 5 et  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pour les débits supérieurs, l'impact de l'ancien barrage n'est plus visible. Les Annexes 10, 11, 12 et 13 montrent la norme des vitesses pour l'ensemble de la zone pour chaque débit simulé.

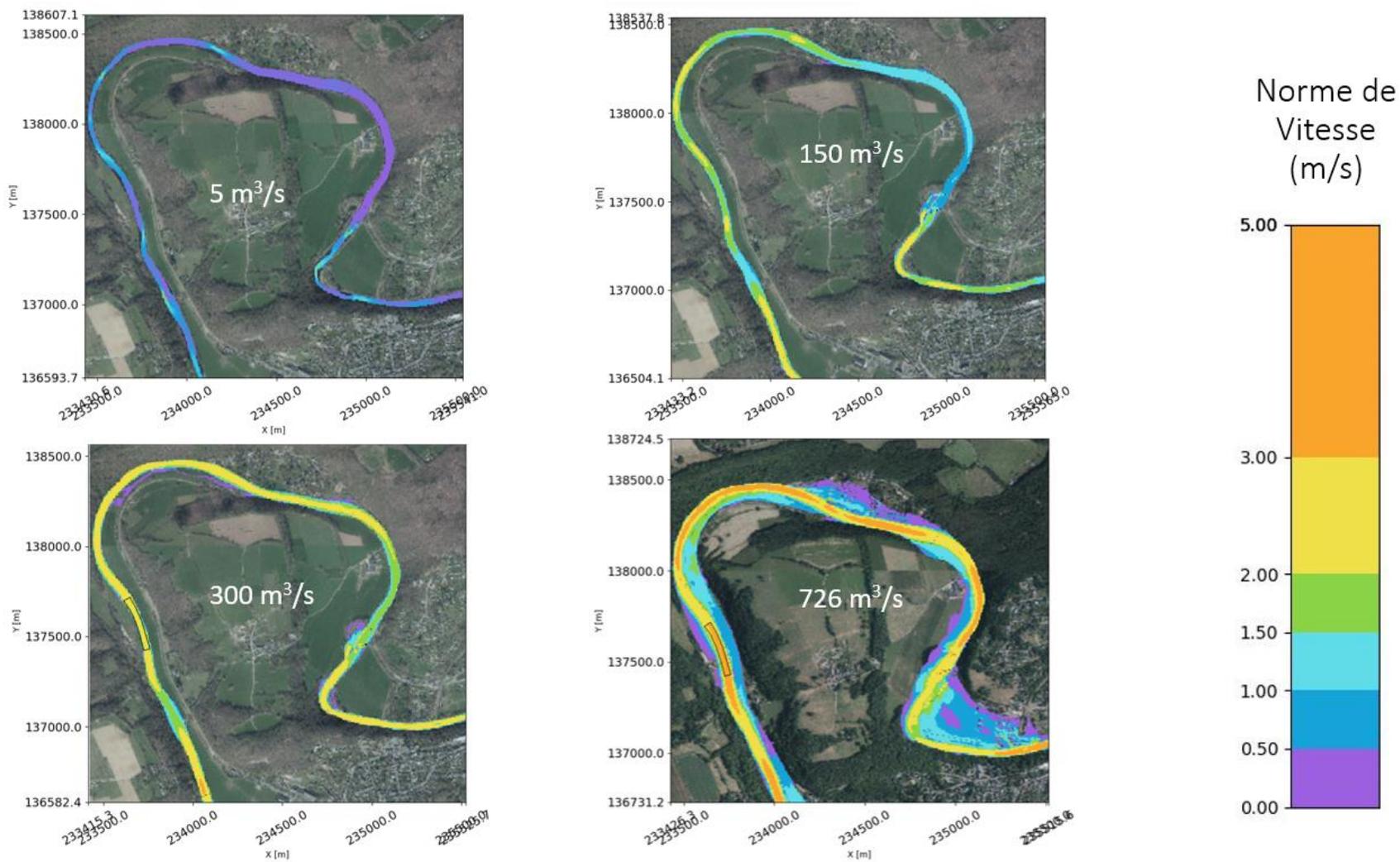


Figure 19. Comparaison des normes de vitesse [m/s] pour les 4 débits simulés (5, 150, 300 & 726 m³/s).

Tout comme les hauteurs d'eau, les normes de vitesse augmentent logiquement avec le débit. Dans toutes les situations, des zones d'accélération et de ralentissement sont observées. Pour un débit de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , les normes de vitesse sont comprises entre 0 et 0,5 m/s. Lorsque le débit atteint  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ , les vitesses peuvent aller jusqu'à 2 m/s, tandis que pour le débit à pleins bord ( $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ), elles peuvent atteindre 3 m/s.

### *C. Nombre de Froude*

La Figure 20 compare le nombre de Froude observé pour les différentes configurations de débit. Les résultats montrent une similitude dans les quatre situations. En effet, dans toutes les situations, le nombre de Froude reste inférieur à l'unité, indiquant un régime d'écoulement infra-critique. Ce nombre varie généralement entre 0 et 0,5, avec parfois des valeurs entre 0,5 et 0,8 dans certaines zones. Les Annexes 14, 15, 16 et 17 montrent les nombres de Froude pour l'ensemble de la zone pour chaque débit simulé.

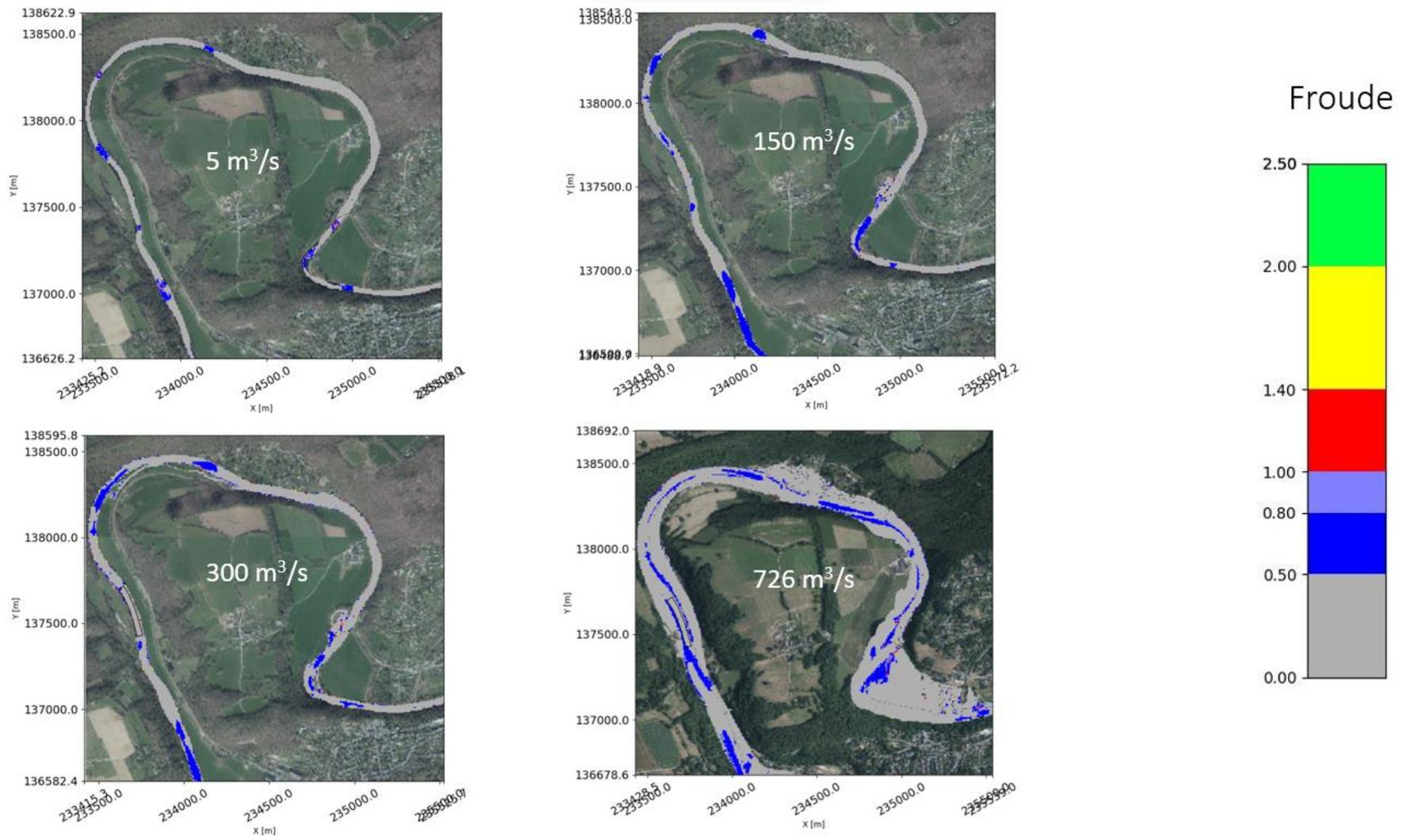


Figure 20. Nombre de Froude observé pour les 4 débits simulés (5, 150, 300 & 726 m³/s).

#### *D. Paramètre de Shields*

Dans les quatre situations examinées, aucune mise en mouvement des particules du fond avec un diamètre critique équivalent au  $D_{50}$  du matériau de fond mesuré sur le terrain (71 mm) n'a été observée. L'absence de déplacement est confirmée par des valeurs du paramètre de Shields restant comprises entre 0 et 0,04 (Dewals, 2024, communication personnelle [cours d'Hydrodynamique fluviale]). Pour explorer davantage cette dynamique, une simulation avec un diamètre inférieur (Figure 21), équivalent au  $D_{16}$ , a été effectuée. Les débits de 150 m<sup>3</sup>/s et 300 m<sup>3</sup>/s montrent des zones de déplacement des galets, avec des valeurs du paramètre de Shields dans l'intervalle [0,04 - 0,06], marquées en bleu foncé. Les Annexes 18, 19, 20 et 21 fournissent une visualisation détaillée du paramètre de Shields pour l'ensemble de la zone dans chaque configuration de débit. Dans la simulation à 726 m<sup>3</sup>/s, des zones en orange indiquent des valeurs du paramètre de Shields dans l'intervalle [0,06 - 0,12], correspondant à des déplacements significatifs des galets. On remarque, que le critère de Shields est plus faible dans le lit du méandre en aval du barrage de Hony pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s que pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s. Cette diminution de mobilité pourrait être due à la présence de débordements minimisant le déplacement. L'échelle utilisée pour analyser la mise en mouvement des sédiments a été choisie pour son intérêt de comparaison avec d'autres sites ou situation. En effet, ces seuils de mise en mouvement ont été établis par le laboratoire HECE de l'Université de Liège. Ainsi, nos valeurs associées aux paramètres de Shields au niveau de la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux pourraient être comparée qualitativement et quantitativement à d'autres études utilisant cette même échelle.

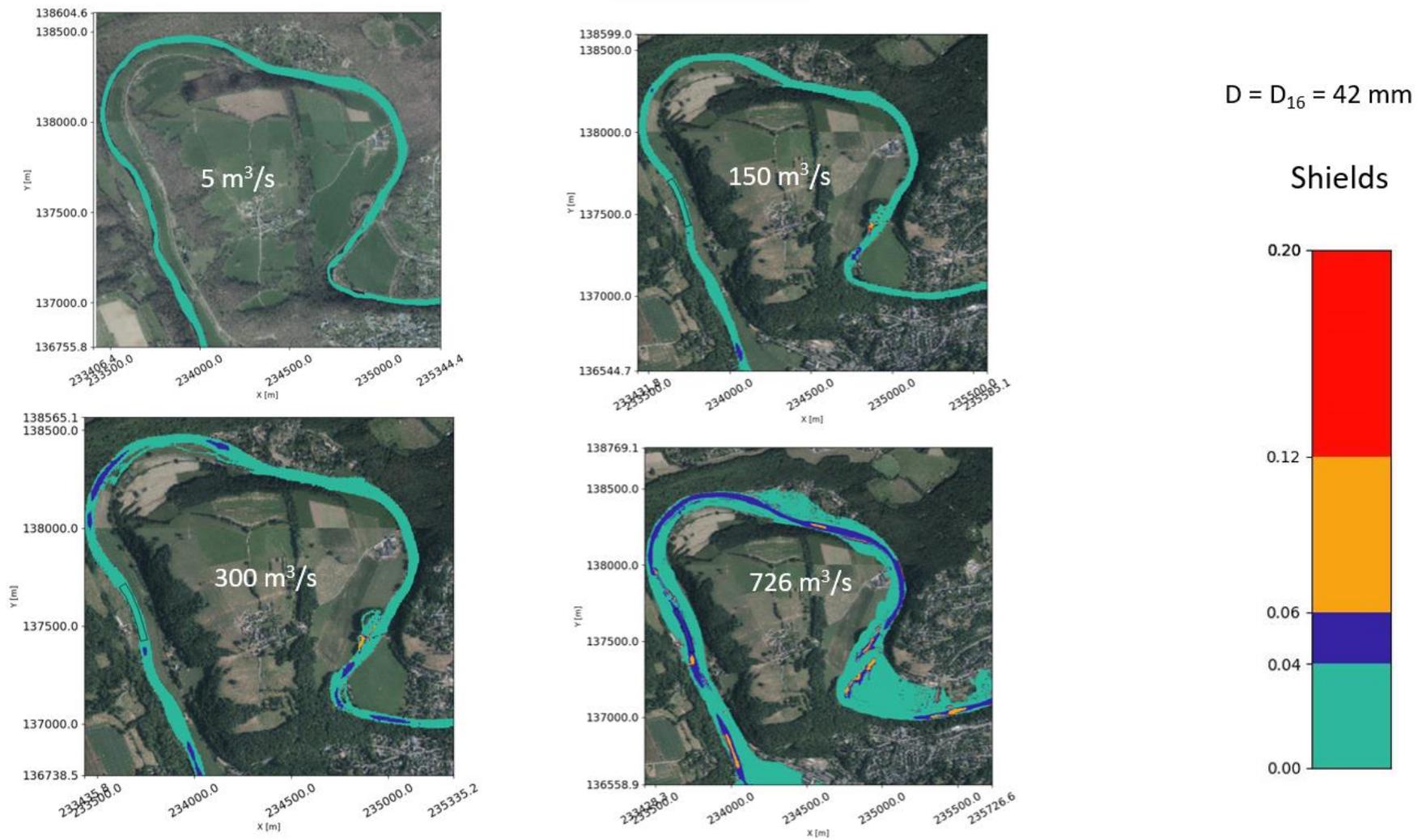


Figure 21. Comparaison des valeurs du paramètre de Shields pour les 4 débits simulés (5, 150, 300 & 726  $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Les histogrammes suivants représentent les fréquences d'apparition des valeurs du paramètre de Shields pour un débit de respectivement 300 m<sup>3</sup>/s et 726 m<sup>3</sup>/s (Figure 22 & 23). Il a été choisi de représenter le paramètre de Shields sous forme d'histogramme pour ces deux débits uniquement puisque ceux – ci présentent des zones d'initiation au mouvement.

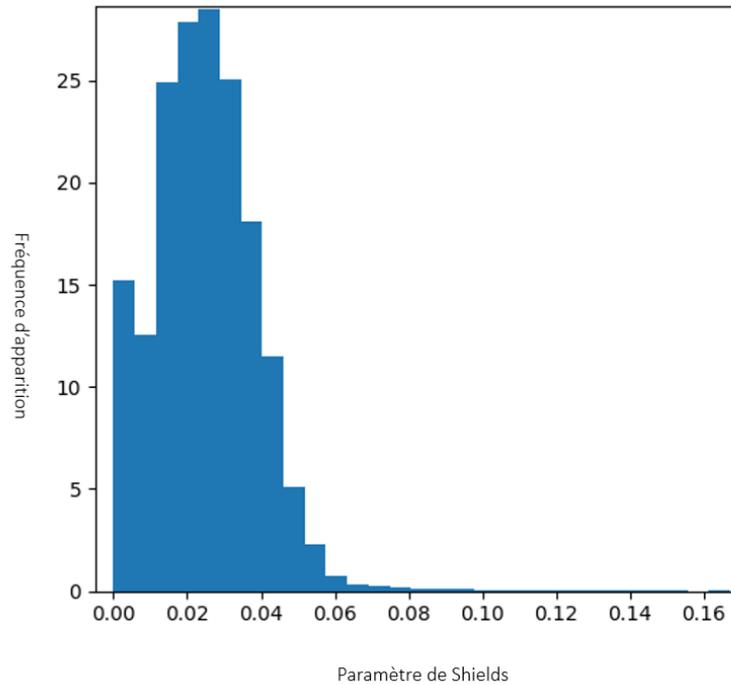


Figure 22. Fréquence d'apparition des valeurs du paramètre de Shields pour une simulation possédant un débit de 300 m<sup>3</sup>/s et un diamètre critique du matériel de fond égal au D<sub>16</sub> (42 mm).

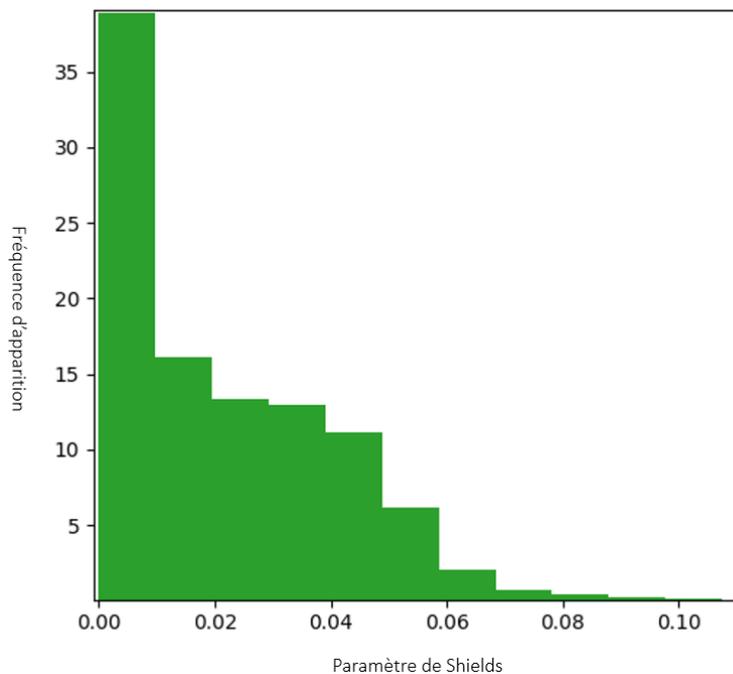


Figure 23. Fréquence d'apparition des valeurs du paramètre de Shields pour une simulation possédant un débit de 726 m<sup>3</sup>/s et un diamètre critique du matériel de fond égal au D<sub>16</sub> (42 mm).

Ces Figures montrent que les valeurs du paramètre de Shields sont majoritairement proches de zéro. Ceci est encore plus marqué lorsque le débit est supérieur au débit à pleins bords comme le débit de 726 m<sup>3</sup>/s. Effectivement, un débit plus élevé entraîne davantage de débordements, ce qui se traduit par des zones où les hauteurs d'eau et les vitesses sont plus faibles, et donc des valeurs inférieures du paramètre de Shields. De plus, il est observable que des débits plus élevés engendrent une fréquence accrue de valeurs plus élevées du paramètre de Shields. En effet, à mesure que le débit augmente, la capacité de mise en mouvement de la charge de fond augmente également. Dans les deux configurations, il est rare de trouver des valeurs de paramètre de Shields dépassant 0,06, cette valeur représentant la limite supérieure standard pour l'initiation du transport sédimentaire (Dewals, 2024, communication personnelle [cours d'Hydrodynamique fluviale]). Par conséquent, on observe peu de zones dans la boucle de l'Ourthe à Esneux où un transport de sédiments de 42 mm de diamètre serait généralisé.

Les Annexes 22 et 23 montrent les histogrammes relatifs aux valeurs respectives de débits de 5 et 150 m<sup>3</sup>/s. Pour ces deux configurations, la majorité des valeurs se trouvent sous une valeur de Shields de 0.04 équivalent au seuil sous lequel aucun mouvement n'est observé.

#### 4.3.3. Allure théorique de la ligne d'eau

Dans l'ensemble des configurations, de manière générale, le nombre de Froude est inférieure à l'unité et induit un écoulement infracritique. Sur base de cette configuration, il est possible de prédire l'évolution théorique de la ligne d'eau lorsque la topographie sera modifiée par l'ajout de galets. La Figure 24 exprime l'allure de la ligne d'eau lorsqu'un obstacle est présent sur le fond.

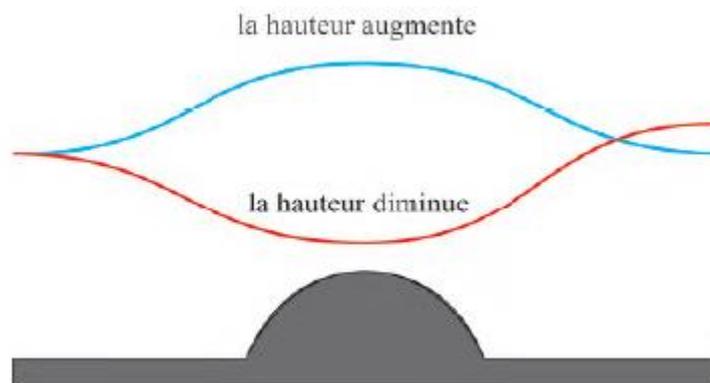


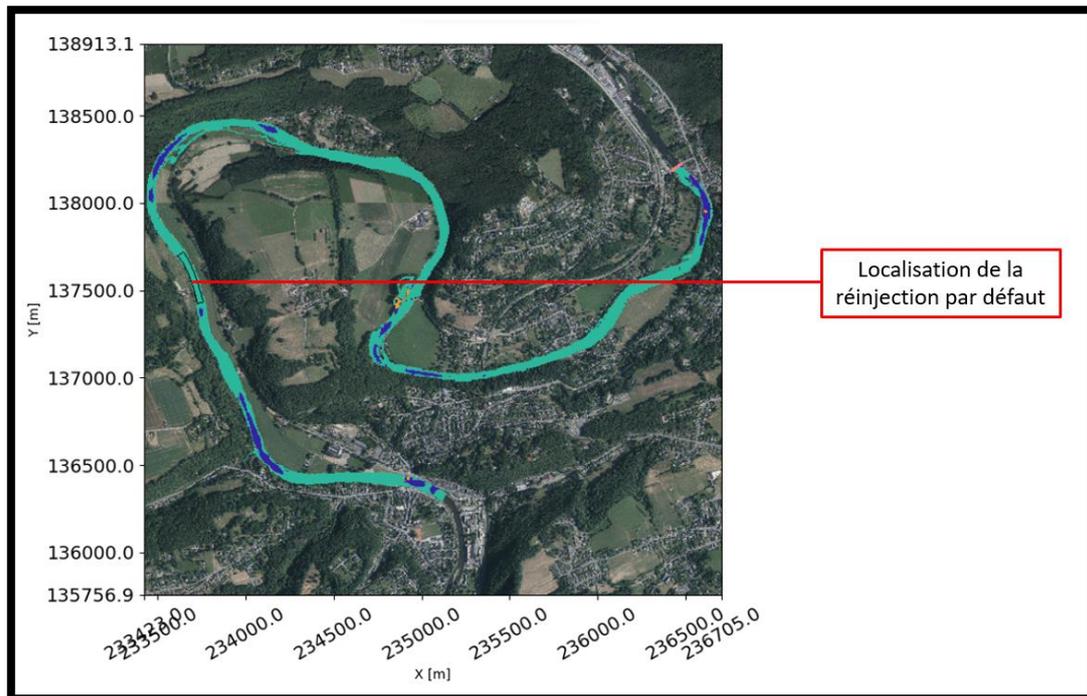
Figure 24. Forme de la surface libre d'écoulement d'eau au-dessus d'un obstacle (Ancy, s.d.)

Cette Figure présente en bleu la configuration d'un écoulement supercritique ( $Fr > 1$ ) et en rouge la configuration d'un écoulement infracritique ( $Fr < 1$ ). Lorsque que l'écoulement est infracritique, il présente peu d'énergie cinétique dès lors il y aura une conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique et la hauteur d'eau aura tendance à diminuer lors de la présence d'un obstacle. L'inverse est observé pour un écoulement supercritique. En effet, ce type d'écoulement possède une grande énergie cinétique qui pourra être convertie en énergie potentielle et donc augmenter la hauteur. En résumé, l'allure de la courbe de remous est fonction du nombre de Froude. Celle – ci présente un minimum lorsque le nombre de Froude est inférieur à l'unité et un maximum lorsque le nombre de Froude est supérieur à l'unité (Piroton, 2023, communication personnelle [cours écoulement à surface libre]).

## 4.4. Réinjection de galets

Au sein de cette partie de l'analyse, nous expliquerons la méthodologie réalisée pour répondre à certaines hypothèses concernant la configuration de la réinjection. Les différentes simulations proposées peuvent varier en termes de quantité (débit, volume, ...) ou en termes de localisation de la réinjection. L'objectif est de déterminer l'impact de variation de chaque paramètre sur la mise en mouvement des galets à l'aide du paramètre de Shields et sur l'élévation de la ligne d'eau. Chaque simulation sera également évaluée pour le débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$  dans le but de voir l'impact des réinjections sur la ligne d'eau lors d'une crue de récurrence de 25 ans. L'injection de galets peut être réalisée à l'aide de l'interface WOLF en considérant que le volume injecté correspond à une surélévation de la topographie. Ainsi les simulations possèdent une vision macroscopique de la réinjection de galets en considérant l'ensemble des galets comme un volume possédant en tout point les mêmes propriétés. La vision la plus fine possible est la cellule soit un pixel de 2 m sur 2 m. Il n'est pas possible à cette échelle d'analyser les caractéristiques microscopiques par exemple à l'échelle du galet.

La localisation de la réinjection est fixée dans l'axe rectiligne du cours d'eau par défaut (Figure 25) et sera modifiée uniquement dans le point 4.4.2 (Localisation de la réinjection) où d'autres localisations seront testées. Cette localisation a été choisie comme référence car elle présente une absence de mouvement et qu'elle se trouve dans l'axe rectiligne du chenal pouvant potentiellement permettre une initiation au mouvement favorisé. De plus, elle possède également un avantage pratique puisqu'elle se trouve au sein d'une prairie accessible pour des camions qui déverseraient les galets curés à Esneux. Il s'agit également d'un site éloigné des habitations.



### 4.4.1. Diamètre des galets injectés

Cette simulation tentera de répondre à la question de l'impact de la variation du diamètre des galets injectés sur la mise en mouvement de la charge de fond et l'élévation de la ligne d'eau. Pour répondre à

cette question, différents diamètres de galets seront testés en fixant le débit, le nombre de Froude, le volume et la localisation des galets. À partir d'un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , où un déplacement semble être initié pour des galets d'un diamètre équivalent au  $D_{16}$ , trois réinjections identiques sur l'ensemble de leurs paramètres - à l'exception du diamètre des galets - seront testées. Le volume de la réinjection sera choisi arbitrairement pour être égale à la quantité charriée par l'Ourthe en un an. Selon Houbrechts *et al.* (2006), l'Ourthe inférieure charriait  $0.53 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$  à Sauheid et posséderait un bassin versant de  $2803 \text{ km}^2$  à Esneux. Une valeur plus importante de charriage de  $1.13 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$  a été observée pour la crue de 1993 (Eme *et al.*, 2022). Ainsi en multipliant cette valeur de quantité charriée par le bassin versant de l'Ourthe à Esneux et en divisant par la masse volumique des galets ( $1.6 \text{ tonnes}/\text{m}^3$ ), il est possible de déterminer le volume annuel de galet charrié. Celui - ci sera approximé à  $2500 \text{ m}^3$ . De plus, la hauteur de la réinjection est fixée à  $0.25 \text{ m}$ . Dès lors, la surface de la réinjection sera équivalente à un rectangle de  $10\,000 \text{ m}^2$ . En connaissant, la superficie d'une maille ( $2 \times 2$ ), il est possible de déterminer que la zone choisie doit comporter 2500 mailles. Comme l'objectif étant de faciliter le déplacement des galets, l'aire de réinjection sera concentrée dans le chenal principale où les vitesses sont plus importantes. Sur base de ces conditions imposées, trois simulations découleront avec un diamètre équivalent au  $D_{10}$ ,  $D_{16}$  et  $D_{50}$  (Figure 3). L'impact de la modification du diamètre du matériel de fond sera également analysé pour un débit d'une crue de récurrence de 25 ans pour envisager le risque d'inondation.

#### 4.4.2. Débit lors de la réinjection

Cette deuxième série de simulation a pour intérêt de tester l'influence du débit sur la mise en mouvement des sédiments et sur l'élévation de la ligne d'eau. Pour y parvenir, trois configurations identiques seront testées avec un volume correspondant au charriage annuel ( $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) dont la surface au sol est de  $10\,000 \text{ m}^2$  et la hauteur de  $0.25 \text{ m}$ , avec un diamètre des particules équivalent au  $D_{16}$  et localisée dans le chenal principal. La seule différence est le débit lors de la réinjection. Selon Houbrechts *et al.* (2006), le débit morphogène de l'Ourthe à Sauheid est de  $230 \text{ m}^3/\text{s}$  estimée sur base de marquage colorimétrique des galets. Ainsi, sur base de ces paramètres, trois simulations ont été réalisées avec respectivement un débit inférieur au débit morphogène ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ), un débit supérieur au débit morphogène et équivalent au débit à pleins bord ( $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et un débit équivalent à une crue d'une récurrence de 25 ans ( $726 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

#### 4.4.3. Volume de la réinjection

Cette simulation aura pour objectif de répondre à la question : « Quel est l'impact de la quantité de galets injectés sur la mise en mouvement de la charge de fond et l'élévation de la ligne d'eau ». Ainsi à partir de conditions identiques, deux réinjections seront simulées en modifiant uniquement le volume injecté. Le débit sera identique et fixé à  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , le diamètre des galets est fixé au  $D_{16}$ , les galets sont injectés sur une superficie de  $10\,000 \text{ m}^2$  dans le chenal principal. Ainsi le seul paramètre variant est la hauteur de la réinjection. Deux configurations seront testées. Dans un premier temps, un volume équivalent au charriage annuel soit environ  $2500 \text{ m}^3$  avec une hauteur de  $0.25 \text{ m}$ . Deuxièmement, un volume correspondant à la moitié du charriage annuel soit  $1250 \text{ m}^3$  avec une hauteur de  $0.125 \text{ m}$ . Cette modification de volume sera également analysée pour un débit équivalent à une crue de récurrence de 25 ans pour analyser l'impact sur le risque d'inondation.

#### 4.4.4. Localisation de la réinjection

La quatrième simulation a pour objectif de répondre à la question : « quelle est l'influence du positionnement de la réinjection dans la rivière sur la mise en mouvement des sédiments et sur l'élévation de la ligne d'eau ». Pour un volume équivalent au charriage annuel ( $2500 \text{ m}^3$ ) dont la surface

au sol est de 10 000 m<sup>2</sup> et la hauteur de 0.25 m, avec un diamètre des particules équivalent au D<sub>16</sub> et localisée dans le chenal principal pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s, l'objectif est de déterminer si la position dans la rivière a une importance.

Dans un premier temps, il est question de tester deux configurations, l'une lorsque la réinjection s'effectue dans une boucle de méandre et l'autre lorsqu'elle s'effectue dans une portion rectiligne du chenal (Figure 26).

Dans un second temps, il sera question de tester l'importance du paramètre de Shields initial avant la réinjection. Ainsi, deux configurations seront testées, l'une lorsque la simulation est effectuée sur une zone présentant une valeur de Shields indiquant la mise en mouvement et l'autre où la zone semble posséder une valeur du paramètre de Shields n'entraînant aucune mise en mouvement.

Tout comme les simulations précédentes, ces simulations seront également analysées pour le débit d'une crue de récurrence de 25 ans pour évaluer le risque d'inondation.

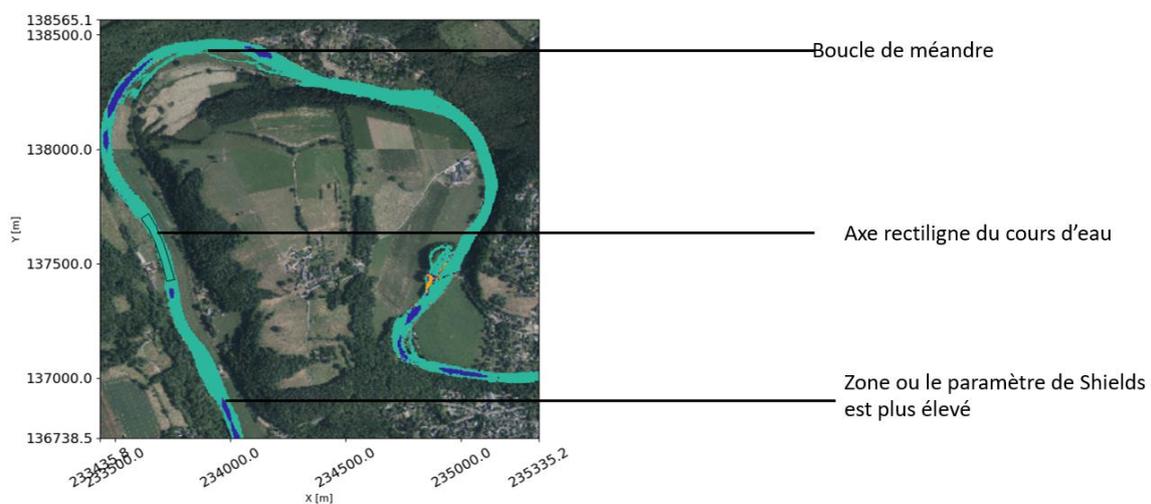


Figure 26. Localisation possible de réinjection

#### 4.4.5. Style de la réinjection

La dernière série de simulations cherche à répondre à la question : « Est-ce que la manière dont la topographie a été surélevée numériquement a un impact sur la mise en mouvement de la charge de fond et l'élévation de la ligne d'eau ? ». Cette simulation est assez théorique puisqu'elle ne possède pas de réel équivalent dans une réinjection de terrain. En effet, en pratique la réinjection se fait à l'échelle du galet. L'intérêt de cette simulation est de comparer les deux styles de réinjection et d'analyser les différences entre les deux manières de réinjecter.

Pour ce faire, à partir d'un volume équivalent au charriage annuel (2500 m<sup>3</sup>) dont la surface au sol est de 10 000 m<sup>2</sup>, d'un diamètre des particules équivalent au D<sub>16</sub> et d'une localisation se trouvant au sein du chenal principal pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s, deux manières de modifier la topographie ont été simulées (Figure 27).

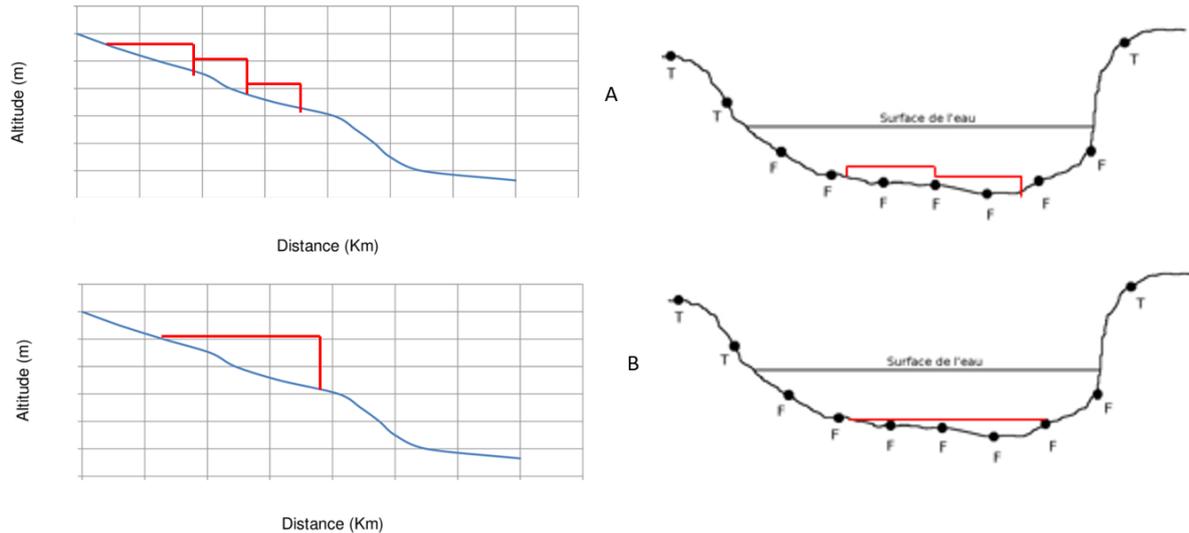


Figure 27. Configuration d'élévation de la topographie visualisation du profil en long (à gauche) et du profil en travers (à droite).

La première configuration permet de simuler une réinjection de manière à ce que la topographie soit élevée avec une hauteur identique sur chaque pixel (0.25 m). Celle-ci sera appelée réinjection à hauteur constante dans la suite du mémoire.

La seconde configuration, quant à elle, serait qualifiée de réinjection à altitude constante. En effet, il s'agirait d'élever la topographie pour que l'altitude de la topographie rehaussée soit identique dans l'ensemble de la section en travers et en long. De manière pratique, l'élévation de la réinjection ne serait pas identique pour chaque pixel de la section mais serait fonction de l'élévation initiale du fond du lit. Cette altitude est de 80.15 [m] avec une erreur de 3%. Cette valeur a pu être calculée sur base d'une routine python.

Les deux configurations sont très théoriques car il semble difficilement imaginable que les galets se maintiennent dans ces positions sans se laisser tomber sur les côtés.

## 5. Résultats

### 5.1. Diamètre des galets injectés

#### A. Paramètre de Shields

Dans ce premier test, nous nous concentrerons sur la variation du diamètre des galets injectés et son impact sur leur déplacement. Comme décrit dans la méthodologie, le seul paramètre variable sera le diamètre des galets. En effet, pour chaque simulation, le débit, le volume, la localisation et le type de réinjection resteront constants et seront imposés. Deux débits seront testés pour examiner à la fois la situation à pleins bords et celle avec une inondation ayant une période de récurrence de 25 ans.

La Figure 28 illustre le paramètre de Shields pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s. On peut facilement observer que plus les galets injectés ont un diamètre élevé, plus ils ont tendance à être difficilement transportables. En effet, à mesure que le diamètre augmente, le domaine présente une uniformité dans les valeurs du paramètre de Shields, ce qui se traduit par une absence de mouvement.

L'Annexe 24 présente la comparaison des valeurs du paramètre de Shields en fonction du diamètre des particules injectées pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s. Comme pour la simulation avec un débit de 300 m<sup>3</sup>/s

imposé, on observe que plus les galets ont un diamètre faible, plus ils sont susceptibles d'être déplacés. Le débit influence également la capacité à mettre en mouvement les galets dans le chenal. De fait, pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$ , on observe davantage de zones d'initiation aux mouvements ainsi que des zones où les galets peuvent être transportés (valeurs comprises entre 0.06 et 0.12). Les galets, ayant un diamètre équivalent au  $D_{50}$  des galets prélevés sur l'Ourthe à Esneux, ne semblent pas être mis en mouvement même lorsque le débit atteint  $726 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondant à une inondation d'une récurrence de 25 ans. Il n'est pas possible d'analyser l'impact de la variation du diamètre des galets injectés sur la variation de la hauteur d'eau. En effet, puisque la réinjection numérique des galets se traduit par une surélévation générale de la topographie, il n'est pas possible de fixer ce paramètre uniquement pour la zone où a lieu la réinjection. Ainsi, il est uniquement possible d'observer, dans des conditions fixées, comment la valeur du paramètre de Shields évolue pour des galets d'un diamètre critique fixé.

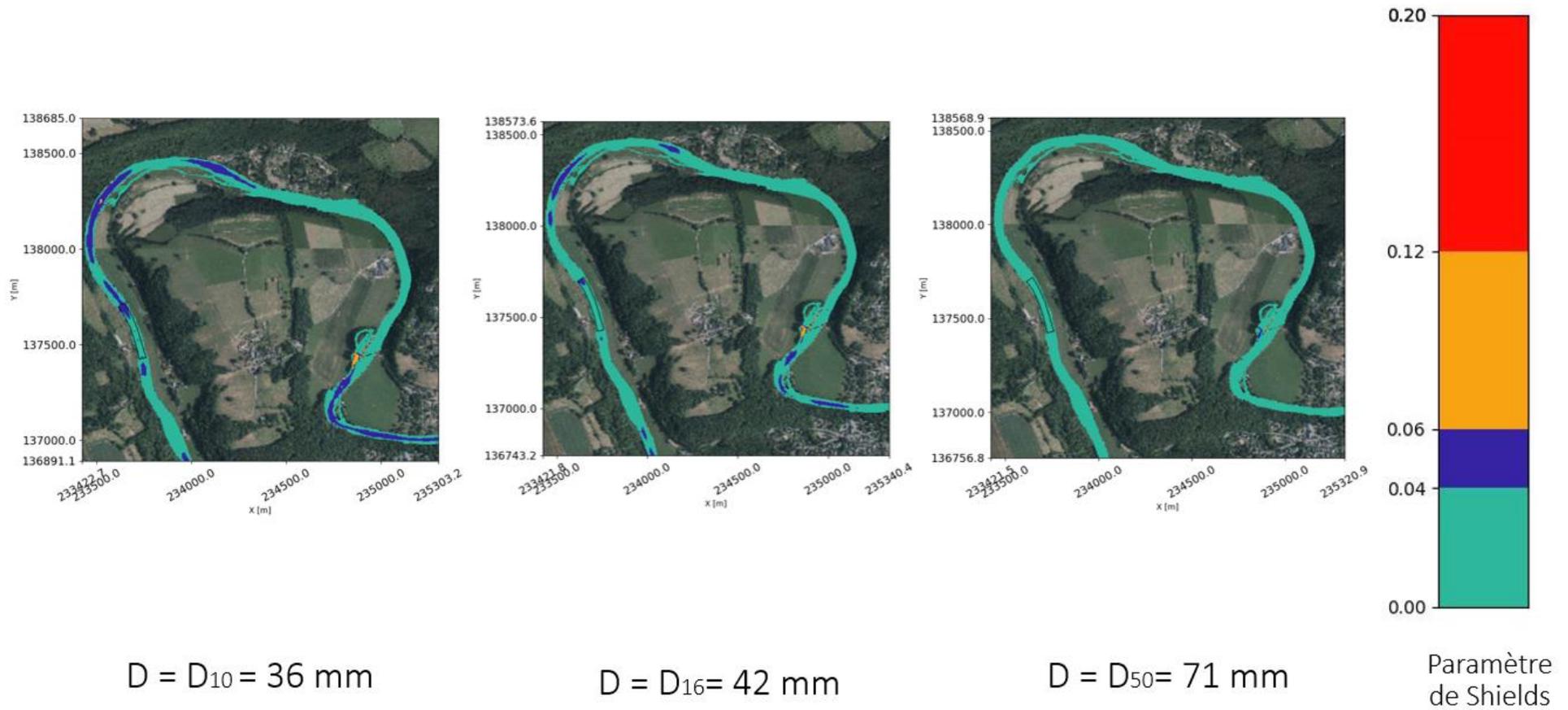


Figure 28. Comparaison des valeurs du paramètre de Shields en fonction du diamètre critique pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 5.2. Débit lors de la réinjection

Au travers de cette partie, le paramètre analysé sera le débit. Ainsi, les situations avant et après la réinjection de galets seront comparées pour chaque débit étudié en termes de variation de l'altitude de la surface libre, des normes de vitesse et de la valeur du paramètre de Shields. Comme expliqué précédemment dans la méthodologie, les autres paramètres sont identiques dans l'ensemble des configurations (diamètre des galets, style, localisation et volume de la réinjection).

### 5.2.1. 150 m<sup>3</sup>/s

#### A. *Altitude de surface libre*

La Figure 29 illustre les variations d'altitude de la surface libre avant et après la réinjection de galets pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/s. Elle représente la différence entre la situation post-réinjection et la situation pré-réinjection. Cette figure révèle une augmentation de l'altitude de la surface libre au niveau de la zone de réinjection, ainsi qu'en amont de celle-ci. Cette augmentation diminue progressivement à mesure que l'on se rapproche de l'amont du domaine. De fait, l'élévation de la ligne d'eau varie entre 0,5 et 1 m au niveau de la zone de réinjection, pour se stabiliser autour de 30 cm en amont du domaine.

L'Annexe 25 présente les différences de hauteurs d'eau entre la situation post-réinjection et la situation pré-réinjection pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/s. Cette figure révèle une augmentation locale de la hauteur d'eau pouvant atteindre 1 m en amont, là où la topographie a été modifiée, et une diminution d'environ 0,5 m au niveau de la zone de réinjection. En aval de la zone de réinjection, les variations de hauteur d'eau semblent être peu significatives. Une légère diminution d'environ 30 cm est cependant observée juste en aval de la zone de réinjection.

L'Annexe 26 représente la différence de normes de vitesse entre la situation après réinjection et la situation avant réinjection pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/s. Cette figure montre un ralentissement des vitesses après réinjection en amont de la réinjection. On constate une alternance de zones avec un ralentissement de l'ordre de 0.3 m/s et de zones avec des ralentissements de l'ordre de 0.5 m/s. Ce ralentissement est corrélé avec l'augmentation des hauteurs. Une élévation des vitesses comprises entre 0.1 et 0.3 m/s est visible au niveau de la réinjection. Pour le reste de la zone d'étude, aucune incidence significative sur les vitesses n'est observée suite à l'élévation de la topographie.

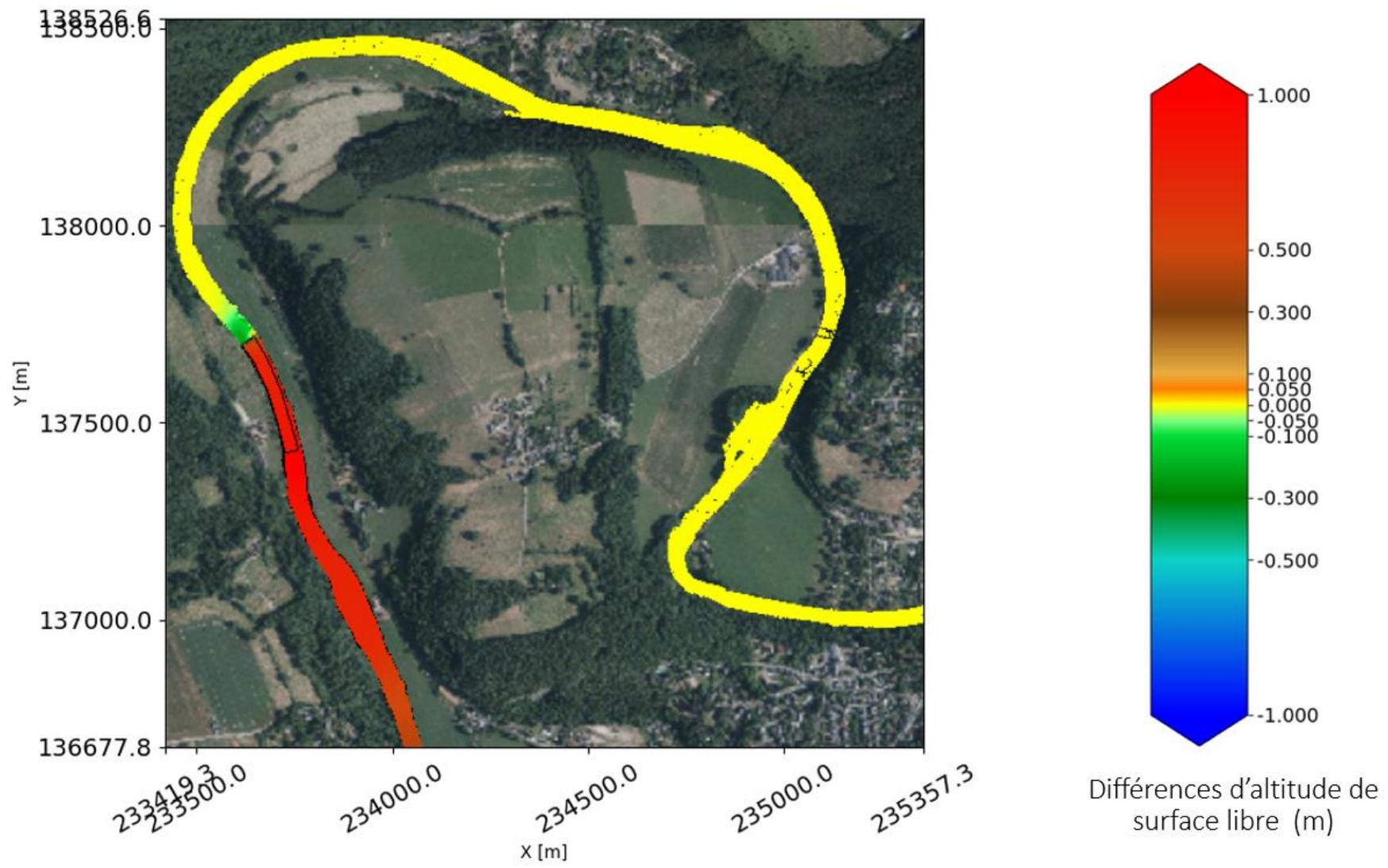


Figure 29. Comparaison des altitudes de surface libre avant/après réinjection pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/s.

### B. Paramètre de Shields

Enfin, la comparaison des variations des valeurs du paramètre de Shields révèle l'émergence de valeurs plus élevées en aval de la zone de réinjection. Ces valeurs se situent principalement dans l'intervalle [0.04 - 0.06], indiquant une initiation au déplacement. Toutefois, certains pixels affichent des valeurs dans les intervalles supérieurs [0.06 - 0.12] et [0.12 - 0.20], suggérant une mise en mouvement et un déplacement significatif des galets (Figure 30).

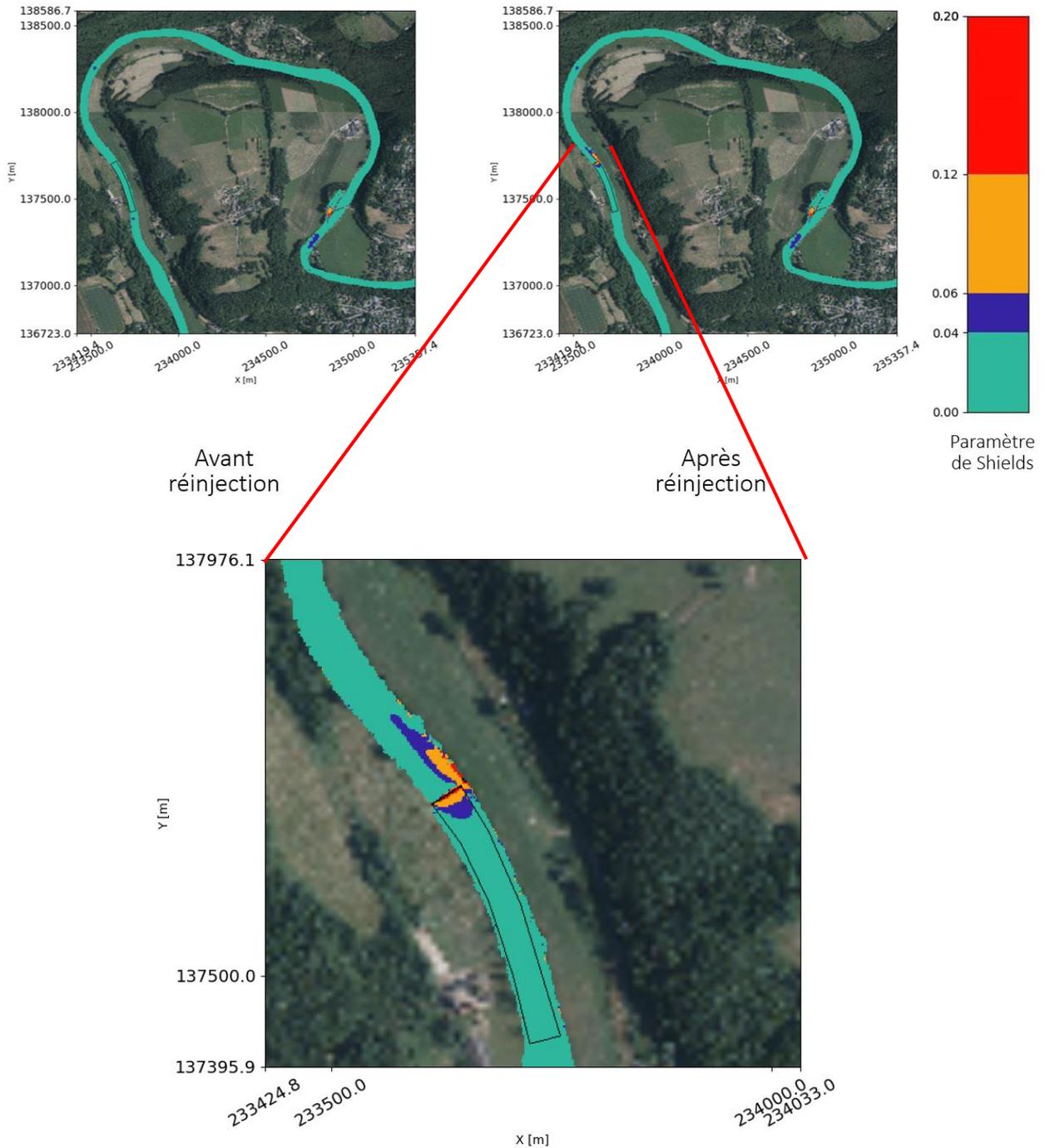


Figure 30. Comparaison de la norme des valeurs du paramètre de Shields avant/après réinjection pour un débit de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 5.2.2. 300 m<sup>3</sup>/s

Ces comparaisons entre les situations avant/après réinjection ont pu être effectuées de manière analogue pour un débit imposé de 300 m<sup>3</sup>/s.

#### A. *Altitude de surface libre*

La Figure 31 illustre les variations d'altitude de la surface libre avant et après la réinjection de galets pour un débit imposé de 300 m<sup>3</sup>/s. Elle représente la différence entre la situation postérieure à la réinjection et la situation antérieure. Cette figure révèle une légère augmentation de l'altitude de la surface libre en amont de la zone de réinjection, de l'ordre de 0,05 m, tandis qu'une diminution similaire est observée au niveau de la partie aval de la réinjection. Cette légère augmentation persiste en amont du domaine, sans dépasser les 0,05 m.

L'Annexe 27 présente les différences de hauteurs entre la situation avant et après la réinjection. On remarque une diminution de la hauteur d'eau allant jusqu'à 0,30 m dans la zone de réinjection. En revanche, en amont de cette zone, la hauteur d'eau semble légèrement augmenter, sans excéder 0,10 m.

Il est également instructif d'examiner la variation de vitesse avant et après la réinjection. L'Annexe 28 illustre les différences de normes de vitesse entre la situation avant et après la réinjection. On observe une augmentation de la norme des vitesses atteignant jusqu'à 0,50 m/s dans la zone de réinjection. En revanche, en amont de cette zone, la norme des vitesses semble légèrement diminuer, jusqu'à 0,10 m/s, avec quelques zones présentant une diminution plus modérée, de l'ordre de 0,05 m/s.



Figure 31. Différences d'altitudes de surface libre avant/après réinjection pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$

### B. Paramètre de Shields

La dernière comparaison intéressante à réaliser est la variation du paramètre de Shields : peu de changements sont observables entre les deux situations, à l'exception, de l'apparition d'une zone bleu foncé (avec des valeurs comprises dans l'intervalle  $[0.04 - 0.06]$ ) juste en aval de la réinjection. Cette zone semble ainsi plus propice à l'initiation du mouvement des galets (Figure 32).

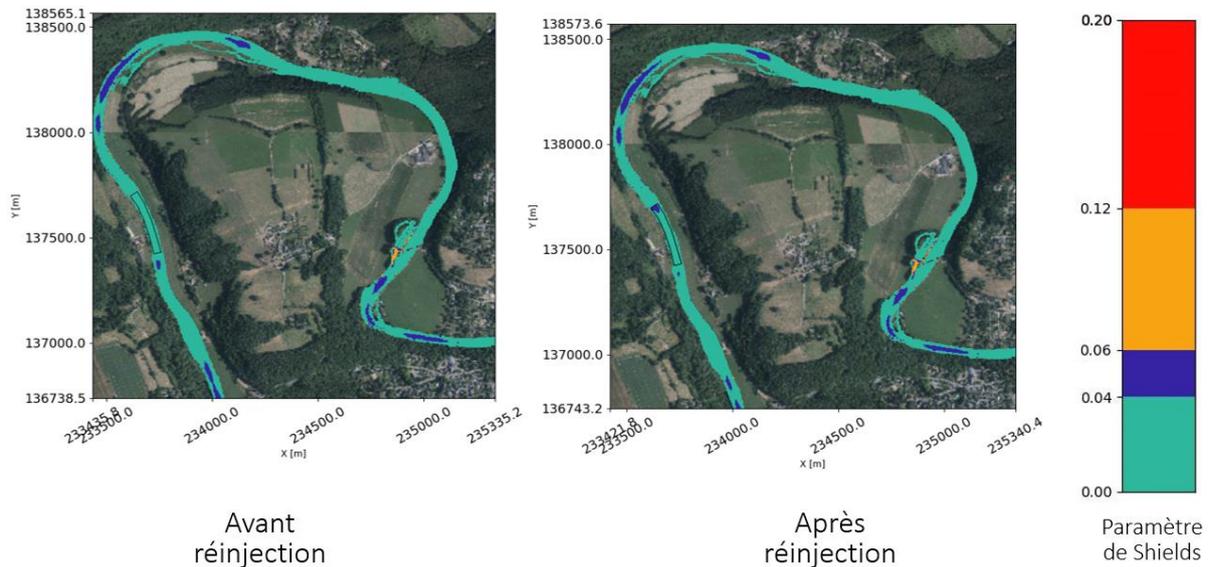


Figure 32. Comparaison de la norme des valeurs du paramètre de Shields avant/après réinjection pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 5.2.3. $726 \text{ m}^3/\text{s}$

En dernier lieu, comparons les situations avant et après la réinjection pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$ , équivalent à une crue de récurrence de 25 ans.

##### A. Altitude de surface libre

La Figure 33 présente les variations d'altitude de la surface libre avant et après la réinjection de galets pour ce débit spécifique. Elle met en évidence la différence entre la situation postérieure à la réinjection et la situation antérieure. Cette représentation graphique révèle une légère augmentation de l'altitude de la surface libre en amont de la zone de réinjection, atteignant environ  $0,05 \text{ m}$  maximum. Peu de diminution est observable, et le reste du domaine semble ne pas subir de variation notable de la ligne d'eau.

L'Annexe 29 présente les différences de hauteur entre la situation avant et après réinjection. Comme pour les deux débits précédents, une diminution de la hauteur d'eau d'environ  $0,30 \text{ m}$  est observée dans la zone de réinjection. Par contre, une élévation de la hauteur d'eau atteignant au maximum  $0,05 \text{ m}$  est observée en amont de la réinjection. Cette élévation est cependant plus diffuse que pour les débits précédents en raison de la présence de débordements. Le reste du domaine observé présente peu de variation, se rapprochant de  $0 \text{ m}$ . Aucun débordement supplémentaire n'est observé puisque la différence de hauteur est égale à zéro au niveau des débordements.

Il est également pertinent d'analyser la variation de normes de vitesse avant et après la réinjection. L'Annexe 30 représente les différences des normes des vitesses entre la situation avant et après réinjection. Une légère augmentation de vitesse, comprise entre  $0,05$  et  $0,1 \text{ m/s}$ , est observée dans la zone de réinjection et au niveau des débordements autour de celle-ci. Cependant, une légère diminution de la norme des vitesses est constatée en amont de la réinjection, généralement comprise entre  $0$  et  $0,05 \text{ m/s}$ . Le reste du domaine présente peu de variation, principalement représenté par la couleur jaune.



Figure 33. Différences d'altitudes de surface libre avant/après réinjection pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$

### B. Paramètre de Shields

Finalement, la représentation spatiale du paramètre de Shields est assez similaire entre les deux configurations. Aucune zone ne semble changer de classe de mise en mouvement après réinjection (Figure 34).

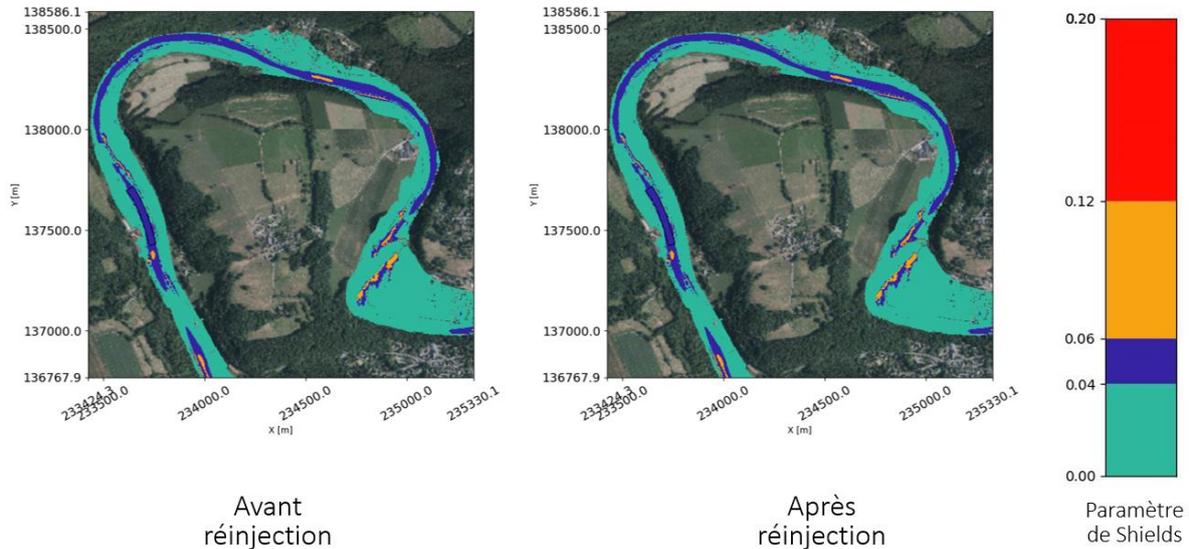


Figure 34. Comparaison de la norme des valeurs du paramètre de Shields avant/après réinjection pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s.

Il faut remarquer que la réinjection de galets pour ces débits, ne génère pas de débordements supplémentaires. De plus, il semblerait que plus le débit est élevé, plus les galets se déplacent mais également que les variations entre les situations avant et après réinjections sont faibles et moins faciles à déceler plus le débit est élevé.

### 5.3. Volume de la réinjection

Dans cette section, l'étude porte sur l'impact du volume de galets injectés sur l'allure de la ligne d'eau et la mise en mouvement de la charge de fond.

#### 5.3.1. Débit de 300 m<sup>3</sup>/s

##### A. Altitude de surface libre

La Figure 35 compare les variations d'altitude de la surface libre avant et après la réinjection pour deux scénarios : un volume équivalent au charriage annuel (2500 m<sup>3</sup>) et la moitié de ce volume (1250 m<sup>3</sup>), pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s. On peut voir une diminution maximale de l'altitude de la surface libre de 10 cm, celle-ci est moins étendue lorsque le volume est plus faible. L'impact de la réinjection semble moins significatif en amont lorsque le volume est réduit, avec une légère diminution de la ligne d'eau d'environ 5 cm à l'aval de la simulation dans les deux cas. On remarque l'impact de la réinjection est essentiellement concentré sur l'amont de la réinjection.

L'Annexe 31 illustre les variations de hauteur avant et après réinjection pour ces deux scénarios. Les couleurs représentent la variation de hauteur lorsque la topographie est augmentée de 0,25 m (situation de gauche) et de 0,125 m (situation de droite). Une injection de 1250 m<sup>3</sup> semble induire des variations plus faibles. La diminution de hauteur au niveau de la réinjection est environ trois fois moins importante avec une diminution de l'ordre de 0,3 m et 0,1 m respectivement pour les volumes de 2500 m<sup>3</sup> et 1250 m<sup>3</sup>. De même, l'élévation de la hauteur d'eau en amont ne dépasse pas 10 cm et est spatialement moins

étendue lorsque le volume est réduit de moitié. En comparaison, les variations de hauteur d'eau sont plus importantes avec un volume équivalent au charriage, variant de -0,5 m à 0,1 m.

L'Annexe 32 se concentre sur la comparaison des variations des normes de vitesse avant/après réinjection pour les deux scénarios. Tout comme pour les altitudes de surface libre, les variations de vitesse semblent moins prononcées et moins étendues spatialement lorsque le volume injecté est plus faible. L'augmentation des vitesses ne dépasse pas 0,30 m/s dans le scénario de droite, tandis que dans celui de gauche, certaines zones dépassent cette valeur. En amont du domaine, une diminution de vitesse est observée, avec une extension spatiale plus limitée lorsque le volume est réduit de moitié. Dans les deux scénarios, cette diminution ne dépasse pas les 5 cm/s.

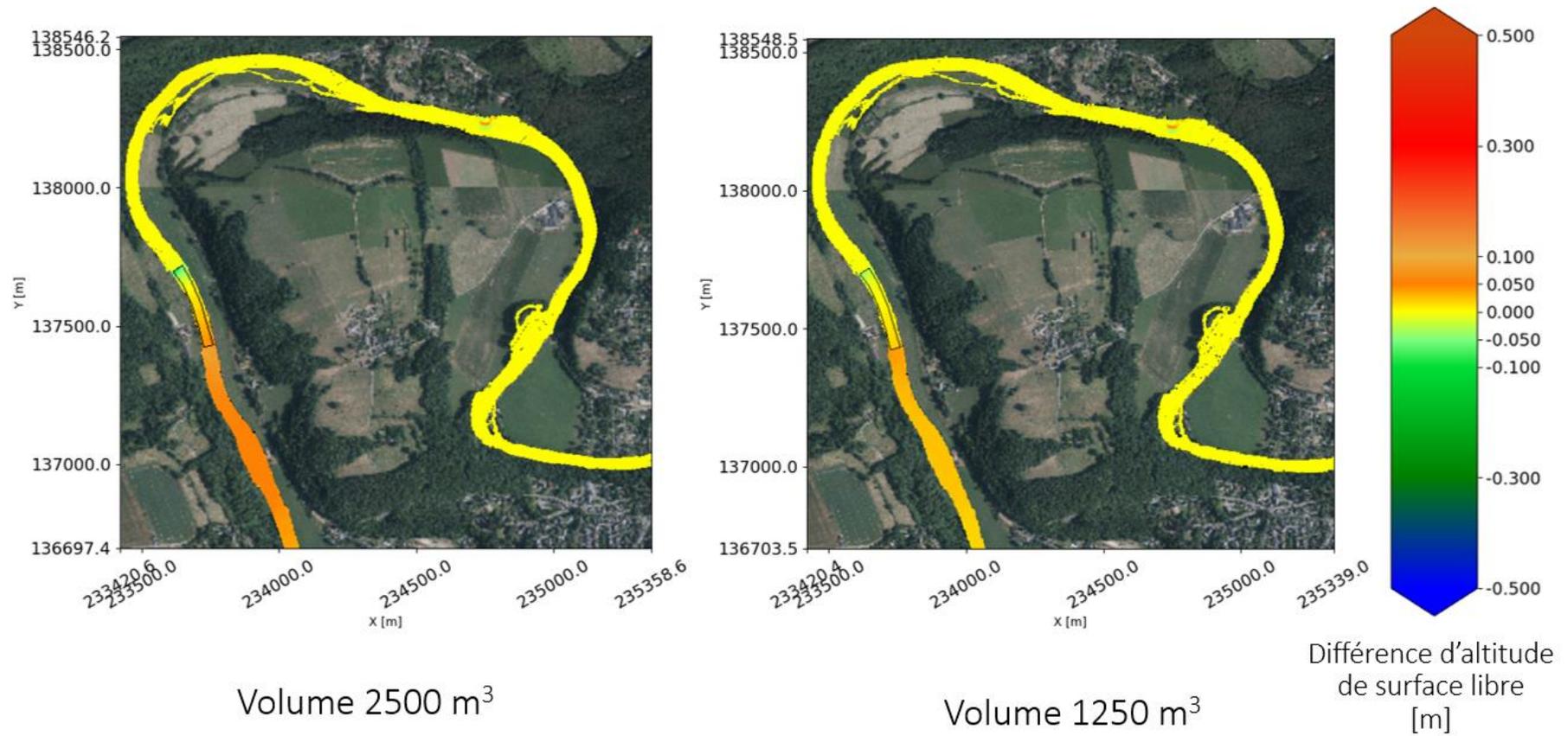


Figure 35. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m<sup>3</sup> (droite) pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s

### B. Paramètre de Shields

Finalement, la dernière comparaison est l'évaluation de l'impact du volume sur le transport des sédiments au sein du chenal. Peu de variations spatiales sont observables. Il semble qu'aucune zone de mise en mouvement apparaisse ou disparaisse entre les deux volumes testés. Cependant, une variation de la superficie de la zone présentant une valeur du paramètre de Shields comprise dans l'intervalle  $[0.04 - 0.06]$ . Une augmentation de cette superficie est observée en amont de la zone de réinjection lorsque le volume est diminué. Tandis qu'une diminution de cette superficie est observée en aval de la zone de réinjection lorsque le volume est divisé par deux (Figure 36).

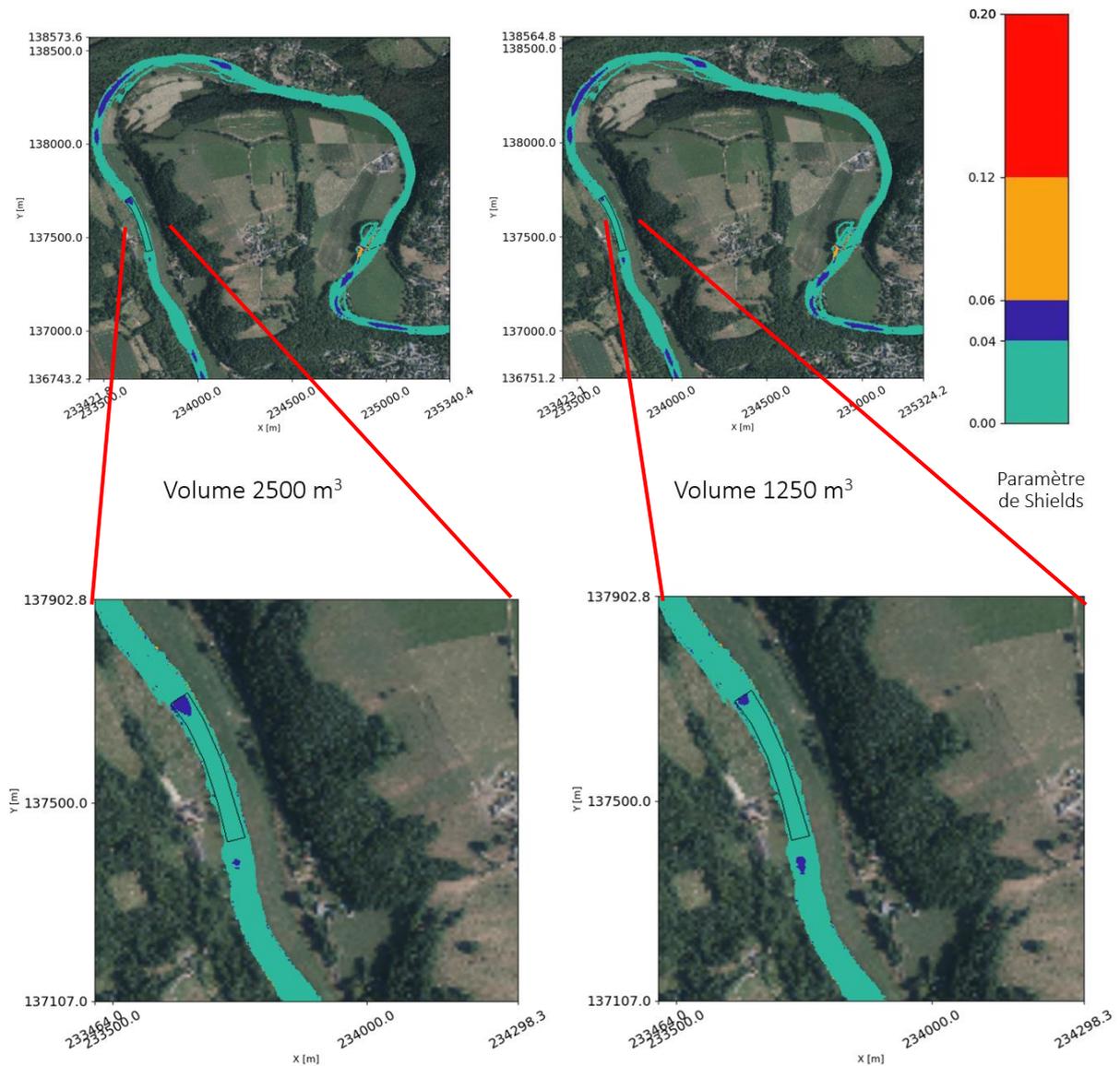


Figure 36. Comparaison des variations du paramètre de Shields pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m<sup>3</sup> (droite) pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s

### 5.3.2. Débit de 726 m<sup>3</sup>/s

Ces comparaisons peuvent également être étudiées pour un débit plus important, où les déplacements sont censés être plus initiés et où des débordements sont présents.

#### A. *Altitude de surface libre*

La Figure 37 compare les variations d'altitude de la surface libre avant et après réinjection pour deux scénarios : un volume équivalent au charriage annuel (2500 m<sup>3</sup>) et la moitié de ce volume (1250 m<sup>3</sup>), pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s. On observe une diminution maximale de l'altitude de la surface libre de l'ordre de 5 cm, cette diminution étant plus rapide et ainsi moins étendue spatialement lorsque le volume est plus faible. Contrairement au débit de 300 m<sup>3</sup>/s, aucune diminution de l'altitude n'est visible.

L'Annexe 33 compare les variations de hauteur avant et après réinjection pour ces deux scénarios de volume, pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s. Les deux situations présentent peu d'augmentation en amont de la réinjection, l'élévation ne dépassant pas les 5 cm. La différence notable entre les deux situations réside dans la diminution moins prononcée de la hauteur d'eau au niveau de la réinjection lorsque le volume est réduit, passant d'une diminution de l'ordre de 10 cm à une diminution de l'ordre de 5 cm. Il semble donc qu'un débit aussi élevé impacte peu la variation de la surface libre après l'élévation de la topographie.

L'Annexe 34 représente la comparaison des variations des normes de vitesse avant/après réinjection pour ces deux scénarios de volume. Les variations sont assez similaires et moins importantes que celles observées pour le débit de 300 m<sup>3</sup>/s.

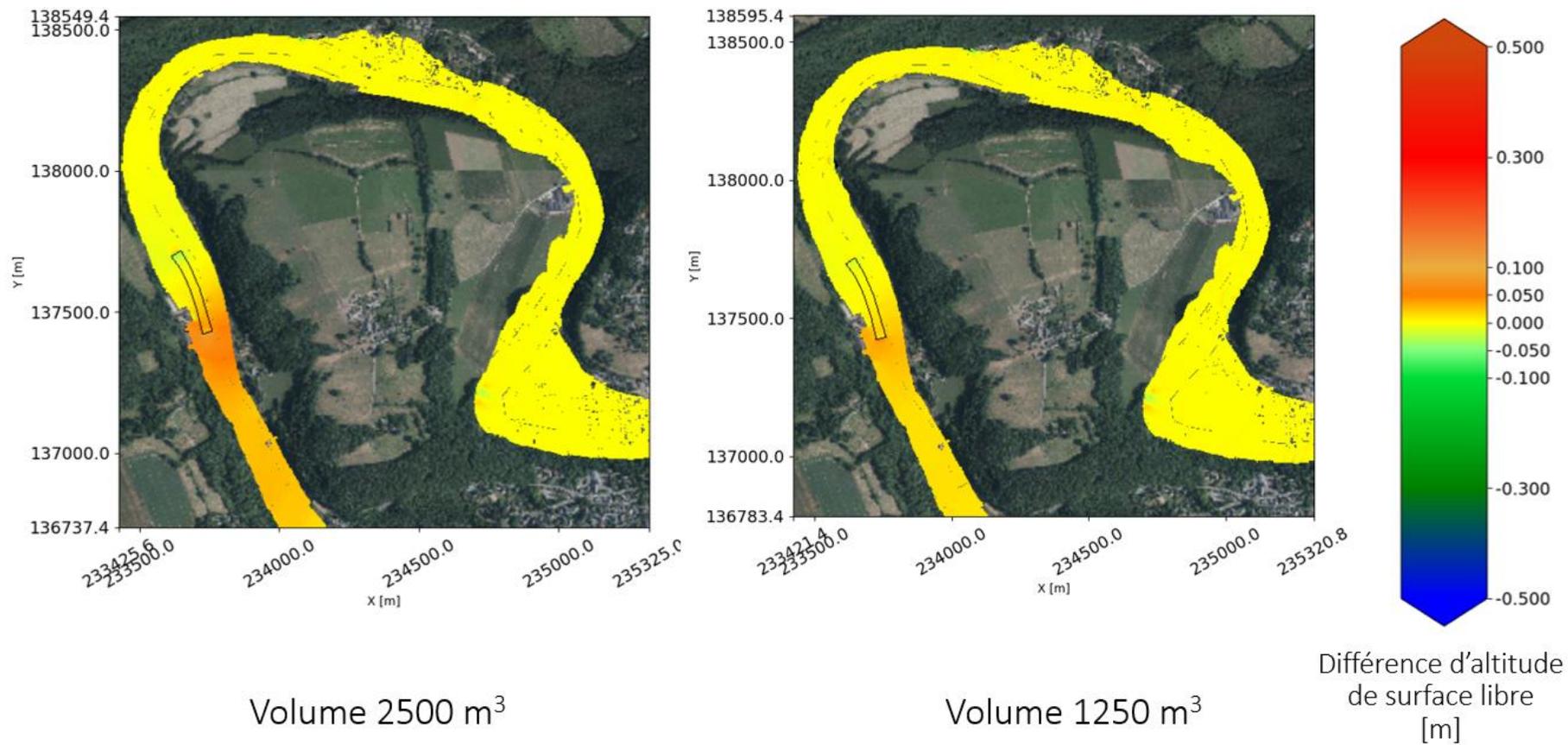


Figure 37. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m<sup>3</sup> (droite) pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s

### B. Paramètre de Shields

Finalement, la dernière comparaison portera sur le paramètre de Shields. La Figure 38 montre le paramètre de Shields après réinjection pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> (à gauche) et pour un volume de 1250 m<sup>3</sup> (à droite) pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s pour les deux situations. Les deux simulations semblent produire des résultats identiques sur les classifications des zones suivant la valeur du paramètre de Shields et la quantité injectée ne semble pas impacter le paramètre de Shields (Figure 38).

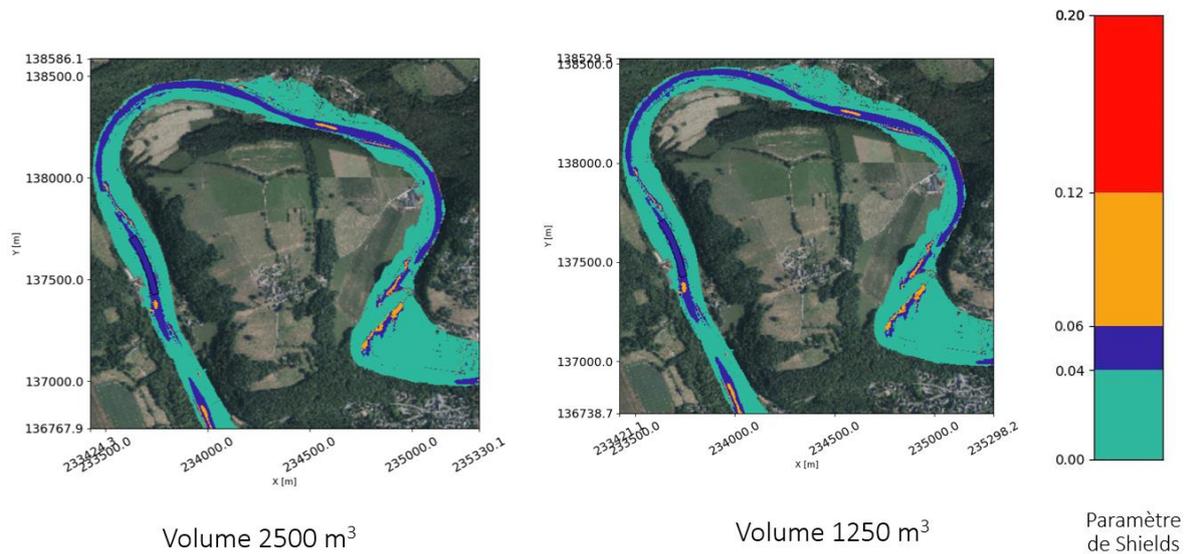


Figure 38. Comparaison des variations du paramètre de Shields pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m<sup>3</sup> (droite) pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s

Une injection d'un plus grand volume de galets semble entrainer une plus grande variation de hauteur d'eau et de vitesse sans pour autant impacter la représentation spatiale des valeurs du paramètre de Shields. Il semble que lorsque le débit est suffisamment important, comme celui générant une inondation d'une récurrence de 25 ans, les variations entre une injection d'un volume équivalent au charriage annuel et un volume équivalent à sa moitié, sont peu marquées.

## 5.4. Localisation de la réinjection

Les résultats de cette section visent à analyser l'impact du positionnement de la réinjection sur l'élévation de la ligne d'eau et sur la mise en mouvement des sédiments. Pour ce faire, différents paramètres ont été fixés. Le volume a été maintenu constant, correspondant au charriage annuel de 2500 m<sup>3</sup>, la topographie a été uniformément surélevée de 0.25 m sur tout le fond de la réinjection, le diamètre des particules analysées a été fixé au D<sub>16</sub>, soit 42 mm, et enfin le débit a été fixé à 300 m<sup>3</sup>/s. Tout comme les simulations précédentes, ces simulations ont également été examinées pour le débit d'une crue de récurrence de 25 ans afin d'estimer l'impact d'un changement de localisation sur les débordements et le risque d'inondation.

### 5.4.1. Axe rectiligne vs Méandre, débit de 300 m<sup>3</sup>/s

#### A. Altitude de surface libre

La Figure 39 compare les différences d'altitude de la surface libre avant et après réinjection pour deux localisations différentes : une portion rectiligne du chenal (à gauche) et une boucle de méandre (à droite), pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s. Cette figure montre des variations similaires de la ligne d'eau dans les deux localisations. Une légère augmentation de la ligne d'eau de 0.05 m à 0.1 m est visible en amont des deux réinjections. De plus, une légère baisse de l'altitude est observée dans la portion la plus aval de la

réinjection, d'environ 0.05 m. La majeure partie du domaine présente peu de variations d'altitude, se rapprochant de zéro.

L'Annexe 35 compare les différences de hauteur avant et après réinjection pour ces deux localisations différentes. Les deux endroits semblent présenter des échelles de variation de hauteur d'eau similaires. La diminution observée dans la zone de réinjection est d'environ 30 cm et l'élévation de la hauteur en amont de la réinjection est comprise entre 5 cm et 10 cm.

L'Annexe 36 compare les différences de normes de vitesse avant et après réinjection pour ces deux localisations différentes. Les deux endroits semblent présenter des échelles de variation de vitesse similaires. La diminution maximale de la vitesse est de 5 cm/s et l'augmentation maximale des vitesses dans la zone de réinjection est de 30 cm/s. Cependant, l'augmentation de la vitesse au niveau de la réinjection semble légèrement moins étendue en amont lorsque la réinjection se fait dans la boucle du méandre.

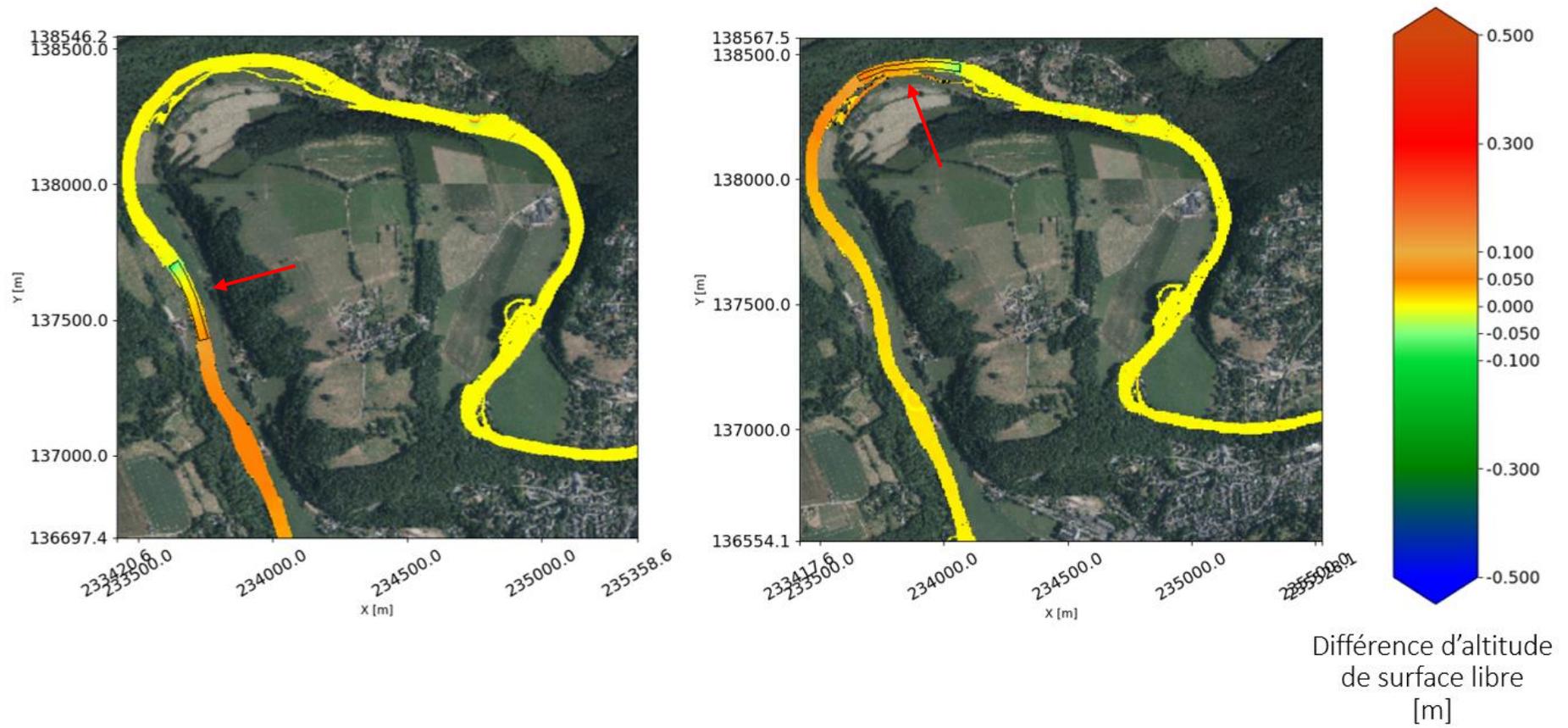


Figure 39. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$

### B. Paramètre de Shields

La Figure 40 présente le paramètre de Shields après réinjection pour deux localisations différentes : une dans l'axe rectiligne du chenal (à gauche) et une au sein de la boucle du méandre (à droite), pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  dans les deux cas. Les deux simulations semblent produire des résultats similaires en terme de valeurs du paramètre de Shields, et la quantité injectée ne semble pas avoir d'impact sur ce paramètre. Cependant, il est possible de remarquer qu'en aval de chaque réinjection, une zone bleue apparaît, indiquant une possible initiation des mouvements de la charge de fond. Cette zone n'est présente qu'après la réinjection.

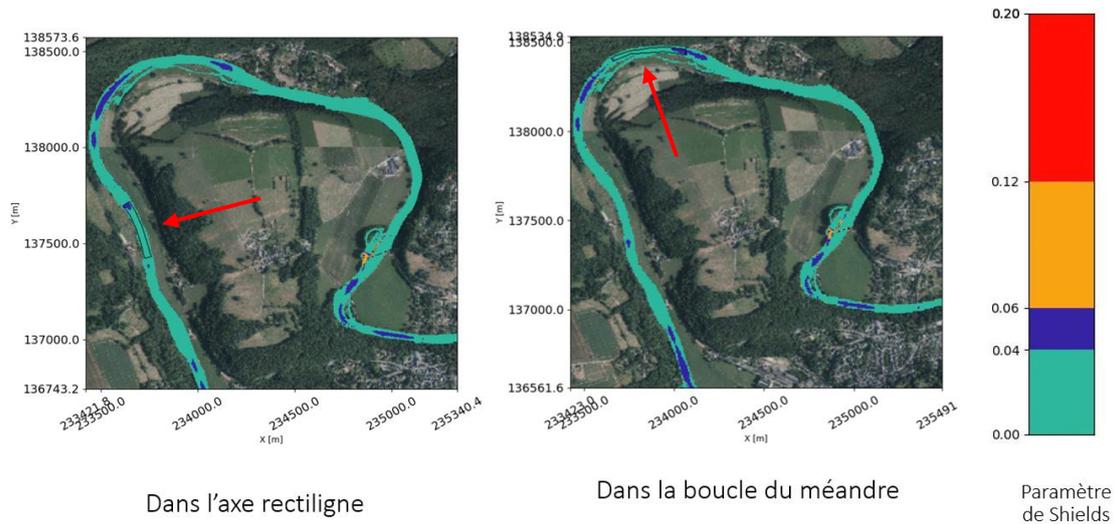


Figure 40. Comparaison du paramètre de Shields après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 5.4.2. Axe rectiligne vs Méandre, débit de $726 \text{ m}^3/\text{s}$

Dans le souci d'étudier également l'impact de ce changement de localisation lors d'une crue de récurrence de 25 ans ( $726 \text{ m}^3/\text{s}$ ), les figures suivantes présenteront les comparaisons en fonction de la localisation pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$ .

##### A. Altitude de surface libre

La Figure 41 illustre la comparaison des différences d'altitude de surface libre avant et après réinjection pour une localisation dans une portion rectiligne du chenal (à gauche) et au sein d'une boucle de méandre (à droite) pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cette représentation visuelle révèle des observations similaires dans les deux localisations. On remarque une élévation de la ligne d'eau d'environ  $0.05 \text{ m}$ . Cependant, il semble que la réinjection localisée au cœur du méandre présente déjà une élévation du plan d'eau au sein même de la réinjection. Une très légère diminution de la ligne d'eau est observable en aval de la réinjection, d'environ  $0.05 \text{ m}$  également.

L'Annexe 37 présente des résultats de variation d'hauteur d'eau similaires entre les deux configurations, avec des valeurs de variation de hauteur comprises dans un intervalle identique pour les deux sites de réinjection. En effet, la diminution de hauteur d'eau est d'environ  $30 \text{ cm}$ , tandis que l'augmentation en amont de la réinjection est peu marquée et ne dépasse pas les  $5 \text{ cm}$ .

L'Annexe 38 présente les variations de la norme des vitesses entre une réinjection placée au sein de l'axe rectiligne du chenal et une réinjection placée au sein de la boucle du méandre. Les résultats entre les deux configurations sont semblables, avec des valeurs de variation de vitesse comprises dans un intervalle identique pour les deux sites de réinjection. L'intervalle de diminution est compris entre  $0$  et  $0.05 \text{ m/s}$ , tandis que l'intervalle de l'élévation de vitesse au niveau de la réinjection est globalement compris entre  $0.05$  et  $0.1 \text{ m/s}$ . Cependant, quelques pixels dépassent cette valeur.

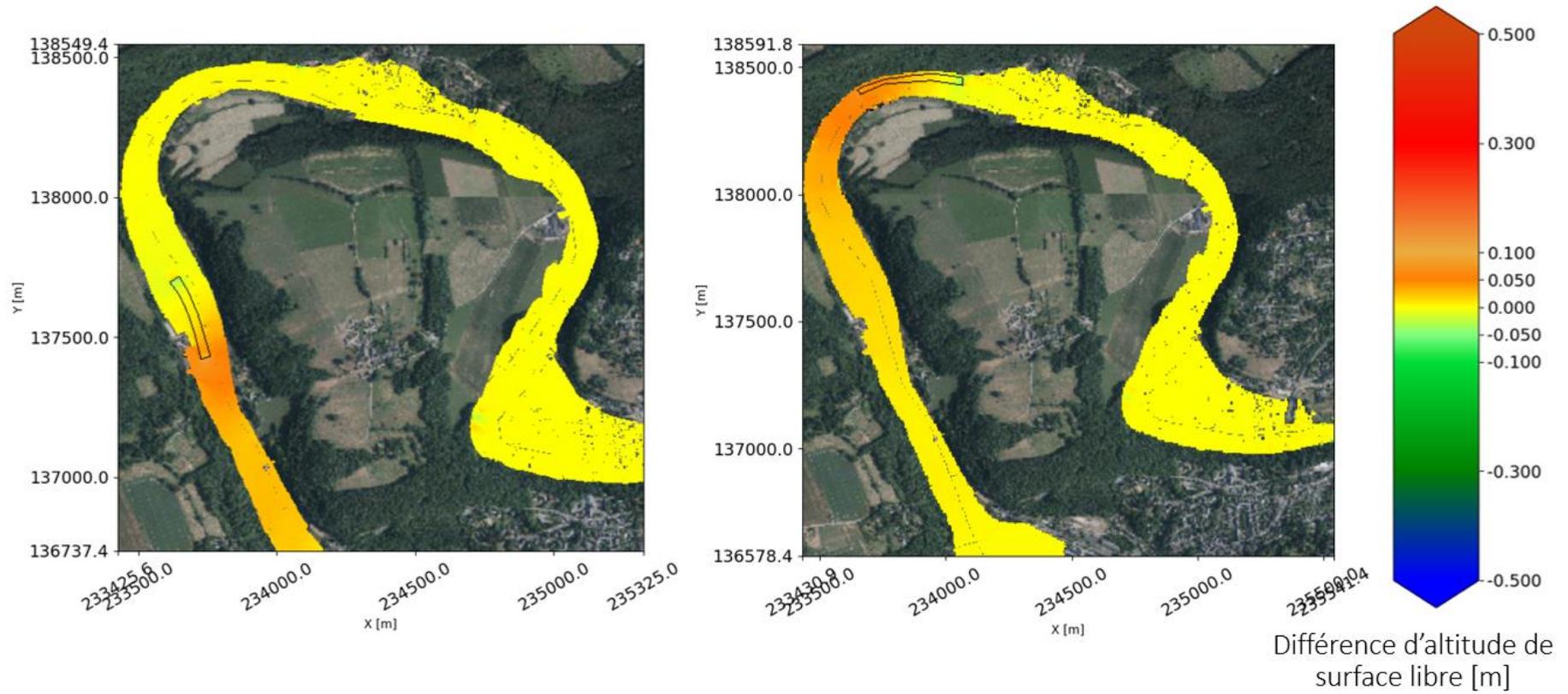


Figure 41. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$

### B. Paramètre de Shields

Finalement, la Figure 42 représente la comparaison du paramètre de Shields après réinjection entre les deux localisations. Les résultats entre les deux configurations sont similaires, avec des valeurs de variation du paramètre de Shields comprises dans un intervalle identique pour les deux sites de réinjection. Cependant, on observe l'apparition d'une zone orange (avec des valeurs comprises dans l'intervalle  $[0.06 - 0.12]$ ), indiquant le début du transport de la charge de fond, en aval de la réinjection au niveau du méandre. Cette zone n'apparaît pas lorsque la réinjection est effectuée dans l'axe rectiligne du chenal. On constate également que la superficie de la zone orange en amont de la réinjection dans l'axe rectiligne est légèrement plus faible que lorsque la réinjection s'effectue au niveau du méandre.

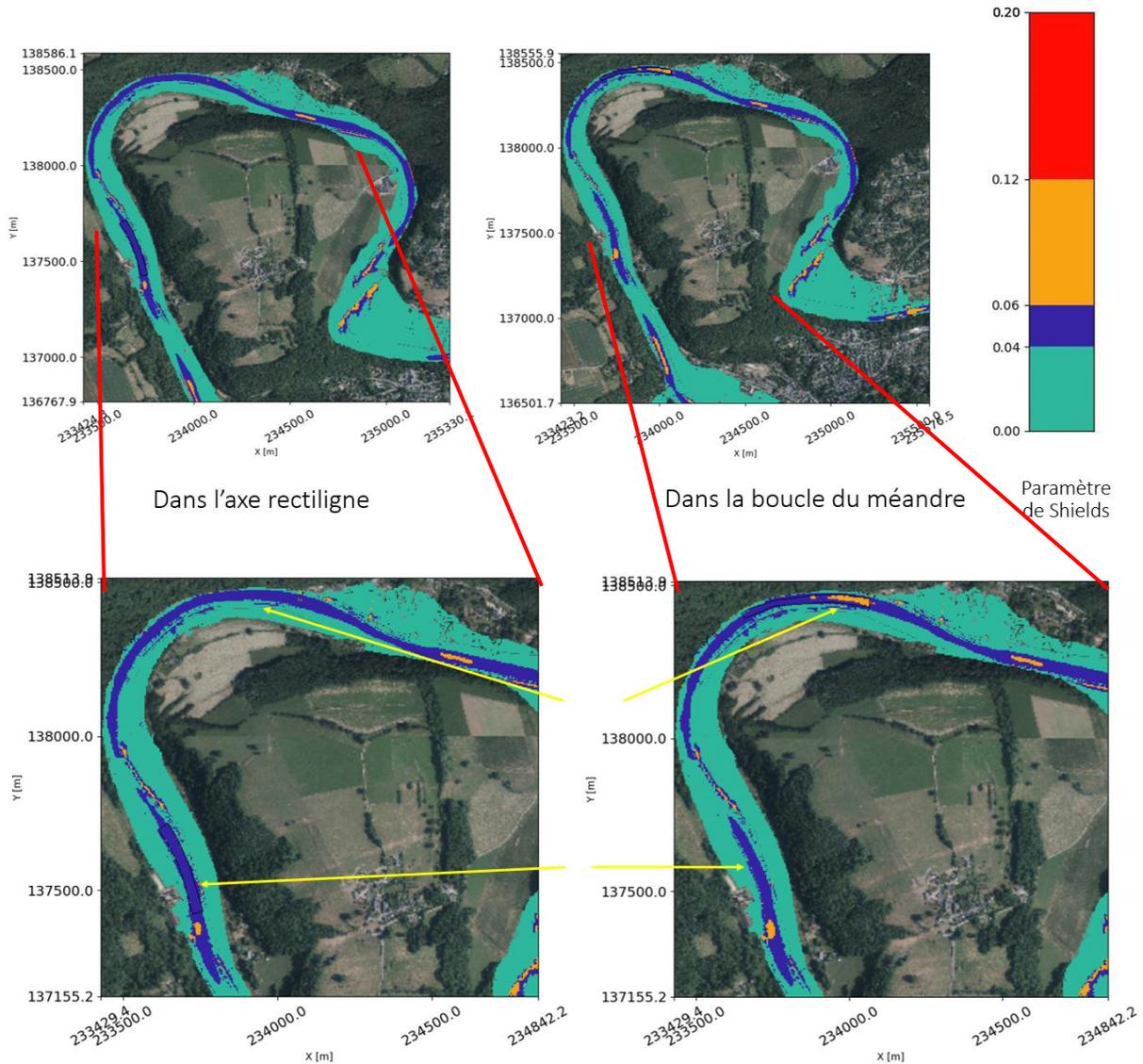


Figure 42. Comparaison du paramètre de Shields après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$

### 5.4.3. Valeur initiale du paramètre de Shields, débit de 300 m<sup>3</sup>/s

Dans un second temps, il est également nécessaire d'analyser l'importance du paramètre de Shields initial avant la réinjection. Ainsi, cette fois-ci, la comparaison de l'impact des localisations sera effectuée entre le positionnement d'une réinjection sur l'axe rectiligne du chenal présentant initialement une absence de mouvement et d'une autre réalisée sur une zone où la valeur initiale du paramètre de Shields entraîne une initiation aux mouvements.

#### A. *Altitude de surface libre*

La Figure 43 présente la comparaison des différences d'altitude de surface libre avant et après réinjection pour une localisation se trouvant au sein d'une portion rectiligne du chenal (à gauche) et une localisation sur une zone où la valeur initiale du paramètre de Shields entraîne une initiation aux mouvements (à droite) pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s. Les deux localisations présentent des résultats similaires avec une élévation de la ligne d'eau d'environ 0.05 m à l'amont des réinjections. Cependant, il semble que la réinjection localisée présentant un paramètre de Shields initial supérieur montre une élévation du plan d'eau directement en amont de la réinjection plus importante, de l'ordre de 10 cm. Une très légère diminution de la ligne d'eau est observable à l'aval de la réinjection, de l'ordre de 0.05 m.

L'Annexe 39 montre la comparaison des variations des hauteurs d'eau avant et après réinjection entre une localisation dans l'axe rectiligne du chenal (à gauche) et une localisation sur une zone où la valeur initiale du paramètre de Shields entraîne une initiation aux mouvements (à droite) pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s. Les variations de hauteur semblent se trouver dans le même intervalle de valeur dans les deux situations, avec une diminution de la hauteur d'eau au niveau de la réinjection allant de -0.10 m à -0.30 m. De plus, une légère augmentation du niveau d'eau en amont de la réinjection est perceptible, de l'ordre de 0.05 m.

L'Annexe 40 représente la comparaison des variations de la norme des vitesses avant et après réinjection entre une localisation où la valeur initiale du paramètre de Shields présente une absence de mouvements (à gauche) et une localisation où la valeur initiale du paramètre de Shields entraîne une initiation aux mouvements (à droite) pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s. Les variations de vitesse semblent être assez similaires dans les deux situations, avec des vitesses augmentant de plus de 0.10 m/s mais ne dépassant pas les 0.50 m/s. Un léger ralentissement de l'ordre de 0.05 m/s est constaté à l'amont de la réinjection dans les deux cas ; cependant, un ralentissement plus prononcé de l'ordre de 30 cm/s est observé à l'amont de la situation où la valeur initiale du paramètre de Shields est plus élevée. Ce ralentissement peut être dû à la courbure plus prononcée de la rivière à cet endroit.



Figure 43. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$

### B. Paramètre de Shields

Finalement, il est également intéressant d'analyser la répartition spatiale des valeurs du paramètre de Shields après réinjection entre les deux localisations. On observe l'apparition d'une zone mise en mouvement supérieure après la réinjection lorsque celle-ci est effectuée au niveau d'une zone où la valeur initiale du paramètre de Shields est supérieure. Constatons que la zone orange, indiquant le début de la mise en mouvement, n'est présente qu'au niveau de la réinjection dans la situation de droite (Figure 44).

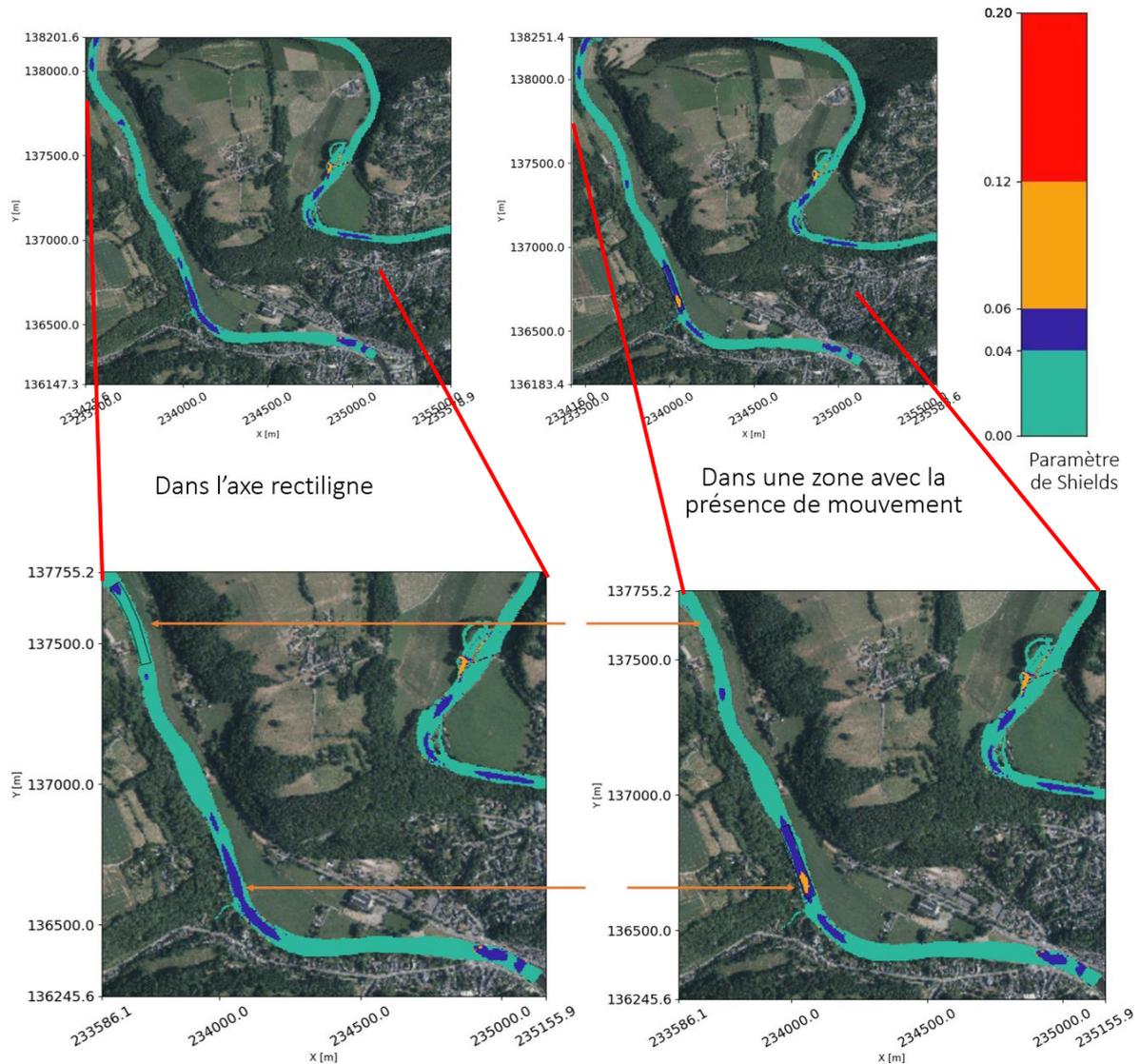


Figure 44. Comparaison des valeurs du paramètre de Shields après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale génère du mouvement (droite) pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 5.4.4. Valeur initiale du paramètre de Shields, débit de 726 m<sup>3</sup>/s

La comparaison entre ces deux types de localisation peut également être réalisée pour un débit correspondant à une inondation d'une récurrence de 25 ans (726 m<sup>3</sup>/s).

##### A. *Altitude de surface libre*

La Figure 45 présente la comparaison des différences d'altitude de surface libre avant et après réinjection pour une localisation où la valeur initiale du paramètre de Shields présente une absence de mouvements (à gauche) et une localisation où la valeur initiale du paramètre de Shields entraîne une initiation aux mouvements (à droite) pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s. Cette Figure montre des observations similaires au sein des deux localisations. On remarque une élévation de la ligne d'eau de l'ordre de 0.05 m. Cependant, la localisation de droite présente déjà une élévation du plan d'eau au sein même de la réinjection. Cette élévation s'étend sur l'ensemble de la largeur du débordement. Une très légère diminution de la ligne d'eau est observable à l'aval de la réinjection, de l'ordre de 0.05 m.

Tout comme pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s, l'Annexe 41 présente les différences de hauteur d'eau entre les deux configurations. Ces variations présentent des valeurs contenues dans le même intervalle pour les deux situations. L'élévation des hauteurs d'eau à l'amont des réinjections est généralement comprise entre 0.05 m et 0.1 m, tandis que la diminution de la hauteur d'eau au niveau de la réinjection est de l'ordre de 30 cm.

L'Annexe 42, pour sa part, montre la comparaison entre les deux localisations mais cette fois-ci en termes de vitesse. Tout comme pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s, les variations de vitesse présentent des valeurs contenues dans le même intervalle pour les deux situations. En effet, la diminution des vitesses en amont des réinjections est de l'ordre de 5 cm/s tandis que l'élévation de celles-ci au niveau de la réinjection est comprise entre 0.1 et 0.30 m/s. Il est possible de remarquer un des flux de vitesse divergent en diminution en aval de la réinjection. La présence d'un débordement juste en amont de la seconde réinjection rend la comparaison des deux situations difficiles puisqu'il y a une dissipation de vitesse au sein de celui-ci.

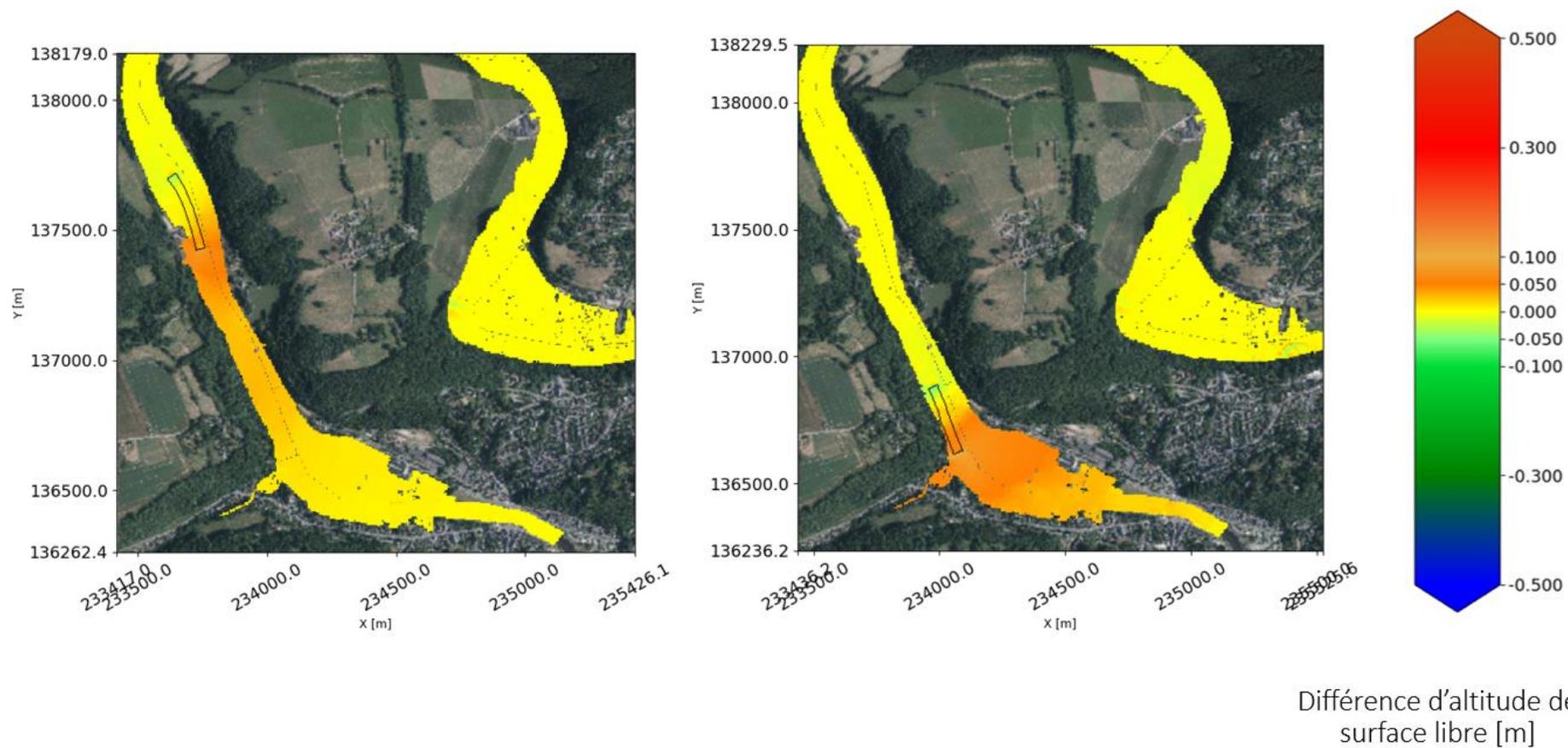


Figure 45. Comparaison des variations d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$

### B. Paramètre de Shields

Finalement, la répartition spatiale des valeurs du paramètre de Shields peut également être comparée pour ce débit. Il est évident que la réinjection de droite présente une mise en mouvement (orange), à l'opposé de celle de gauche qui présente uniquement une initialisation au mouvement (bleu foncé). On peut observer une augmentation de la largeur de la zone où le déplacement est possible au niveau de la réinjection lorsque le paramètre de Shields est plus élevé. Cette augmentation de largeur est notable lorsqu'on compare cette zone à une situation où la réinjection a été effectuée dans une zone où le paramètre de Shields présente une valeur inférieure. (Figure 46).

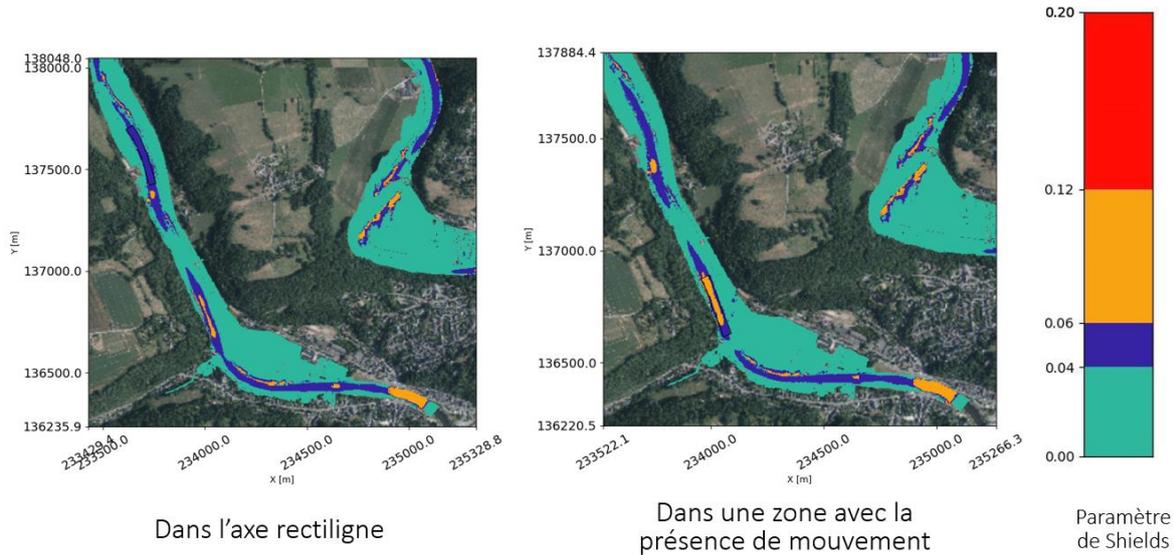


Figure 46. Comparaison des valeurs du paramètre de Shields après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale génère du mouvement (droite) pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Il semble que le changement de localisation entraîne peu de variation de l'élévation de la ligne d'eau entre les différents scénarios testés. Il est donc primordial de considérer d'autres aspects. La localisation au niveau du méandre semble être celle qui est la plus éloignée des habitations, ce qui pourrait occasionner moins de dégâts matériels. En revanche, le troisième choix de localisation se trouve directement en aval de la ville d'Esneux, impactant directement les habitations aux alentours. Il est aussi nécessaire de prendre en compte l'accessibilité du site. La localisation possédant une valeur initiale plus élevée du paramètre de Shields se trouve directement à proximité de la ville, permettant un accès direct à la zone. Cependant, les deux autres localisations se trouvent en zone agricole, créant une exposition plus faible aux risques d'inondations et plus d'espaces disponibles pour la mise en pratique des réinjections sur le terrain.

### 5.5. Style de la réinjection

Au cours de cette section, nous analyserons les résultats des simulations portant sur la variation du style de la réinjection numérique, c'est-à-dire la manière dont la topographie a été surélevée numériquement. Cette simulation a pour objectif théorique de comparer les deux styles de réinjection présentés dans la partie « Méthodologie » en termes de variations d'altitude de surface libre et de mise en mouvement de la charge de fond. Les deux configurations présentées sur la Figure 27 de la méthodologie seront testées dans des conditions initiales identiques. À partir d'un volume équivalent au charriage annuel ( $2500 \text{ m}^3$ ) avec une surface au sol de  $10\,000 \text{ m}^2$ , d'un diamètre des particules équivalent au  $D_{16}$ , et d'une localisation dans la portion rectiligne du chenal principal, nous examinerons les résultats pour des débits de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les figures suivantes présenteront la comparaison entre les deux styles de réinjection en termes de

hauteur d'eau, d'altitude de surface libre, de vitesse et de mise en mouvement des sédiments à l'aide du paramètre de Shields. Ces figures traduiront ainsi les comparaisons des différences avant / après réinjection. Le premier style de réinjection tente de surélever la topographie en augmentant d'une hauteur identique de 0.25 m sur chaque pixel pour obtenir un volume de 2500 m<sup>3</sup> sur l'ensemble de la zone. Tandis, que le second style de réinjection tente de surélever la topographie d'un volume de 2500 m<sup>3</sup> en imposant une altitude constante sur l'ensemble du volume. Ainsi la hauteur de la réinjection sera fonction de la hauteur du fond du lit pour chaque pixel.

### 5.5.1. Débit de 300 m<sup>3</sup>/s

#### A. *Altitude de surface libre*

La Figure 47 présente la comparaison des deux manières de surélever la topographie (élévation constante à gauche et altitude constante à droite) (voir Figure 27). L'élévation constante sera représentée par le style A et l'altitude constante par le style B. Elle montre les différences d'altitude de surface libre avant / après réinjection. Il est possible d'observer que les deux styles de réinjection présentent des variations d'altitude de surface libre assez semblables. On remarque, pour les deux styles de réinjection, que l'élévation de la ligne d'eau en aval de la réinjection se rapproche de 0. En amont, de la réinjection, les deux manières de réinjecter montre une élévation de la ligne d'eau de l'ordre de 5 cm. L'étendue spatiale de cette élévation de la ligne d'eau semble similaire pour les deux configurations. La différence notable entre les deux styles de réinjection numérique réside au niveau de la zone de réinjection. La réinjection à élévation identique sur chaque pixel (style A) montre une diminution progressive de l'altitude de surface libre au sein de la réinjection. En effet, la différence d'altitude de ligne d'eau passe de + 5cm en amont de la réinjection à - 5cm en aval de la réinjection. Tandis que, la réinjection à altitude constante (style B) présente une alternance de différences d'altitudes de surface libre positives et négatives de 5 cm. Ainsi l'aval de la réinjection avec le style B, présente une augmentation de la ligne d'eau tandis que l'aval de la réinjection avec le style A présente une diminution de la ligne d'eau.

L'Annexe 43 présente une comparaison des différences de hauteur d'eau avant et après réinjection entre les deux styles de réinjection (élévation constante à gauche et altitude constante à droite) pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s. Comme pour la Figure 47, on remarque une similitude entre les deux manières de réinjecter. En effet, l'aval des deux réinjections présente des variations de vitesses se rapprochant de zéro. De plus, l'amont des deux réinjections présente une élévation de la ligne d'eau de l'ordre de 5 à 10 cm de même étendue spatiale. Néanmoins, les zones de réinjection présentent quelques différences. L'élévation de la topographie d'une hauteur égale à 25 cm sur chaque pixel, produit une diminution homogène de la hauteur au sein de la réinjection de l'ordre de 30 cm. Tandis que, la topographie surélevée à 80.15 m d'altitude présente une variation de hauteur plus contrastée au sein de la réinjection. En effet, la majeure partie de la réinjection présente une diminution de hauteur de l'ordre de 50 cm. Cependant, l'aval de la réinjection présente une augmentation de la hauteur de l'ordre de 30 cm.

L'Annexe 44 présente une comparaison des différences des normes des vitesses avant et après réinjection entre les deux styles de réinjection (élévation constante à gauche et altitude constante à droite) pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s. Tout comme pour les variations d'altitudes de surface libre et de vitesses, l'amont et l'aval de la réinjection sont identiques entre les deux configurations. En effet, l'aval des deux réinjections ne présente pas de variations de la norme des vitesses et l'amont des deux réinjections présente une diminution de la norme des vitesses de l'ordre de 5 cm/s. Cependant, les deux zones de réinjections ne présentent pas des variations de vitesses identiques. En effet, l'accélération de la vitesse semble plus importante lorsque la réinjection s'effectue à altitude constante (30 cm/s) soit 3 fois supérieure que lorsque la réinjection s'effectue à hauteur constante (10 cm/s).

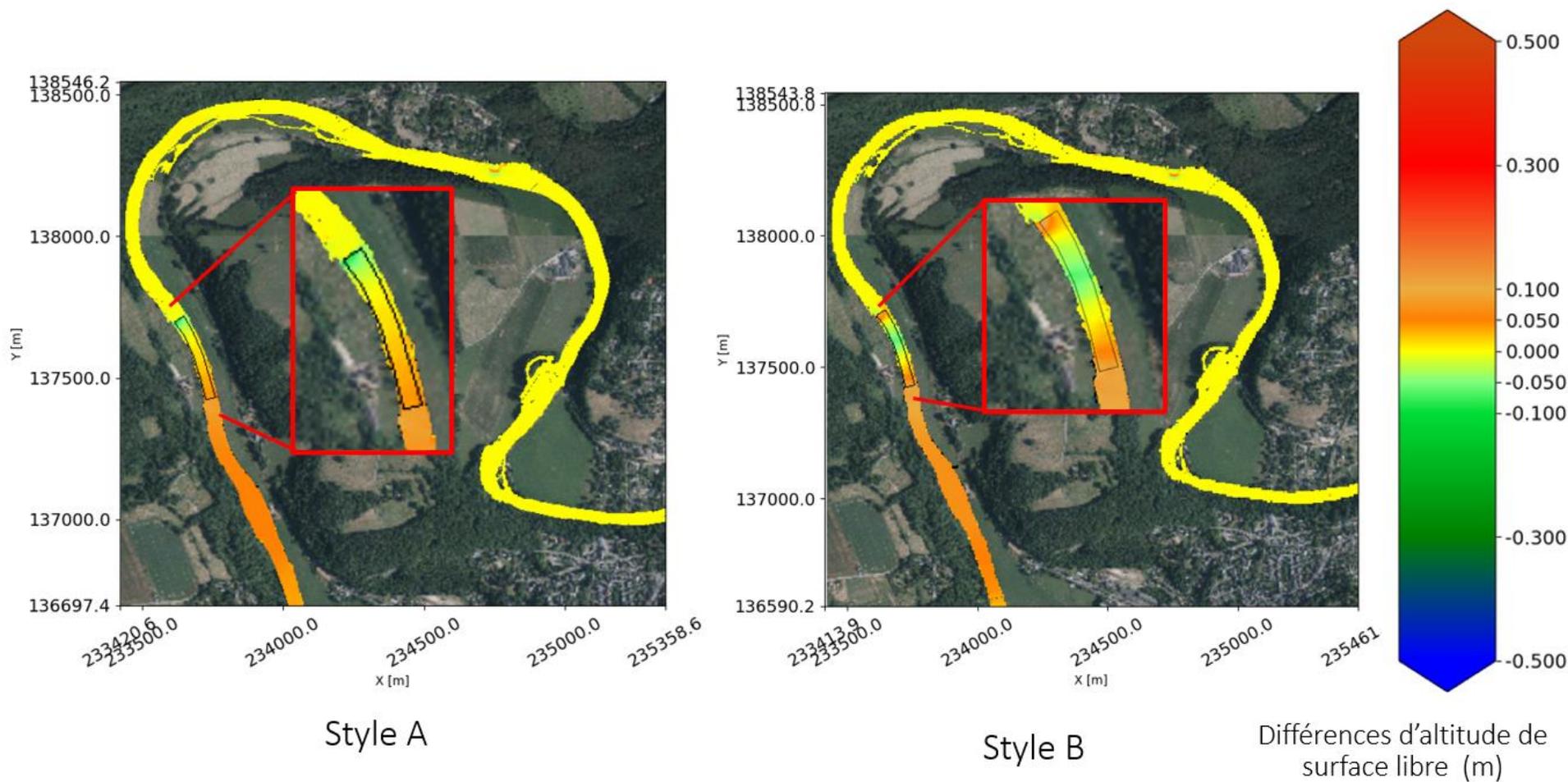


Figure 47. Différences d'altitude de surface libre avant / après réinjection pour une élévation constante de 0,25 m de la topographie (A) et pour une altitude constante (B) pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> et un débit de 300 m<sup>3</sup>/s.

### B. Paramètre de Shields

La Figure 48 présente la comparaison du paramètre de Shields après réinjection pour une élévation constante de 0.25 m de la topographie (style A) et pour une altitude constante de 80.15 m (style B) pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> et un débit de 300 m<sup>3</sup>/s. Les deux styles de réinjection numérique semblent produire des résultats similaires en termes de mise en mouvement de la charge de fond. En effet, les valeurs du paramètre de Shields restent comprises au sein des deux premières classes entre [0 – 0.04] et [0.04 – 0.06]. A l'exception de la zone d'initiation aux déplacements présente au sein de la réinjection, les différentes zones de mise en mouvement semblent se trouver aux mêmes endroits pour les deux simulations. Il est possible de remarquer que l'initiation de la mise en mouvement au sein de la réinjection ne se déroule pas au même endroit pour les deux styles de réinjection. D'une part, lorsque la réinjection s'effectue selon une hauteur d'élévation constante, l'initiation aux déplacements est présente en aval de la réinjection. D'autre part, lorsque le volume de réinjection est placé à altitude constante, l'initiation aux mouvements est présente au milieu de la réinjection. La superficie observée avec le premier style de réinjection semble être plus importante que celle observée avec le second style.

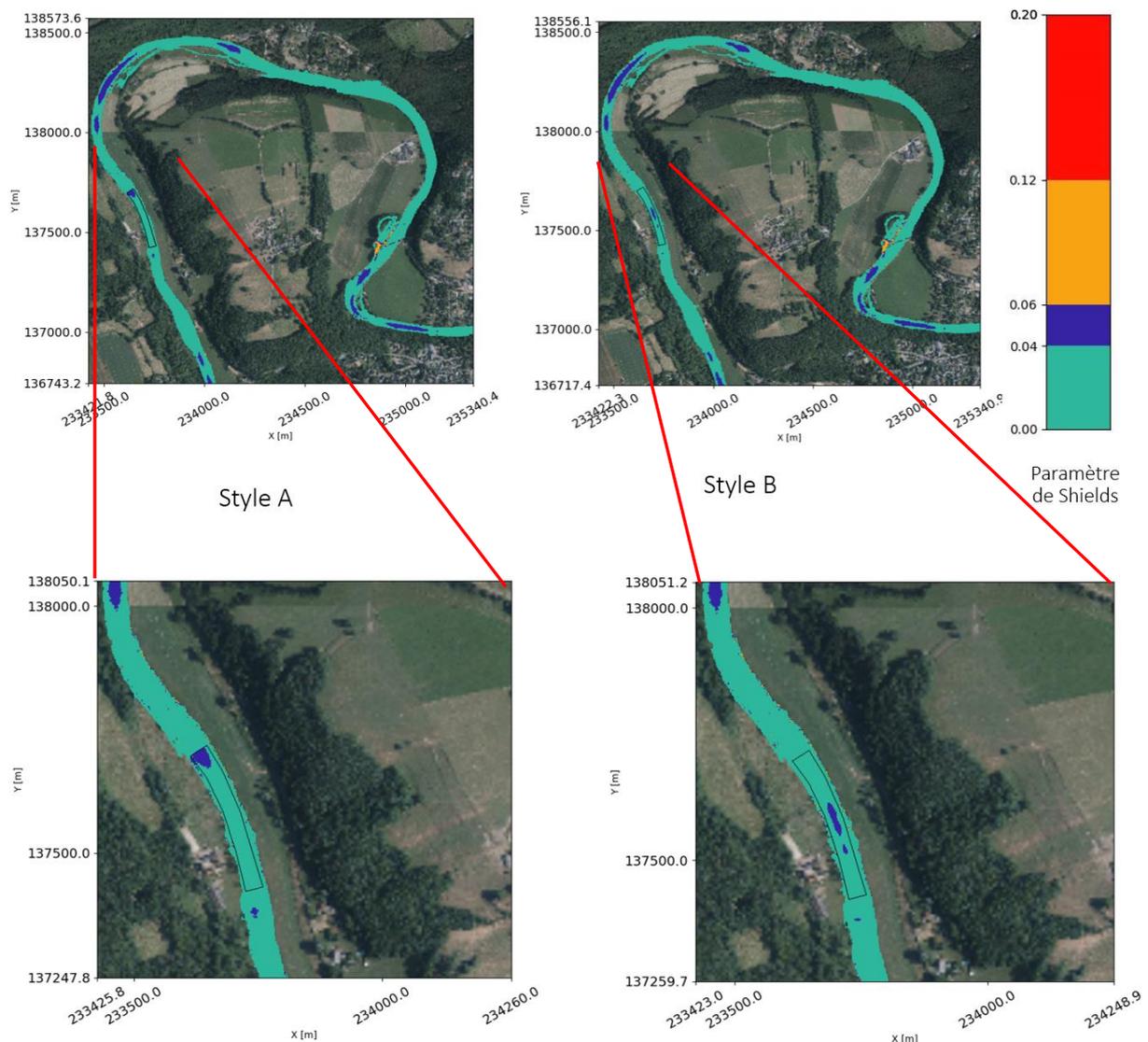


Figure 48. Comparaison du paramètre de Shields après réinjection pour une élévation constante de 0.25 m de la topographie (A) et pour une altitude constante (B) pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> et un débit de 300 m<sup>3</sup>/s.

## 6. Discussion & Validation

### 6.1. Synthèse des marquages sur l'Ourthe

Ce sous-chapitre aura pour intérêt de retracer une synthèse des marquages ayant eu lieu sur l'Ourthe afin de comparer les valeurs de mise en mouvement de la charge de fond issues de la littérature et celles issues de la modélisation numérique. Cette comparaison a pour objectif de déterminer si le logiciel prédit correctement le charriage par rapport à la littérature.

Plusieurs marquages ont été réalisés sur l'Ourthe. Ils ont permis d'identifier le débit à partir duquel débute le charriage. Des marquages de placette à la peinture ont été réalisés à Petit Han, à Hamoir et à Esneux en novembre 2003 (Houbrechts, 2005). Ces marquages sont réalisés sur des seuils émergés à l'aide d'une grille d'1m<sup>2</sup> possédant des mailles carrées de 10 cm. Les cent éléments se trouvant sous chaque intersection seront représentatifs de la granularité de la placette. Ces marquages sont réalisés sur photo pour éviter de perturber le dépôt. On constate que le taux de récupération est de 10 à 20 % ce qui est relativement faible. Ce faible taux est lié à la difficulté de repérer les galets peints enfouis. Seules les faces peintes sont utilisables pour distinguer les galets marqués (Hallot, s.d.). Les résultats de ces marquages permettent d'obtenir des informations sur la crue du 21 janvier 2004 avec un  $Q_{\text{journalier}}$  de 119,5 m<sup>3</sup>/s à Tabreux et de 231 m<sup>3</sup>/s à Sauheid (0,8  $Q_b$ ). Les sites d'Hamoir et de Petit Han se basent sur le débit de Tabreux alors que le site d'Esneux se base sur la station de Sauheid. Les éléments récupérés à Esneux d'un  $D_{50}$  de 35 mm ont parcouru des distances maximales respectivement inférieures à 7 m. Tandis que ceux récupérés sur la placette d'Hamoir possédant des éléments d'un  $D_{50}$  de 60 mm présentent un déplacement de 43 m. La placette de Petit Han possédant des éléments d'un  $D_{50}$  de 38 mm présentait des déplacements non significatifs d'une distance maximale de 3 m (Houbrechts, 2005).

La crue de janvier 2004 présentait initialement un débit de mobilisation de 225 m<sup>3</sup>/s à Sauheid (0.7  $Q_b$ ). Les résultats précédents ont permis de déterminer le débit journalier, horaire à Sauheid qui sont respectivement de 300 et 315 m<sup>3</sup>/s. La valeur du débit mobilisateur de l'Ourthe a pu être réévaluée à 294 m<sup>3</sup>/s soit 0.9  $Q_b$ .

Houbrechts *et al.* (2015), montraient, pour un débit à plein bord de 300 m<sup>3</sup>/s, que les galets possédant un axe b compris entre 83 et 128 mm se déplaçaient à Sauheid. Le débit de mise en mouvement de la charge de fond est de l'ordre de 0.65  $Q_b$  soit 200 m<sup>3</sup>/s (Houbrechts *et al.*, 2015). Ces valeurs sont issues de l'utilisation de la relation empirique entre la puissance spécifique et le  $D_{\text{max}}$  mobilisé.

Plus récemment, le 20 janvier 2022, 150 galets possédant des PIT tags (Passive Integrated Transponder) ont été injectés au niveau d'Esneux. Le débit maximal horaire observé est de 206 m<sup>3</sup>/s (0,65  $Q_b$ ). Pour un débit de cette ampleur, 59% des éléments injectés ont été mobilisés et ils possédaient en moyenne un axe b de 78 mm. Les résultats de ces relevés ont également montré que 14 % des galets mobilisés se déplacent sur une distance supérieure à 10 m. Le débit observé est inférieur au débit critique de mise en mouvement proposé par Houbrechts *et al.* (2006), correspondant à un seuil de mobilisation à 0,77  $Q_b$ . Toutefois, ces résultats correspondent au premier relevé après injection c'est-à-dire que les galets n'étaient pas encore imbriqués en position naturelle ce qui a pu faciliter leur mobilisation (Eme *et al.*, 2022). Puisque l'injection des PIT tags était postérieure à la crue de juillet 2021, il n'y a pas d'informations sur la distance parcourue par la charge de fond durant cet événement.

Le site d'Esneux a été curé entraînant ainsi la perte des galets pucés. Ainsi, une injection de galets a été réalisée au niveau de la station limnigraphique de Tabreux en septembre 2022. Ce site présente une localisation intéressante puisqu'il se trouve à proximité de la station de Tabreux. Il n'y a donc pas de nécessité de transposer les valeurs de débit. Cet endroit n'étant pas un site de curage, il est possible de

réaliser un suivi scientifique. Dans un premier temps, une injection de 100 galets avec un  $D_{50}$  de 60 mm et un  $D_{90}$  de 84 mm a été effectuée et dans un second temps, une seconde injection de 48 galets avec un  $D_{50}$  de 70 mm et un  $D_{90}$  de 135 mm (Eme *et.al*, 2022).

Le 11 mai 2022, un relevé a été réalisé sur le site de Petit Han où 110 galets avec PIT tags avaient été injectés en décembre 2020. Entre l'injection (2020) et le relevé (2022), plusieurs crues ont eu lieu.

- Une crue de l'ordre du débit à plein, bord le 24/12/2020 :  $Q_h = 113 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station de Durbuy
- Une crue supérieure au débit à plein bord le 30/01/2021 :  $Q_h = 169 \text{ m}^3/\text{s}$
- Une crue nettement supérieure au débit à plein bord le 15 juillet 2021 :  $Q_h = 430 \text{ m}^3/\text{s}$  (à Durbuy et  $413 \text{ m}^3/\text{s}$  à Petit Han).

Les déplacements des galets ne sont pas uniquement dûs à la crue de juillet 2021. Au total des trois évènements, 97% des éléments ont été mobilisés avec un taux de récupération de 100 %. Les galets possédant un axe b de 34 mm ont parcouru la plus grande distance soit 397 m (Eme *et al.*, 2022).

Finalement, un relevé de PIT tags a pu être réalisé sur le site de Tabreux en 2023. Les résultats montrent un taux de galets mobilisés de 36% pour un débit horaire de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  soit  $0.81 Q_b$  ( $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ) pour un taux de récupération de 91.9%. La distance maximale de déplacement est de 116.4 m. Les galets possédant un axe b compris entre 32 et 64 mm se déplaçaient d'une distance supérieure à 25 m (Brault, 2023). Il est important de préciser que le site de Tabreux se trouve en amont du site d'Esneux et que les deux sites sont séparés par la confluence avec l'Amblève ce qui génère une augmentation de débit au niveau d'Esneux. Cependant, selon Brault (2023), les puissances spécifiques des deux sites possèdent le même ordre de grandeur et provoquent ainsi un déplacement semblable de la charge de fond. Ainsi, la vitesse de la charge de fond devrait être de l'ordre de  $8.25 \text{ m/an}$  (Brault, 2023).

De plus, la littérature peut également fournir des informations sur la vitesse d'avancée de la charge de fond à l'aide de l'étude des scories. Celles -ci possèdent une vitesse maximale de propagation dans l'Ourthe de l'ordre de 1,9 à 2,5 km/siècle.

L'ensemble de ces informations peut être comparé aux résultats issus de la modélisation numérique. La littérature exprime qu'en moyenne le débit mobilisateur de l'Ourthe est compris entre  $0.65 Q_b$  et  $0.77 Q_b$  soit respectivement  $200$  et  $231 \text{ m}^3/\text{s}$  avec une valeur maximale de débit mobilisateur de  $0.94 Q_b$  soit  $282 \text{ m}^3/\text{s}$  pour un débit à plein bord de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . De plus, les galets mobilisés présentent un axe b moyen de 78 mm à Esneux pour la crue de janvier 2022. En outre, les résultats des simulations numériques ne présentent pas les mêmes tendances. En effet, la Figure 22 montrait qu'un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  de même ordre de grandeur que le débit à plein bord, entraîne peu de déplacements de galets possédant un axe b de 42 mm ( $D_{16}$ ). De plus, la Figure 28 montrait également que pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , les galets possédant un axe b de 71 mm équivalent au  $D_{50}$  ne présentent aucun déplacement.

Ainsi, la modélisation numérique semble sous – estimer le charriage au sein de la boucle de l'Ourthe en aval d'Esneux. Pour tenter de vérifier cette sous-estimation, une validation à l'aide de mesures de terrain a été réalisée. Celle – ci sera explicitée dans la partie suivante.

## 6.2. Validation terrain des résultats

Pour analyser les différences entre les résultats des simulations numériques et les valeurs renseignées par la littérature, une validation à l'aide de données prélevées sur le terrain a été réalisée.

Vingt mesures d'altitude de surface libre ont été mesurées à l'aide d'un récepteur GNSS RTK (Annexes 45 & 46) pour un débit de  $42.8 \text{ m}^3/\text{s}$  (hydrometrie.wallonie.be, 2024). Le récepteur GNSS RTK fonctionne suivant le principe du positionnement différentiel basé sur les phases. C'est-à-dire à l'aide d'une station de référence, dont on connaît la position, qui calcule des corrections améliorant le positionnement à l'aide des phases. Le système de référence des corrections est le ETRS89 au sein du réseau de station Centipède. Les coordonnées sont ensuite converties en Lambert 72 à l'aide du logiciel cConvert. Un point de référence a également été échantillonné pour écarter une erreur de mesure venant du GNSS. Une différence de 4.8 cm est observée entre le point IGN au niveau du pont d'Esneux (Annexe 47) et la mesure du GNSS RTK. Ce débit de  $42.8 \text{ m}^3/\text{s}$  correspond à la moyenne des valeurs de débit observées lors des trois heures de terrain. En parallèle, une simulation numérique avec un débit équivalent a été réalisée avec les mêmes conditions limite aval que les simulations précédentes soit un nombre de Froude égal à 0.4 (Annexe 48). Les résultats des 10 premiers points échantillonnés issus du terrain et de la simulation numérique ont été comparés au sein de la Figure 49 et répertoriés au sein du tableau à l'Annexe 49.

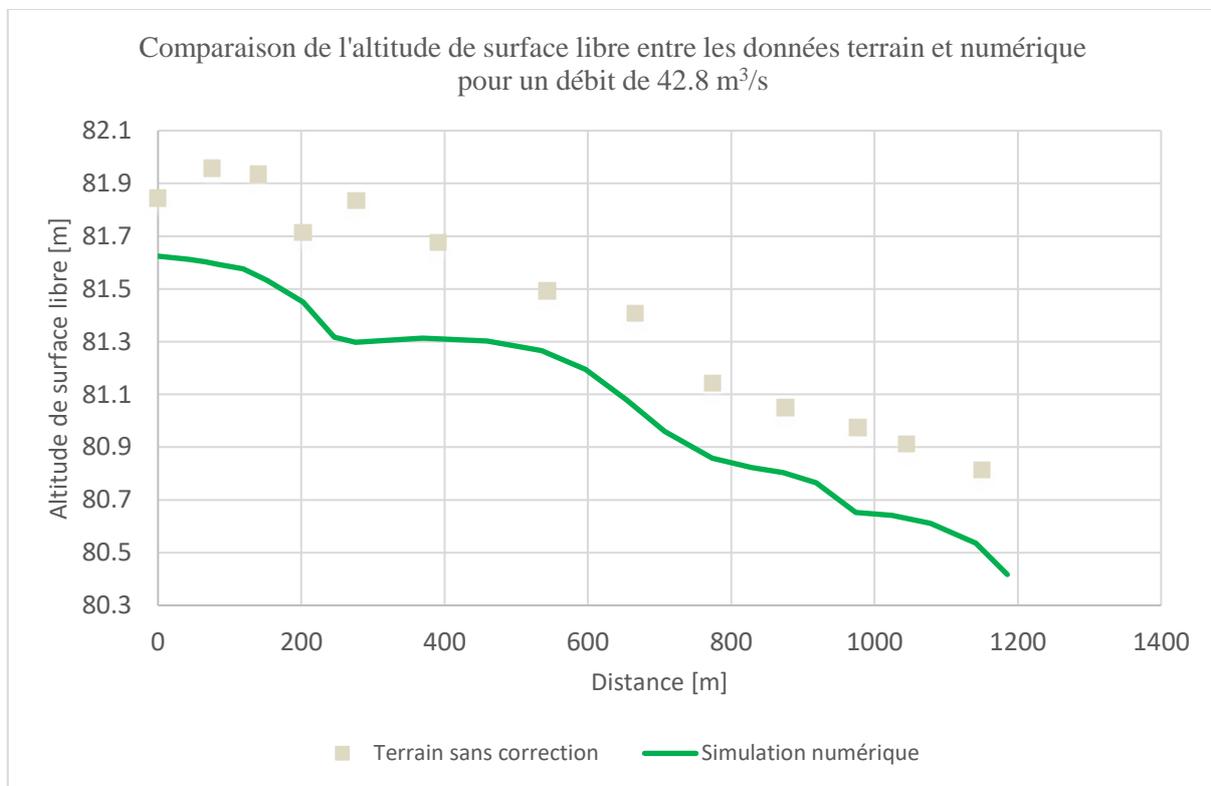


Figure 49. Comparaison de l'altitude de surface libre entre les données terrain et numérique pour un débit de  $42.8 \text{ m}^3/\text{s}$  pour les 10 premières coordonnées.

La comparaison des données terrain et des données numériques possédant comme condition limite un nombre de Froude égal à 0.4, montre un décalage de 30 cm en moyenne. Les observations issues du terrain présentent une altitude de surface libre supérieure aux données numériques possédant comme condition limite un nombre de Froude égal à 0.4. Ainsi, pour que les deux jeux de données soient égaux, il est nécessaire que l'altitude de surface libre des données numériques augmente. Pour ce faire, plusieurs tests ont été réalisés. Dans un premier temps, l'altitude de plusieurs points « fixes » au niveau du Ravel et des protections de berges a été mesurée (Figure 50 & 51).

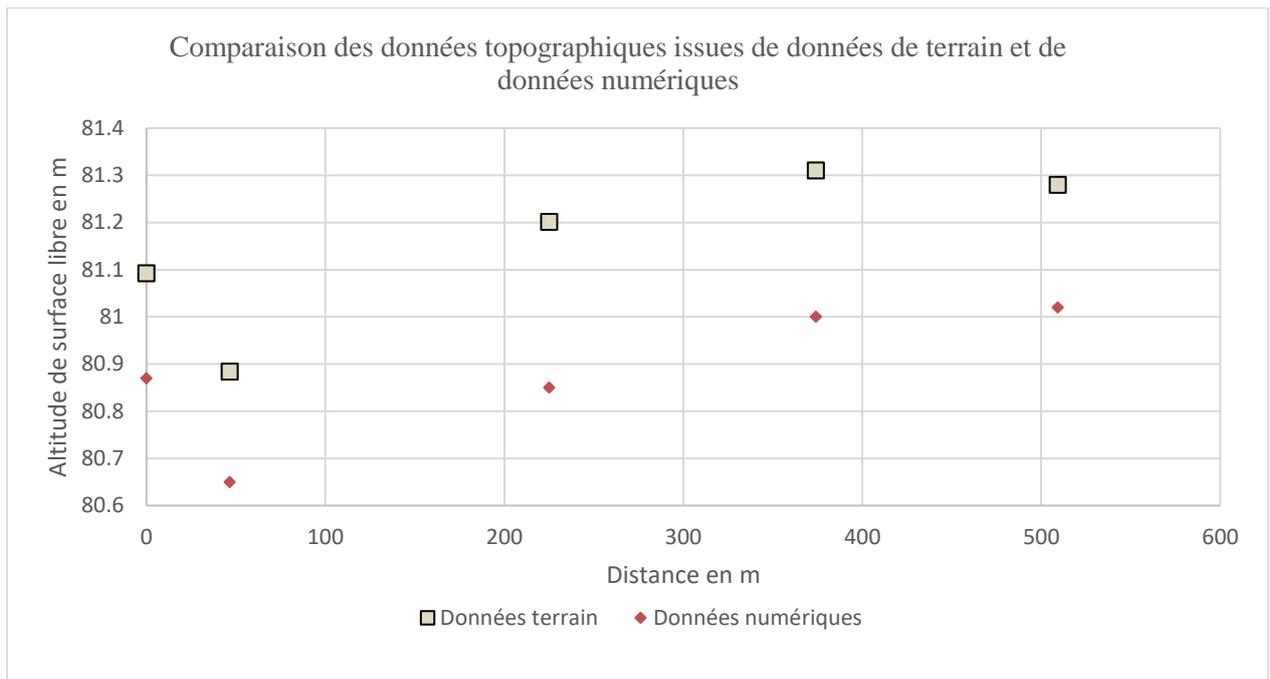


Figure 50. Comparaison des données topographiques issues de données de terrain et de données numériques.



Figure 51. Points Fixes pour comparer l'altitude de surface libre. Source : Photos personnelles.

On remarque qu'il existe une différence de l'ordre de 30 cm en moyenne entre les données altimétriques issues du terrain et celles de la topographie des simulations numériques issues de l'altimétrie LiDAR de 2002. Cette différence est attribuée à un problème de calage du LiDAR à l'époque. Cette différence a déjà été observées sur la Vesdre à Eupen.

Ensuite, plusieurs conditions limites ont été testées pour déterminer d'où proviendrait l'écart entre le modèle et la littérature et pour déterminer si la condition limite initialement choisie est la plus adéquate aux valeurs observées sur le terrain (Figure 52). Cinq conditions différentes ont été testées. Dans un

premier temps, en variant uniquement le nombre de Froude comme condition limite aval, un imposé à 0.2 et l'autre imposé à 0.3. Ensuite, une simulation dont le coefficient de frottement de 0.0238 a été augmenté de 30% a été réalisée. Finalement, ces deux conditions ont été combinées pour former deux simulations supplémentaires. La première avec un nombre de Froude de 0.3 comme condition limite aval et un coefficient de Manning augmenté de 30%. La seconde, avec un nombre de Froude de 0.2 comme condition limite aval et un coefficient de Manning augmenté de 30%.

On remarque que les données issues de la simulation avec comme condition limite un nombre de Froude de 0.4 sont les plus proches des données de terrain corrigée de l'écart lié au LiDAR. Par souci de visualisation, les résultats des simulations possédant les conditions limites imposées suivantes n'ont pas été retranscrits sur le graphique puisqu'ils étaient similaires et se superposaient sur le graphique. Un nombre de Froude de 0.2 et un nombre de Froude de 0.2 avec un coefficient de frottement augmenté de 30%. L'intérêt d'augmenter le coefficient de Manning est de rehausser l'altitude de surface libre et voir si cette élévation concorde avec les valeurs mesurées sur le terrain.

Ces observations montrent que la différence observée entre les données numériques et les données de terrain serait uniquement due à ce problème de calage lors du levé lidar.

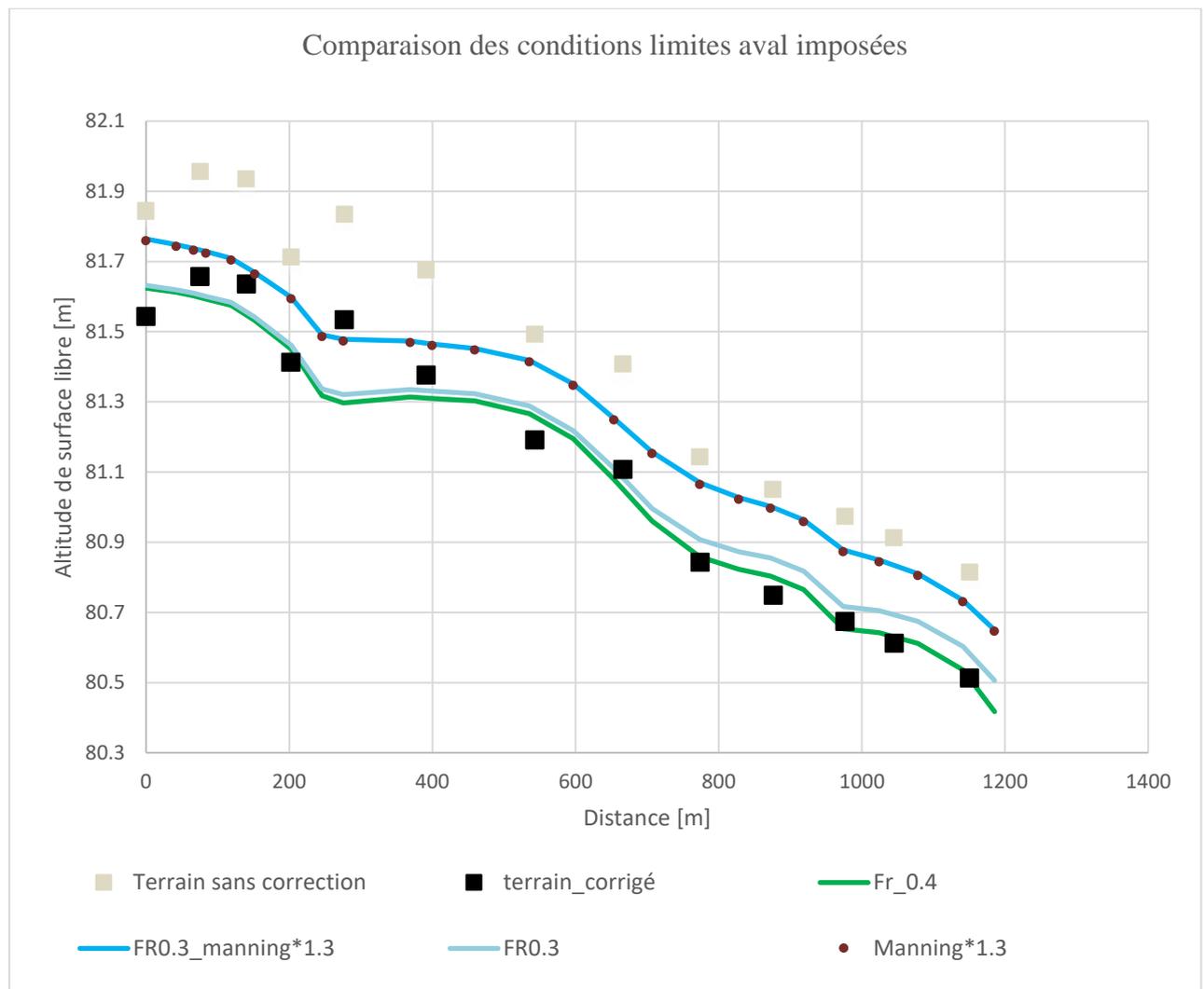


Figure 52. Comparaison des conditions limites imposées comparées aux données de terrain corrigée de 30 cm.

### 6.2.1. Analyse de sensibilité

Pour s'assurer de la validité des résultats, il est nécessaire de tester la sensibilité des paramètres exploités comme conditions limites dans la comparaison des résultats numériques et de terrain. L'analyse de sensibilité est réalisée en termes de mise en mouvement des sédiments. Les Figures suivantes illustrent la mise en mouvement des sédiments pour un débit équivalent au débit à plein bord en fonction des conditions imposées. Dans l'ensemble de ces situations, la taille des galets imposés est équivalente à celle du  $D_{16}$  soit 42 mm.

La Figure 53 présente les valeurs du paramètre de Shields pour une simulation possédant un nombre de Froude égale à 0.4 comme une condition limite aval. Cette condition limite correspond à celle imposée aux simulations présentées au sein de la partie résultats.

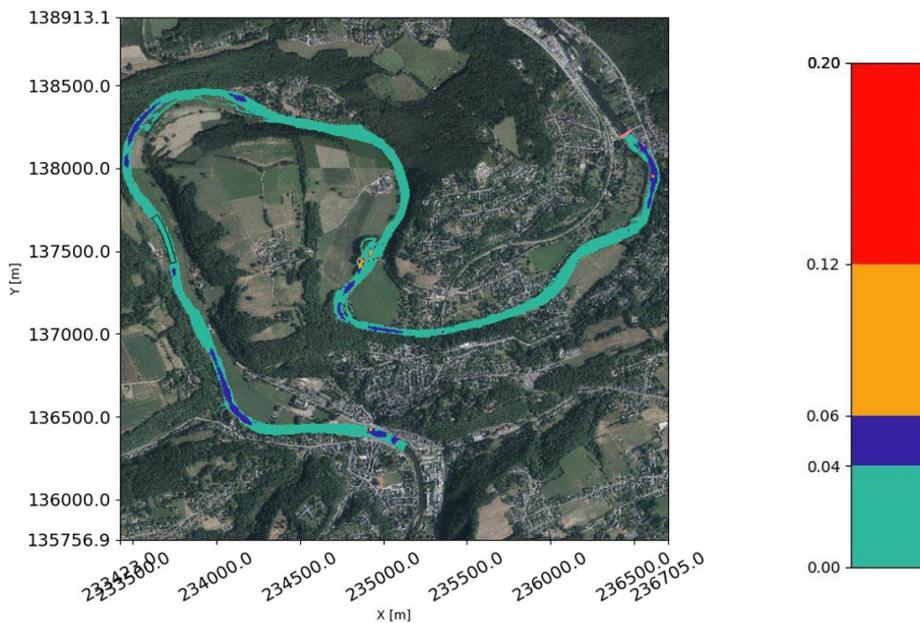


Figure 53. Valeurs du paramètre de Shields pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  et un nombre de Froude de 0.4 imposé condition limite aval.

La Figure 54, quant – à – elle, présente le paramètre de mise en mouvement de la charge de fond, avec cette fois – ci un nombre de Froude de 0.3 imposé comme condition limite aval. L'analyse de sensibilité ne sera pas réalisée pour une condition limite aval possédant un nombre de Froude de 0.2. Les deux situations, avec comme seul paramètre variant la condition limite aval de Froude, montre peu de variations du paramètre de Shields. On remarque cependant une perte d'initiation au mouvement dans la partie la plus aval de la Figure 54. On en déduit alors que la variation du nombre de Froude comme condition limite aval est assez peu sensible en ce qui concerne la mise en mouvement de la charge de fond pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cette absence de sensibilité du nombre de Froude imposé comme condition limite aval avait été mise en évidence lors du choix de la condition limite aval dans la partie méthodologie. En effet les Figures 13, 14, 15 & 16 montraient que le nombre de Froude pouvait être considéré comme un paramètre robuste entraînant peu de variations lorsqu'il est modifié. De plus, la Figure 52 montre peu de variations d'altitude de surface libre, de l'ordre du centimètre au maximum, pour un débit de  $42.8 \text{ m}^3/\text{s}$  entre une condition limite aval possédant un nombre de Froude de 0.4 et un de 0.3.

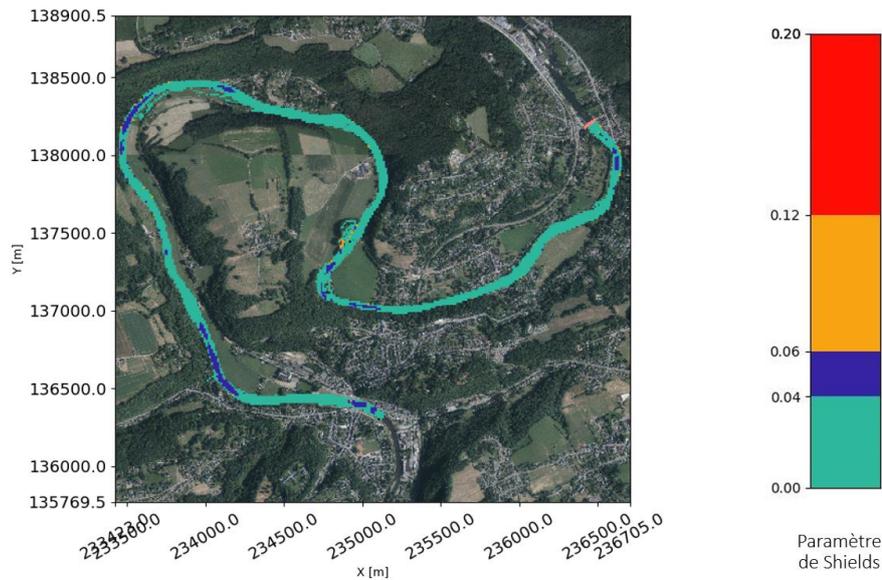


Figure 54. Valeurs du paramètre de Shields pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  et un nombre de Froude de 0.3 imposé condition limite aval. La couleur noire représente les valeurs dépassant l'échelle de mesure.

La Figure 55 présente la mise en mouvement de la charge de fond pour une condition limite aval possédant un nombre de Froude égale à 0.4. Le coefficient de frottement a été augmenté de 30 %.

Cette configuration montre légèrement plus de variations que la modification de la condition limite aval de Froude. En effet, les Figures 53 et 55 semblent présenter globalement des valeurs de paramètres de Shields similaires. On remarque néanmoins une légère augmentation de l'extension des zones présentant une valeur de Shields comprise entre 0.04 et 0.06. A l'aval du domaine, on observe également l'élévation de la valeur du paramètre et la mise en mouvement de la charge de fond. En effet, on observe des valeurs comprises dans l'intervalle  $[0.06 - 0.12]$ . Un diamètre équivalent au  $D_{50}$  a également été testé et aucune mise en mouvement est constatée pour des galets de cette dimension. La sensibilité du coefficient de frottement semble dès lors légèrement plus sensible que celle associée au nombre de Froude.

Ainsi, l'analyse de sensibilité des paramètres semble montrer que la condition limite aval de Froude présente une plus faible instabilité que celle imposée au coefficient de frottement. Cependant, les deux paramètres semblent robustes.

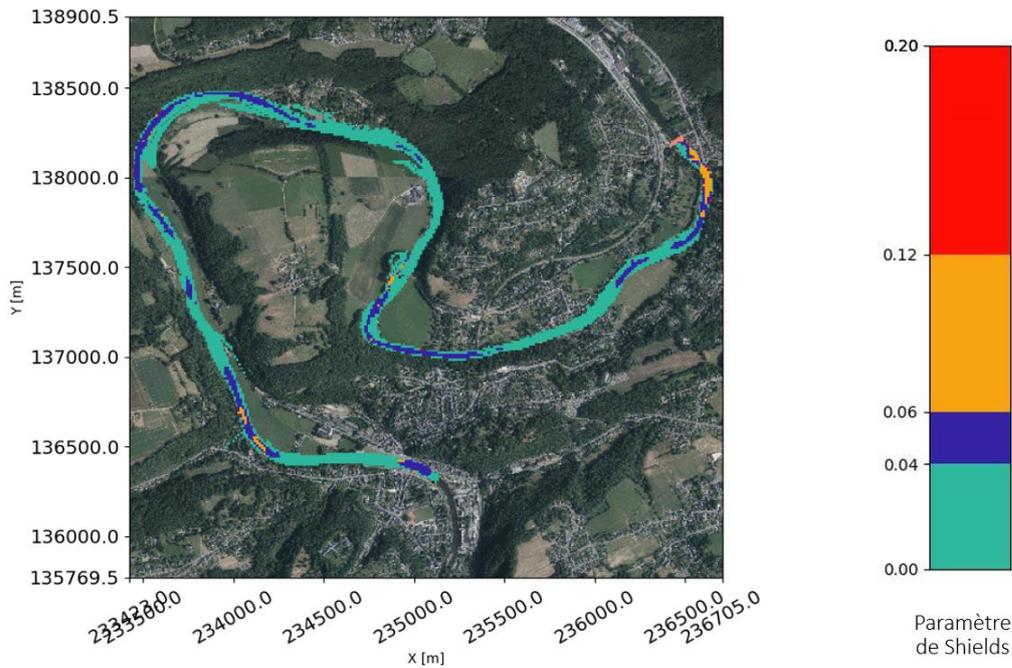


Figure 55. Valeurs du paramètre de Shields pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , un diamètre des galets de  $42 \text{ mm}$ , un nombre de Froude de  $0.4$  imposé condition limite aval et un coefficient de frottement augmenté de  $30 \%$ .

### 6.3. Choix de la simulation optimale

Dans cette partie, il sera question, sur base des recherches bibliographiques des résultats des simulations numériques, de déterminer la configuration optimale de réinjection de galets provoquant le moins d'impact sur la ligne d'eau et sur la création de possibles débordements supplémentaires.

Premièrement, sur base des différents paramètres testés au travers des simulations présentées au sein de la méthodologie, il sera question de déterminer la configuration optimale minimisant l'impact sur l'élévation de la ligne d'eau.

Le premier paramètre testé est le diamètre du matériel injecté. Il semblerait que la Figure 28 montre l'absence de déplacement pour des galets possédant un axe  $b$  équivalent au  $D_{50}$  soit  $71 \text{ mm}$  pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Il est donc préférable d'injecter des galets possédant un axe  $b$  inférieur pour éviter les atterrissements. Concernant la configuration optimale de réinjection, un diamètre équivalent au  $D_{16}$  soit  $42 \text{ mm}$ , sera imposé aux galets réinjectés. Cependant, force est de constater que la réinjection numérique est effectuée en réhaussant la topographie en un seul bloc. En effet, la réinjection est analysée suivant un aspect macroscopique à l'échelle de l'ensemble de la zone de réinjection. De fait, sur base de la manière dont les réinjections ont été réalisées numériquement, il n'est pas possible d'analyser le transport et la réinjection à l'échelle des galets. Ainsi, la zone de réinjection possède des propriétés uniformes négligeant les interactions entre les galets. Notons qu'il existe du frottement et de l'abrasion entre les galets pouvant impacter le transport de la charge de fond ainsi que le déplacement des galets. En effet, le frottement et l'abrasion réduisent la taille des éléments ce qui va faciliter leur mise en mouvement. Le second inconvénient de ne pas travailler à l'échelle du galet est qu'il n'est pas possible d'imposer une taille différente aux galets présents dans la réinjection de celle du reste du matériel de fond. Il n'est donc pas directement possible de voir l'impact du diamètre des galets présents uniquement dans la réinjection.

Le second paramètre testé est le débit. Les résultats découlant des simulations analysant l'impact du débit montraient que plus le débit est élevé, plus l'impact sur l'altitude de surface libre est négligeable. L'élévation de la ligne d'eau était de l'ordre de 1 m pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/s alors que pour un débit de 300 et de 726 m<sup>3</sup>/s elle est de l'ordre de 0.05 m. La simple modification du débit n'entraîne pas l'apparition de zone d'augmentation du paramètre de Shields après réinjection. Ainsi, pour la configuration optimale, il est intéressant d'utiliser un débit de 300 m<sup>3</sup>/s entraînant moins de variations d'altitude de surface libre qu'un débit de 150 m<sup>3</sup>/s. Prenons en compte que les débits ont été considérés comme stationnaires même pour le débit de 726 m<sup>3</sup>/s équivalent à une inondation d'une récurrence de 25 ans. Ernst *et al.* (2010), des comparaisons ont été effectuées entre les modèles d'inondation prédits par des simulations d'écoulement instable et les modèles d'inondation calculés en supposant un écoulement stable. Ils ont montré que les résultats issus des deux types d'écoulement concordent très bien. Par conséquent, une hypothèse d'état stationnaire est validée pour simuler les conditions d'écoulement des rivières du massif des Ardennes lors d'inondations. Cette hypothèse a l'avantage supplémentaire d'un temps d'exécution réduit.

Le troisième paramètre testé est le volume de la réinjection. Deux volumes ont été testés : le premier équivalent au charriage annuel soit 2500 m<sup>3</sup> et le second équivalent à la moitié du charriage annuel soit 1250 m<sup>3</sup>. Les deux volumes de réinjection présentaient une élévation de la ligne d'eau de l'ordre de 0.05 m à l'amont de la réinjection. Cependant, pour un volume de 2500 m<sup>3</sup>, on remarque que l'élévation de la ligne d'eau est plus étendue vers l'amont que pour la situation où le volume est équivalent à 1250 m<sup>3</sup>. Pour la configuration optimale, les deux volumes ne semblent pas avoir excessivement d'impact sur l'élévation de la ligne d'eau (de l'ordre de 0.05 m). Dès lors les deux volumes peuvent être injectés. Le choix du volume de la réinjection sera ainsi porté sur un volume équivalent au charriage annuel dans le cadre d'une configuration optimale.

Le quatrième paramètre testé est la localisation de la réinjection. Trois localisations ont été testées : dans l'axe rectiligne du méandre, dans la boucle du méandre et au sein d'une zone présentant un paramètre de Shields initial plus élevé. Le choix de la localisation n'a pas d'impact sur l'élévation de la ligne d'eau. En effet, pour l'ensemble des trois localisations, l'élévation de la ligne d'eau est de l'ordre de 0.05 à 0.1 m. Cependant, l'apparition de déplacements supplémentaires a été observée, après réinjection pour les localisations au niveau de la boucle du méandre et au sein d'une zone présentant un paramètre de Shields initial plus élevé. Ces deux localisations de réinjection présentent l'apparition de valeurs plus élevées pour le paramètre de Shields après réinjection. La localisation au niveau de la boucle du méandre présente un avantage supplémentaire ; celui de se trouver le plus éloigné de la ville d'Esneux et des habitations ce qui entraîne donc le moins de dégâts possibles. C'est pourquoi, pour la configuration optimale de réinjection, la localisation au sein de la boucle de méandre sera choisie vu qu'elle présente les mêmes variations d'élévation de la ligne d'eau que les deux autres localisations mais qu'elle présente l'avantage supplémentaire d'être éloignée des habitations et de créer des valeurs du paramètre de Shields plus élevées.

Finalement, le dernier paramètre testé est le style de réinjection numérique, à savoir la manière dont la topographie est surélevée numériquement. Deux manières de surélévation ont été testées. La première consistait à réaugmenter la topographie de 0.25 m sur chaque pixel afin de permettre, pour un volume fixe de 2500 m<sup>3</sup>, d'avoir une élévation constante d'une hauteur de 0.25 m sur chaque pixel. Cette manière de surélever la topographie entraîne une élévation de la hauteur d'eau en amont de la réinjection de l'ordre de 0.05 m. Le second style de réinjection est un rehaussement de la topographie présentant un bloc d'altitude identique sur chaque pixel. Cette seconde manière de surélever la topographie, présente des valeurs identiques à celles observées avec le premier style de réinjection de part et d'autre de la zone de réinjection. Ainsi, l'amont des réinjections présente une variation d'altitude de surface libre de 5 cm,

une variation de hauteur de 10 cm et une variation de la norme des vitesses de 5 cm/s. L'aval des deux réinjections présente peu de variations d'altitude, de hauteur et de vitesse. Néanmoins, les zones de réinjection présentaient des tendances différentes. Le premier style de réinjection présentait des variations plus faibles et plus homogènes sur l'ensemble de la zone. L'altitude de surface libre variait de  $-5\text{ cm}$  à  $+5\text{ cm}$ , la hauteur diminuait de 30 cm et la vitesse augmentait de 10 cm/s. Le second style de réinjection numérique présente des variations plus contrastées ou plus importantes que la réinjection à hauteur constante. En effet, après réinjection, la hauteur d'eau diminue deux fois plus et la norme des vitesses augmente trois fois plus qu'avec le premier style de réinjection. En ce qui concerne la variation du paramètre de Shields, elle semble assez identique entre les deux types de réinjection. Cependant, l'initiation au mouvement, c'est-à-dire lorsque les valeurs du paramètre de Shields dépassent 0.04, ne se trouve pas aux mêmes endroits dans les deux zones de réinjection. D'une part, lorsque la réinjection s'effectue selon une hauteur d'élévation constante, l'initiation aux déplacements est présente en aval de la réinjection. Tandis que lorsque le volume de réinjection est placé à altitude constante, l'initiation aux mouvements est présente au milieu de la réinjection. La superficie observée avec le premier style de réinjection semble être plus importante que celle observée avec le second style.

Sur la base de ces observations, il semble préférable d'opter pour le premier style de réinjection afin de rehausser la topographie de la configuration optimale de réinjection. En effet, ce style de réinjection engendre des variations plus faibles et semble plus stable que le rehaussement de la topographie à altitude constante sur l'ensemble du bloc de réinjection.

Ces paramètres sont combinés dans une seule simulation (Figure 56 et 57). Cette simulation présente les caractéristiques suivantes : un débit de  $300\text{ m}^3/\text{s}$ , un volume de  $2500\text{ m}^3$ , un diamètre des galets injectés de 42 mm, une localisation au sein du méandre et une élévation de la topographie à hauteur constante de 0,25 m sur chaque pixel.

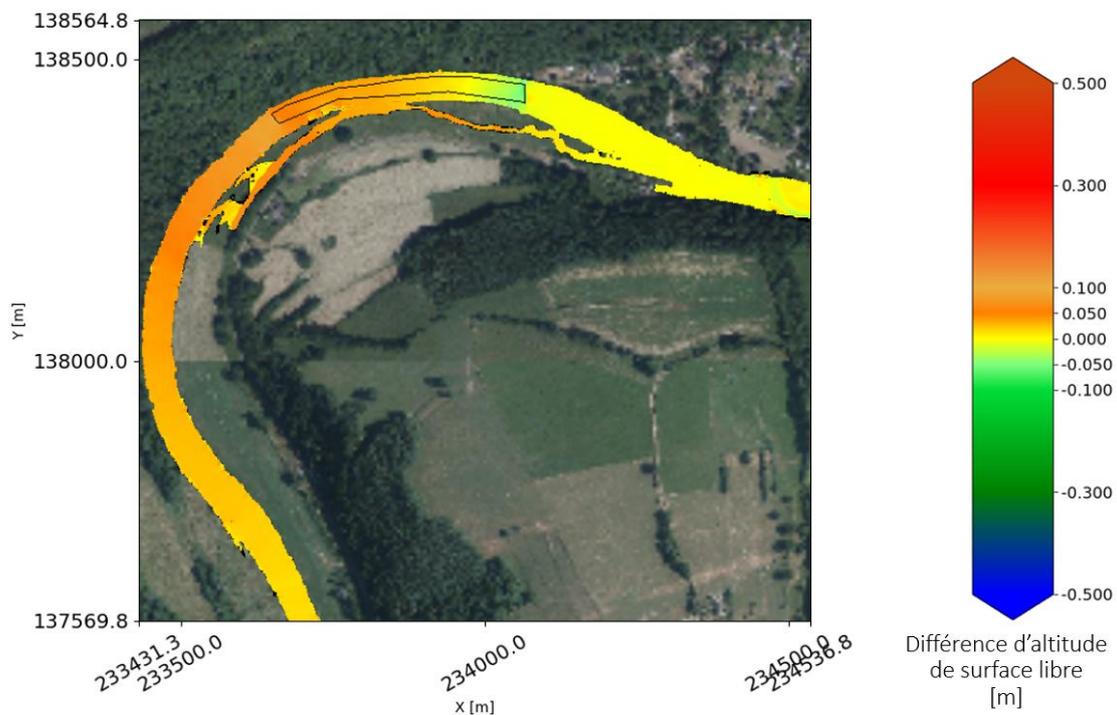


Figure 56. Différences d'altitudes de surfaces libres avant/ après réinjection pour une simulation optimale de réinjection.

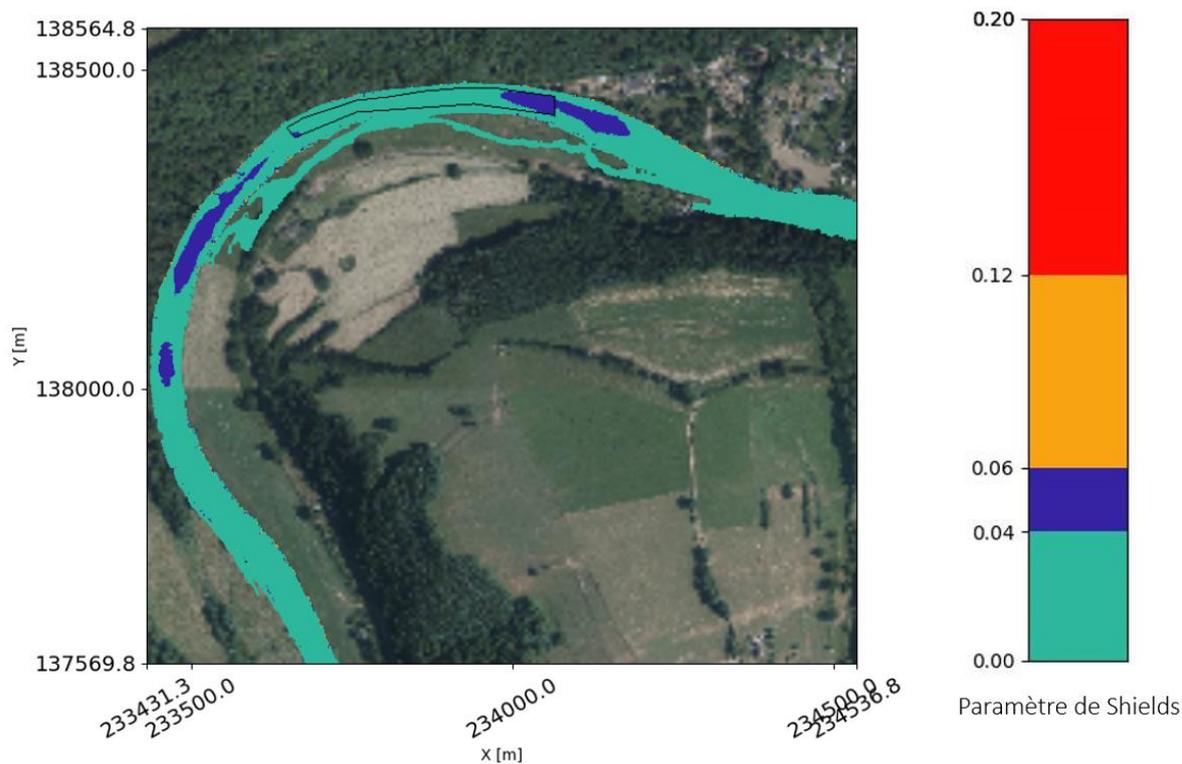


Figure 57. Paramètre de Shields après réinjection pour une simulation optimale de réinjection.

#### 6.4. Discussion & Amélioration

L'échelle utilisée pour analyser les valeurs du paramètre de Shields et la mise en mouvement des galets est également à relativiser par rapport aux valeurs de mise en mouvement de la littérature. De fait, celle – ci exprime la mise en mouvement des galets et un transport significatif des galets lorsque la valeur du paramètre de Shields dépasse une valeur seuil de respectivement 0.06 et 0.12. Or, la littérature montre que le transport peut déjà avoir lieu pour des valeurs du paramètre de Shields inférieures. En effet, Piasny (2024) estime le seuil de mobilité des galets à 0.035. De plus, Petit *et al.* (2015), considèrent que la mobilité des galets peut déjà avoir lieu pour une valeur seuil du paramètre de Shields comprise entre 0.03 et 0.06. Il aurait été intéressant de diviser la classe [0, 0.04] pour pouvoir correctement comparer à la littérature.

Il serait intéressant, pour perfectionner la méthodologie, de réduire la zone et de réaliser une analyse des profils du fond du lit à une échelle plus fine. Cela augmenterait la précision et réactualiserait les données anciennes. Des profils supplémentaires ont été réalisés au Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale (LHGF) par Estelle Brault sous la direction de Geoffrey Houbrechts (Annexe 50). Ce stage s'organisait dans un projet de recommandations d'étude de gestion des atterrissements et l'utilité des dragages demandée par le SPWMI (Service Public de Wallonie Mobilité Infrastructures, Direction des Voies Hydrauliques de Liège) au laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale (LHGF). Les profils en travers ont donc pu être effectués au RTK et à la station totale (Brault, 2023). Ces profils pourraient être potentiellement utilisés et réintégrés dans le modèle. Ainsi, les profils réalisés en 2023 montrent des variations par rapport aux profils de 1986 et 1989, soit par la présence d'une forte incision en amont et directement en aval d'Esneux, soit avec une faible incision située en aval d'Esneux. Cette incision est due à une alternance de crues et dragages, accentuée par le retrait du barrage d'Esneux (Brault, 2023).

De plus, un suivi de PIT Tags au niveau de la boucle de l'Ourthe, amènerait l'amélioration des connaissances sur le transport de la charge de fond. Cela permettrait de renforcer les données obtenues sur base des simulations numériques. Il était initialement prévu que ce suivi soit intégré dans ce mémoire. Cependant, au vu des précipitations des derniers mois, il n'a pas pu être réalisé et donc utilisé à cet effet.

## 7. Conclusion

Cette étude a tenté de déterminer la configuration optimale pour une recharge sédimentaire au sein de la boucle de l'Ourthe à l'aide de simulations numériques réalisées avec le modèle intégré WOLF. La configuration optimale de réinjection a pour objectif de minimiser son impact sur l'allure de la ligne d'eau.

Les résultats des simulations ont révélé une sous-estimation du charriage et une surestimation du débit de mise en mouvement de la charge de fond par le modèle comparé à la littérature. En effet, la littérature estime que le débit mobilisateur de la charge de fond sur l'Ourthe est de l'ordre de  $0.65 - 0.77 Q_b$  soit compris entre 200 et 231 m<sup>3</sup>/s. Cependant, les simulations numériques ont montré pour un débit équivalent au débit à pleins bords, peu de zones présentant une mise en mouvement du matériel de fond. De plus, la littérature exprimait que les galets mis en mouvement à Esneux possédaient un axe b de l'ordre de 78 mm pour un débit de 206 m<sup>3</sup>/s ( $0,65 Q_b$ ). Or, la modélisation a montré une absence de mouvement pour des galets avec un axe b équivalent au  $D_{50}$  soit 71 mm.

Les écarts entre la littérature et les résultats issus des simulations ont conduit à la nécessité de réaliser une validation à l'aide de mesures de terrain. Celle-ci a montré la présence d'un écart entre les observations de terrain et celles issues de simulations numériques. Cet écart est possiblement lié à un problème dans le calage du Lidar à l'époque du levé d'altimétrie.

Les résultats ont néanmoins permis de déterminer une configuration de réinjection optimale minimisant l'élévation de la ligne d'eau et favorisant la mise en mouvement de la charge de fond. Cette configuration impliquerait un volume équivalent au charriage annuel, serait située au sein du méandre, comprendrait des galets ayant un axe b d'environ 42 mm, un débit de 300 m<sup>3</sup>/s, et une réinjection numérique à hauteur constante. Avec une telle configuration, l'élévation de la ligne d'eau en amont de la réinjection serait comprise entre 0.05 m et 0.1 m et la diminution de l'altitude de surface libre directement en aval de la réinjection serait d'environ 0.05 m. Globalement, la majeure partie du domaine présenterait peu de variations d'altitude.

Notons que pour l'amélioration de la méthode et ainsi des résultats observés, il serait pertinent de réactualiser les données topographiques du fond du lit pour qu'elles collent mieux avec la réalité actuelle. Des profils ont été réalisés l'été dernier et pourraient être inclus dans le modèle pour renforcer la validité de celui-ci. Qui plus est, un suivi de l'avancement de la charge de fond à l'aide de traceurs PIT tags pourrait permettre de déterminer avec plus d'assurance le seuil de mise en mouvement de la charge de fond.

En conclusion, ce mémoire met en avant l'importance de combiner la modélisation numérique avec des validations sur le terrain pour développer des stratégies de restauration à l'aide de réinjections de galets.

## Bibliographie

- Actu-Environnement (2015). Définition de Atterrissement. Actu-environnement. Consulté le 28 novembre 2023, à l'adresse : [https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/atterrissement.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/atterrissement.php4)
- Ancey, C (s.d.). Cours de mécanique des fluides, chapitre 5 : écoulement à surface libre. *École polytechnique fédérale de Lausanne*. Consulté le 9 février 2024 à l'adresse : <https://lhe.epfl.ch/cours/bachelor/slides/chapitre5.pdf>
- Arnaud, F., Piégay, H., Béal, D., Collery, P., Vaudor, L., & Rollet, A.-J. (2017). Monitoring gravel augmentation in a large regulated river and implications for process-based restoration. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(13), 2147-2166. Scopus. <https://doi.org/10.1002/esp.4161>
- Arnaud, F., Schmitt, L., (2018). Carte à la une : reconstituer le rhin disparu. URL: <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/a-la-une/carte-a-la-une/reconstituer-rhin-disparu>. Archive Location: ISSN : 2492-7775 Publisher: Ecole normale supérieure de Lyon.
- Battisacco, E., Franca, M. J., & Schleiss, A. J. (2016). Sediment replenishment : Influence of the geometrical configuration on the morphological evolution of channel-bed. *Water Resources Research*, 52(11), 8879-8894. <https://doi.org/10.1002/2016WR019157>
- Bernimolin, J., Renard, M., Tijssens, J.P., Lemaire, V. & Primolin J. (1993). L'Ourthe au fil du temps. *Les cahiers du MET, ministère wallon de l'équipement et des transport, Direction générale des voies hydrauliques, collections actualités, 5*. Consulté le 3 mai 2024.
- Bravard, J.-P., & Petit, F. (1997). Les cours d'eau, dynamique du système fluvial. *Revue Géographique de l'Est*, 40(1-2), Article 1-2. <https://doi.org/10.4000/rge.4253>
- Biodiversite.wallonie.be (s.d.). Les projets LIFE en Wallonie. Consulté 23 novembre 2023, à l'adresse <http://biodiversite.wallonie.be/fr/projets-life.includehtml?IDC=3260>
- Biodiversite.wallonie.be (s.d.). Natura 2000 en Wallonie | La biodiversité en Wallonie. Consulté 23 novembre 2023, à l'adresse <http://biodiversite.wallonie.be/fr/natura-2000.html?IDC=829>
- Brault E., 2023. Évolution hydromorphologique de l'Ourthe à Esneux, Belgique, Rapport de stage pratique de l'ingénieur, Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie, Université de Liège, 35 p.
- Brousse, G., Arnaud-Fassetta, G., Liébault, F., Bertrand, M., Melun, G., Loire, R., Malavoi, J.-R., Fantino, G., & Borgniet, L. (2020). Channel response to sediment replenishment in a large gravel-bed river : The case of the Saint-Sauveur dam in the Büech River (Southern Alps, France). *River Research and Applications*, 36(6), 880-893. <https://doi.org/10.1002/rra.3527>
- Brousse, G., Claude, N., Cordier, F., Loire, R., & Jodeau, M. (2022). 2D morphodynamic modelling as a predictive tool for gravel replenishment: The Saint-Sauveur Dam case study. *International Journal of River Basin Management*, 0(0), 1-14. <https://doi.org/10.1080/15715124.2022.2153857>
- Chardon, V., Schmitt, L., Arnaud, F., Piégay, H., & Clutier, A. (2021). Efficiency and sustainability of gravel augmentation to restore large regulated rivers : Insights from three experiments on the Rhine River (France/Germany). *Geomorphology*, 380, 107639. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107639>

- Chardon, V., Schmitt, L., Piégay, H., Arnaud, F., Serouilou, J., Houssier, J., & Clutier, A. (2018). Geomorphic effects of gravel augmentation on the Old Rhine River downstream from the Kembs dam (France, Germany). *E3S Web of Conferences*, 40, 02028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184002028>
- Collèges communaux d'Esneux et Neupré (2011). *Le Grand Site de la Boucle de l'Ourthe*. Office du Tourisme d'Esneux, 83 pp. Consulté le 10 octobre 2023 à l'adresse suivante : <https://www.esneux.be/uploads/files/pdffiles/Depliants/boucleourthe.pdf>
- CRO (2011). *Les Boucles Condruziennes de l'Ourthe, un plateau profondément creusé*. Contrat de Rivière Ourthe. Consulté le 10 octobre 2023 à l'adresse suivante : [https://www.cr-ourthe.be/wp-content/uploads/2021/02/boucles\\_condruziennes.pdf](https://www.cr-ourthe.be/wp-content/uploads/2021/02/boucles_condruziennes.pdf)
- Czapiga, M. J., Blom, A., & Viparelli, E. (2022). Sediment Nourishments to Mitigate Channel Bed Incision in Engineered Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(6), 04022009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001977](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001977)
- Dierickx, P. & Gailliez, S. (2024). *Stratégie du SPW en matière d'aménagement et de protection des berges de la Vesdre, Ourthe*. SPW, CERES, Liège. Consulté le 07 avril 2024.
- Ek, C., Barchy, L., Marion, J.-M., & Vandenvinne, R. (2004). *Balade géologique le long de l'Ourthe de Liège à Comblain-au-Pont*. Consulté le 2 février 2024.
- Eme A., Van Campenhout J., Imbert C., Vaessen Q. & Houbrechts G. (2022). *Etude Hydromorphologique. Recueil de données sur le transport solide de l'Ourthe et l'Ambève navigables et étude pilote en urgence des atterrissements et du curage à Esneux. Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale, LHGF – ULiège*.
- Ernst, J., Dewals, B. J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S., & Piroton, M. (2010). Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. *Natural Hazards*, 55(2), 181-209. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9520-y>
- Geoportail.wallonie.be (s.d.). Réseau Natura 2000 en vigueur—Série. Consulté 23 novembre 2023, à l'adresse <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/80a837d8-2c0b-4f77-b5d5-824e9780a4ae.html>
- Habersack, H., Jäger, E., & Hauer, C. (2015). Danube River Sediment Transport and Morphodynamics. *Handbook of Environmental Chemistry*, 39, 481-502. Scopus. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13141-4\\_314](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13141-4_314)
- Hallot, E., Houbrechts, G., Levecq, Y. & Petit, F. (2010). Unit stream power as a base for regional river typology. *EGU General Assembly 2010 [communication poster (colloques et congrès scientifiques)]*
- Hallot, E., Houbrechts, G., Mols, J., Levecq, Y. & Petit, F. (s.d). *Techniques de marquage de la charge de fond des rivières : Avantages et inconvénients [communication poster]. Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale – Département de Géographie – Université de Liège*
- Houbrechts G., 2005. *Utilisation des macroscoories et des microscoories en dynamique fluviale : application aux rivières du massif ardennais (Belgique), thèse de doctorat, Université de Liège*, 306 p.
- Houbrechts, G., Hallot, É., Gob, F., Mols, J., Defechereux, O., & Petit, F. (2006). Fréquence et importance du charriage dans les rivières du Massif ardennais. *Géographie physique et Quaternaire*, 60(3), 241-251. <https://doi.org/10.7202/017998ar>

- Houbrechts, G., Levecq, Y., Vanderheyden, V. & Petit, F. (2011). Long-term bedload mobility in gravel-bed rivers using iron slag as a tracer 126, 233 \_ 244. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.006>.
- Houbrechts, G., Levecq, Y., Peeters, A., Hallot, E., Van Campenhout, J., Denis, A.-C., & Petit, F. (2015). Evaluation of long-term bedload virtual velocity in gravel-bed rivers (Ardenne, Belgium). *Geomorphology*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.012>
- Houbrechts, G., Levecq, Y., Vanderheyden, V., & Petit, F. (2011). Long-term bedload mobility in gravel-bed rivers using iron slag as a tracer. *Geomorphology*, 126(1), 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.006>
- Houbrechts, G., & Petit, F. (2003). Utilisation des scories métallurgiques en dynamique fluviale : Détermination de la compétence effective des rivières et estimation des vitesses de progression de leur charge de fond. / Utilisation of métallurgie slags for the study of fluvial dynamics: determination of the effective competency of rivers and estimation of the transit time of sedimentary waves. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 9, 3–12.
- Hydrometrie.wallonie.be. (s. d.). Accueil. Consulté 26 novembre 2023, à l'adresse <https://hydrometrie.wallonie.be/home.html>
- Lane, E. W. (1955). The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 81, 7, 17”.
- Malavoi, J.R. & Bravard, J.P. (2010). *Eléments d'hydrologie fluviale*. ONEMA. Vincennes. 228p.
- McDonald, A., Lane, S. N., Haycock, N. E., & Chalk, E. A. (2004). Rivers of Dreams : On the Gulf between Theoretical and Practical Aspects of an Upland River Restoration. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 29(3), 257-281. <https://doi.org/10.1111/j.0020-2754.2004.00314.x>
- Miedema, S. (2010). Constructing the Shields curve, a new theoretical approach and its applications.
- Pacyna, L. (2022). Curage des cours d'eau, toujours une bonne idée ?. *Bulletin de liaison N°96— Décembre 2022*. calameo.com. Consulté 24 septembre 2023, à l'adresse <https://www.calameo.com/read/0027461784534e15c380d>
- Peeters, A., Houbrechts, G., de le Court, B., Hallot, E., Van Campenhout, J., & Petit, F. (2021). Suitability and sustainability of spawning gravel placement in degraded river reaches, Belgium. *CATENA*, 201, 105217. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105217>
- Peeters, A., Houbrechts, G., Hallot, E., Van Campenhout, J., Gob, F., & Petit, F. (2020). Can coarse bedload pass through weirs? *Geomorphology*, 359, 107131. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107131>
- Petit, F. (1987). The relationship between shear stress and the shaping of the bed of a pebble-loaded river la rulle—Ardenne. *CATENA*, 14(5), 453-468. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(87\)90015-4](https://doi.org/10.1016/0341-8162(87)90015-4)
- Petit, F., Gob, F., Houbrechts, G., & Assani, A. A. (2005). Critical specific stream power in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 69(1), 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.12.004>
- Petit, F., Houbrechts, G., Peeters, A., Hallot, E., Van Campenhout, J., & Denis, A.-C. (2015). Dimensionless critical shear stress in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 250, 308-320. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.008>

Petit F., Pauquet A., Pissart A., 1994, Aspects géomorphologiques et sédimentologiques des dragages dans l'Ourthe inférieure, Université de Liège, Demande d'étude de la Direction des Voies Hydrauliques de Liège, Convention 233-93-27, 52 p. + annexes

Petit, F., Perpinien, G., & Deroanne, C. (2000). Détermination des puissances spécifiques critiques dans des rivières à charge de fond caillouteuse. *Revue Géographique de l'Est*, 40(1-2), Article 1-2. <https://doi.org/10.4000/rge.4203>

Portail wallonie.be (s.d.). BE33014—Vallée de l'Ourthe entre Comblain-au-Pont et Angleur | Rechercher un site intéressant ou protégé | Sites | La biodiversité en Wallonie. Consulté 23 novembre 2023, à l'adresse <http://biodiversite.wallonie.be/fr/be33014-vallee-de-l-ourthe-entre-comblain-au-pont-et-angleur.html?IDD=402653795&IDC=2892>

Piasny, G. (2023). Approche expérimentale et numérique en morphodynamique des cours d'eau : application à la gestion de la mobilité latérale de la Moselle sauvage. Thèse de doctorat sciences de la terre et de l'environnement. Université de Strasbourg, Strasbourg, France, inédit, 195 p.

Riviereseetfleuves.eu (2017). L'Ourthe : Retour aux sources. Consulté le 12 octobre 2023 à l'adresse <https://www.riviereseetfleuves.eu/lourthe/>

Rollet, A. J., Piégay, H., Dufour, S., Bornette, G., & Persat, H. (2014). Assessment of Consequences of Sediment Deficit on a Gravel River Bed Downstream of Dams in Restoration Perspectives : Application of a Multicriteria, Hierarchical and Spatially Explicit Diagnosis. *River Research and Applications*, 30(8), 939-953. <https://doi.org/10.1002/rra.2689>

RTBF Auvio. (s. d.). Investigation: Extraits. Consulté 23 septembre 2023, à l'adresse <https://auvio.rtbf.be/widget/20943?context%5BprogramId%5D=16281>

Stähly, S., Franca, M. J., Robinson, C. T., & Schleiss, A. J. (2020). Erosion, transport and deposition of a sediment replenishment under flood conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(13), 3354-3367. <https://doi.org/10.1002/esp.4970>

Stähly, S., Maître, A., Franca, M. J., Robinson, C. T., & Schleiss, A. J. (2018). Experiments with sediment replenishment in a residual flow reach : Comparison of field data with laboratory experiments. *E3S Web of Conferences*, 40, 02022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184002022>

uee.uliege.be (s.d.). WOLF. Université de Liège Urban & Environmental Engineering. Consulté le 30 novembre 2023, à l'adresse [https://www.uee.uliege.be/cms/c\\_2383459/fr/wolf](https://www.uee.uliege.be/cms/c_2383459/fr/wolf)

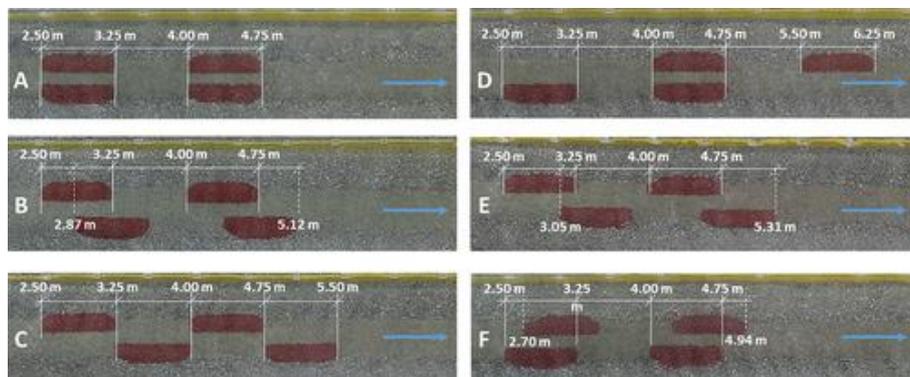
Vázquez-Tarrío, D., Peeters, A., Cassel, M., & Piégay, H. (2023). Modelling coarse-sediment propagation following gravel augmentation: The case of the Rhône River at Péage-de-Roussillon (France). *Geomorphology*, 428, 108639. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108639>

Wallonie.be (s.d.). Curage, nettoyage et sécurisation urgente des berges. Consulté 24 septembre 2023, à l'adresse <https://www.wallonie.be/fr/inondations/vous-etes-une-commune-sinistree/curage-nettoyage-et-securisation-urgente-des-berges>

Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions, American Geophysical Union* 35, 951. <https://doi.org/10.1029/TR035i006p00951>

## Annexes

Annexe 1. Configurations géométriques de la réinjection. A. Volumes parallèles ; Volumes décalés de la moitié de la longueur de réapprovisionnement ; C. Volumes d'une longueur de réapprovisionnement décalés vers l'aval ; D. Volumes uniques et volumes parallèles placés sur les deux rives ; E. Volumes 3/4 de la longueur de réapprovisionnement décalé vers l'aval ; Volumes 1/4 de la longueur de réapprovisionnement décalé vers l'aval (Battissacco et al., 2016)



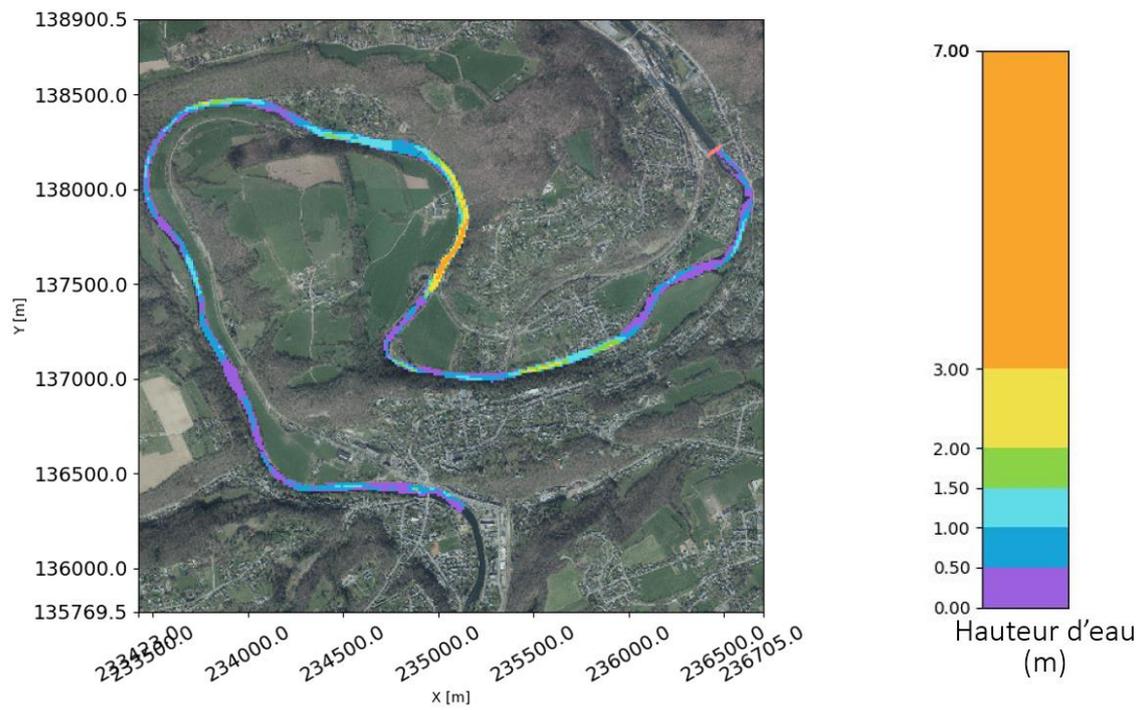
Annexe 2. Caractéristiques des galets prélevés sur l'Ourthe au niveau du seuil à Esneux (voir Figure 2)

Numéro du galets	Axe a	Axe b	Axe c	Masse (g)
493	78	69	16	135.6
447	109	106	49	759.8
400	149	141	42	992.4
402	134	77	47	735.8
403	154	79	41	663.8
408	142	110	25	552.1
410	180	124	96	2523
411	179	123	43	1293.3
414	91	66	53	498.8
415	152	103	34	898.9
417	111	84	25	358.4
420	144	98	76	1453.1
421	172	73	71	1369
421	55	47	13	44.5
422	2677	169	94	92
423	134	81	54	855.1
429	113	83	47	742.9
430	105	76	61	597.5
434	72	62	36	203.9
436	153	81	54	844.3
441	151	124	27	844.5
442	222	113	71	1668.7
443	85	78	21	232.9
446	174	77	36	852.2
448	216	131	31	1239.7
452	104	79	57	547.1
453	110	77	44	624.8

454	189	92	82	2118
455	111	72	22	310.8
456	127	71	37	587.9
458	76	67	18	132.8
459	98	69	4	398.6
460	149	113	29	641.6
464	122	99	60	943
464	99	81	70	804.7
468	99	99	28	512.8
469	104	58	26	262.7
470	134	95	60	1172.1
472	83	7	4	258.8
473	182	166	89	3102
474	84	61	43	305.6
475	183	122	68	2278
476	105	71	45	477.2
477	82	72	46	370.8
478	90	68	37	313.5
481	76	62	23	179.3
484	224	118	66	2518
486	154	134	94	2386
487	147	71	29	498.3
491	103	67	26	284.1
700	3889	242	182	56
701	155	64	49	924.7
702	182	146	56	1906
703	153	122	49	1369.8
704	216	126	77	2513
705	187	115	76	2748
706	183	129	82	2510
707	107	76	36	434.1
708	133	93	24	441.2
709	81	41	21	96.2
710	78	56	15	86.3
711	93	80	33	453
712	91	71	35	235.2
713	124	53	45	438
714	133	121	24	575.9
715	68	61	29	146.7
716	91	49	35	231.6
717	330	155	11.2	7016
718	93	61	30	169.8
719	87	55	21	140.4
720	76	41	24	109.9
722	67	32	19	66.1

723	88	44	32	141.5
724	62	45	30	123.6
725	73	36	30	158.9
726	18	51	35	265.7
727	84	68	43	313
728	84	42	30	138.1
729	16	31	17	95.5
730	63	59	26	78.7
731	87	63	28	221.6
732	62	33	18	45.8
733	76	34	20	74.7
734	70	54	15	91.3
735	74	70	19	114.7
736	60	39	30	77.4
737	55	51	18	57.6
738	95	50	36	214
739	80	48	29	126.3
740	52	42	27	71.2
741	59	53	22	80.8
742	54	39	28	65
743	71	51	21	79.5
744	69	28	17	51.7
745	54	46	18	51.7
746	93	36	35	147.4
747	51	26	19	31.5
748	37	35	20	29.1
749	47	45	26	54.2

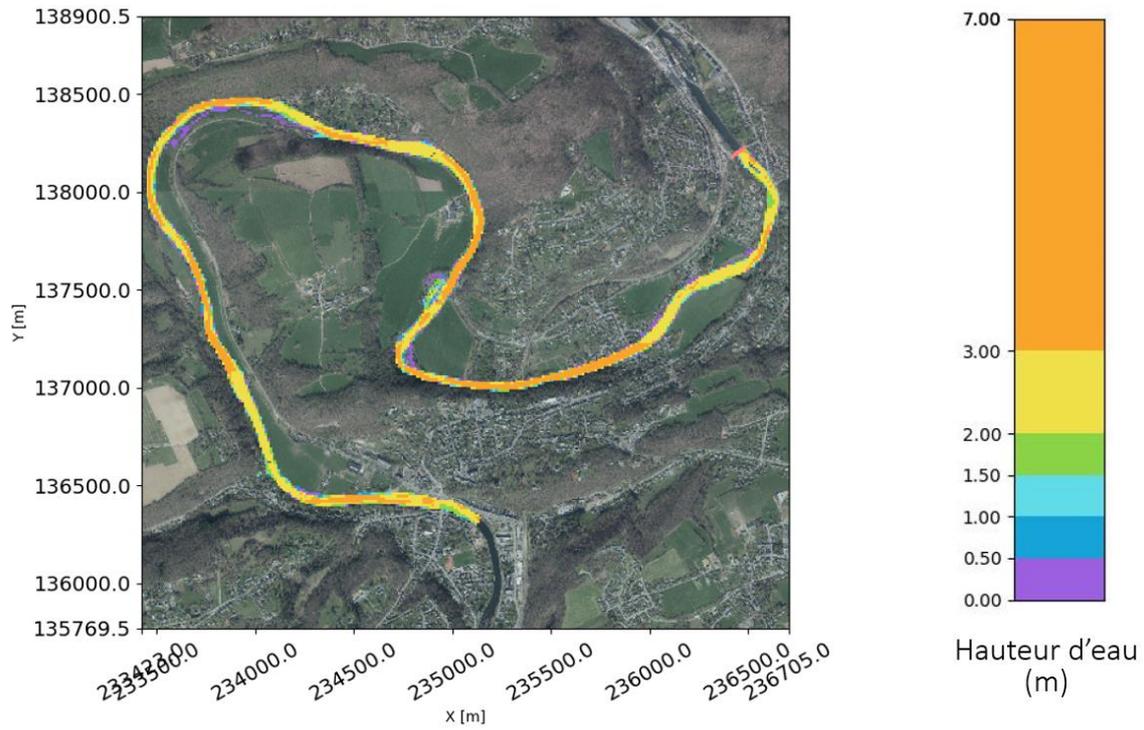
Annexe 3. Hauteur d'eau [m] pour un débit de 5 m<sup>3</sup>/s



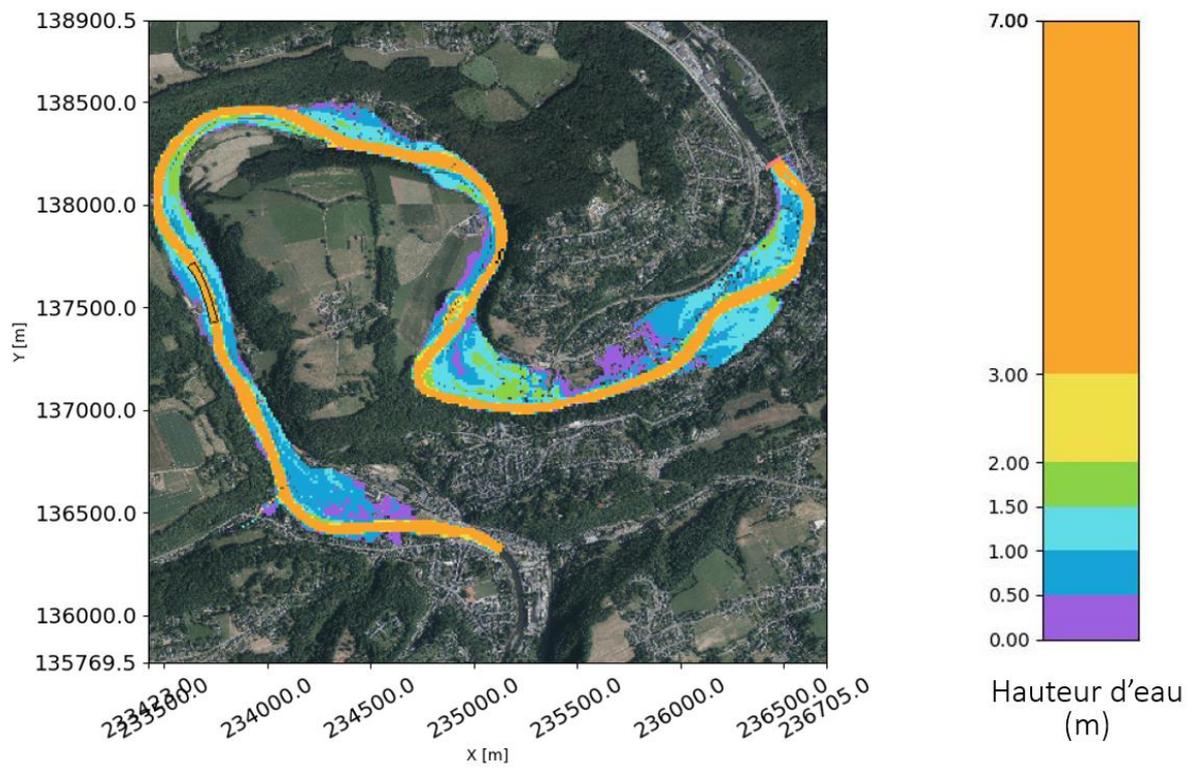
Annexe 4. Hauteur d'eau [m] pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/s



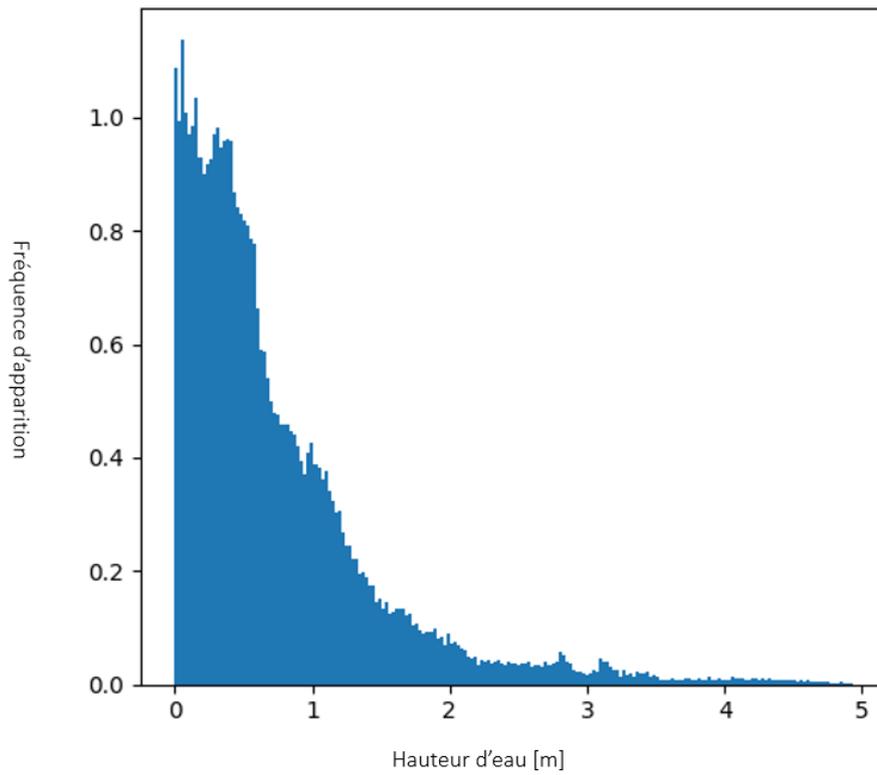
Annexe 5. Hauteur d'eau [m] pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s



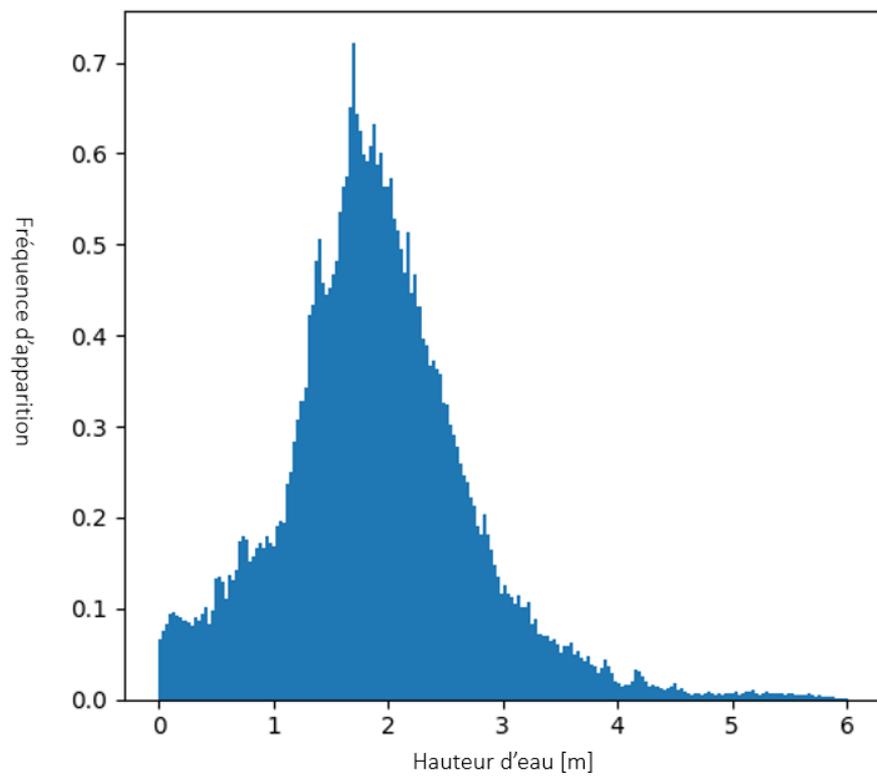
Annexe 6. Hauteur d'eau [m] pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s



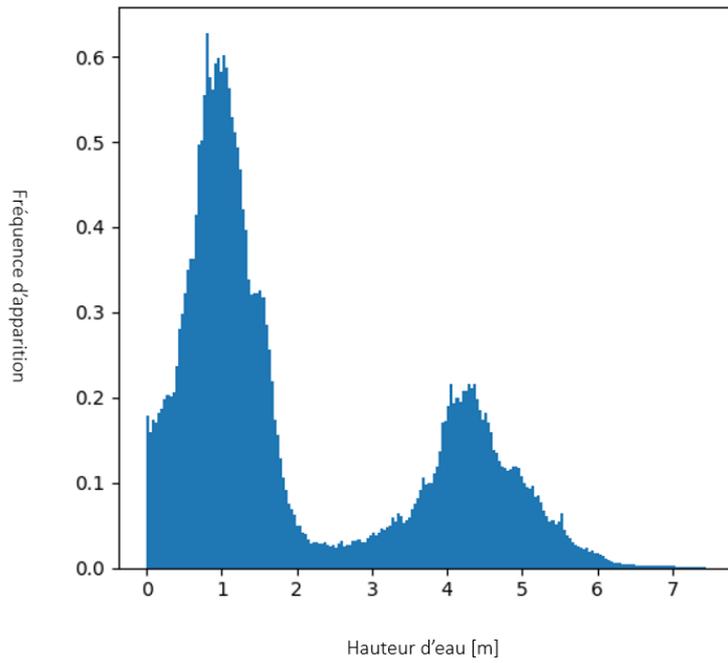
Annexe 7. Fréquence d'apparition des hauteurs d'eau pour un débit de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ .



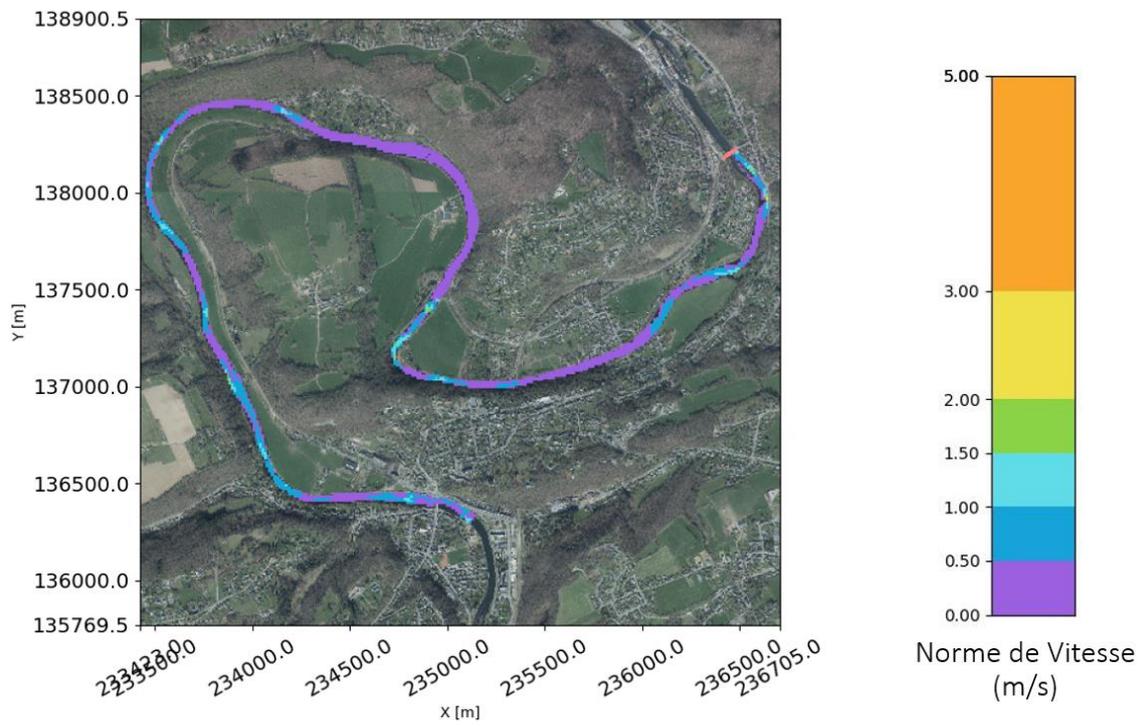
Annexe 8. Fréquence d'apparition des hauteurs d'eau pour un débit de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Annexe 9. Fréquence d'apparition des hauteurs d'eau pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s.



Annexe 10. Norme des vitesses [m/s] pour le débit 5 m<sup>3</sup>/s en m/s.



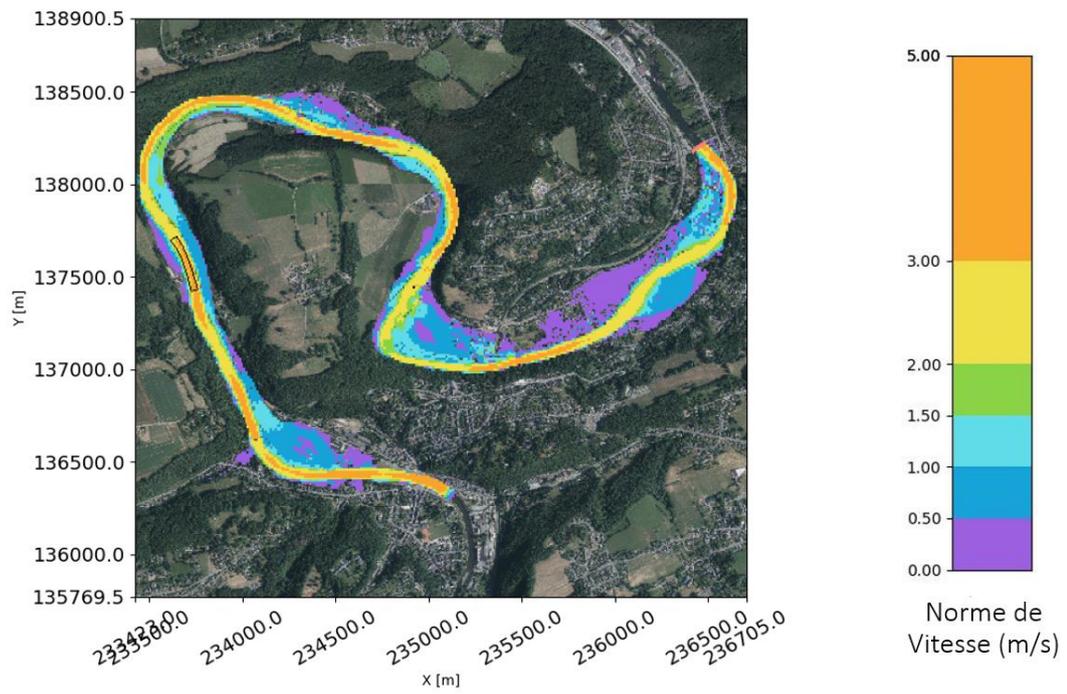
Annexe 11. Norme des vitesses [m/s] pour le débit 150 m<sup>3</sup>/s.



Annexe 12. Norme des vitesses [m/s] pour le débit 300 m<sup>3</sup>/s.



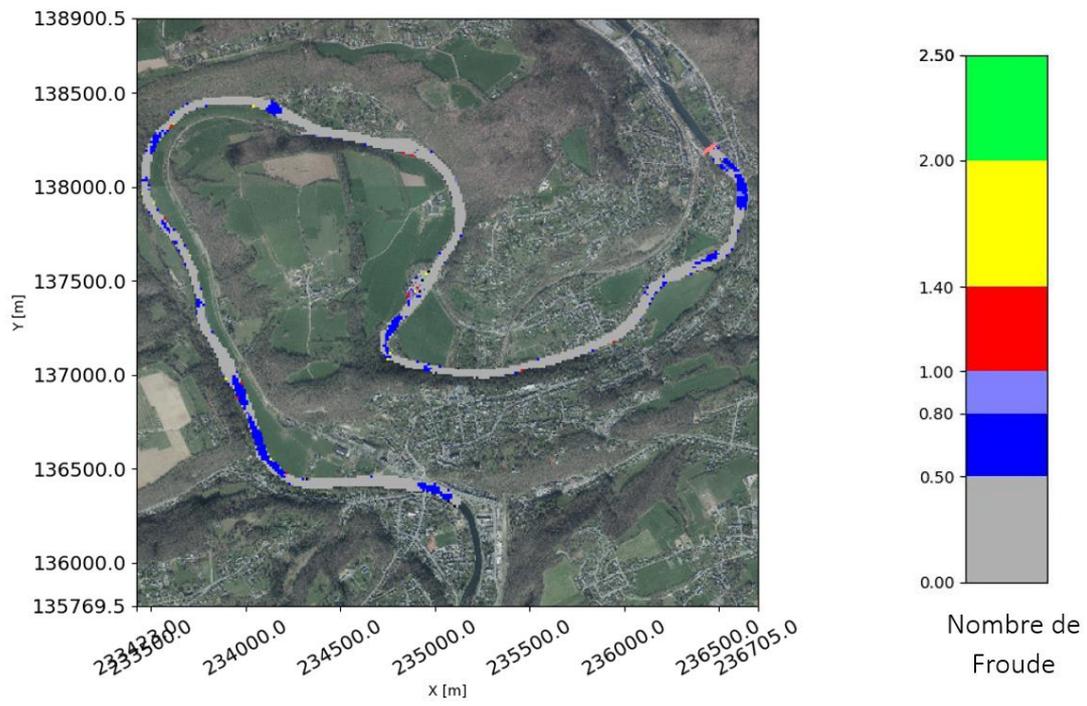
Annexe 13. Norme des vitesses [m/s] pour le débit 726 m<sup>3</sup>/s



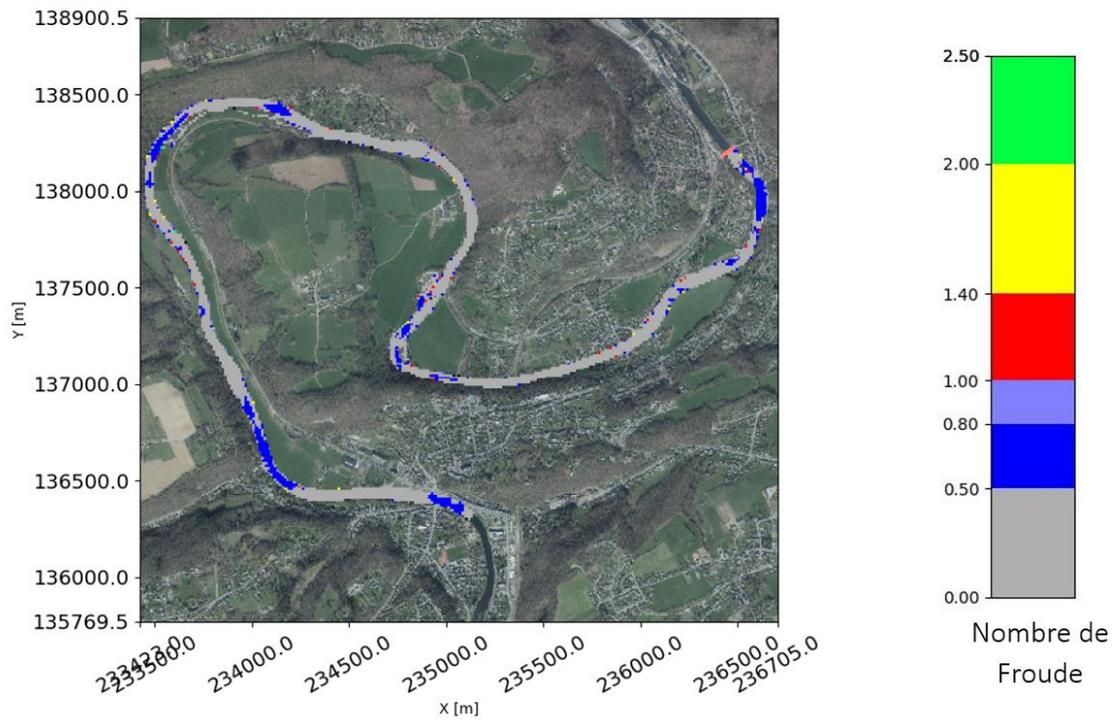
Annexe 14. Nombre de Froude pour le débit 5 m<sup>3</sup>/s.



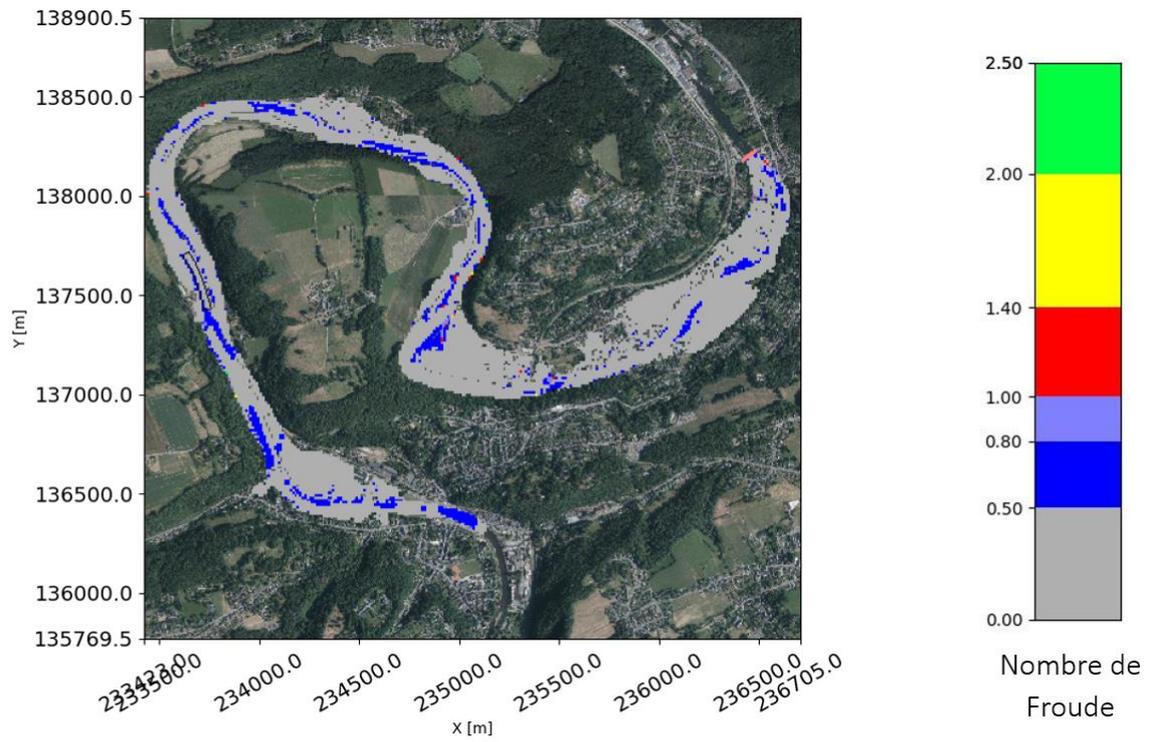
Annexe 15. Nombre de Froude pour le débit 150 m<sup>3</sup>/s.



Annexe 16. Nombre de Froude pour le débit 300 m<sup>3</sup>/s.



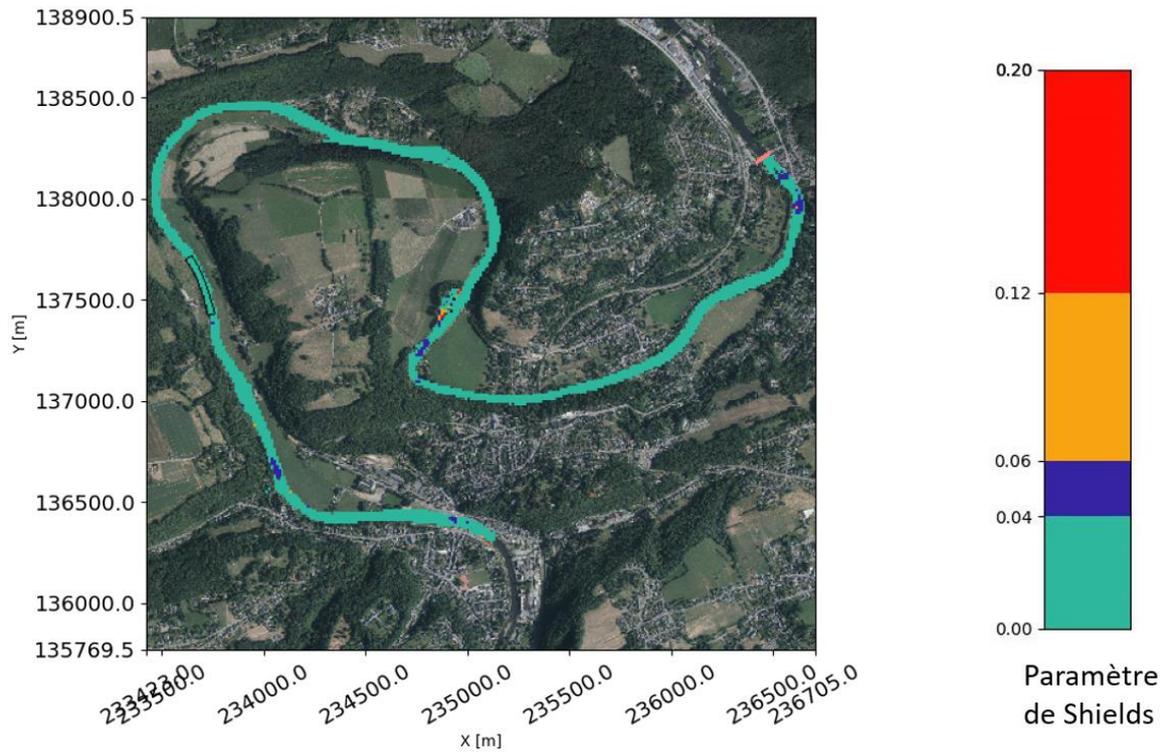
Annexe 17. Nombre de Froude pour le débit 726 m<sup>3</sup>/s.



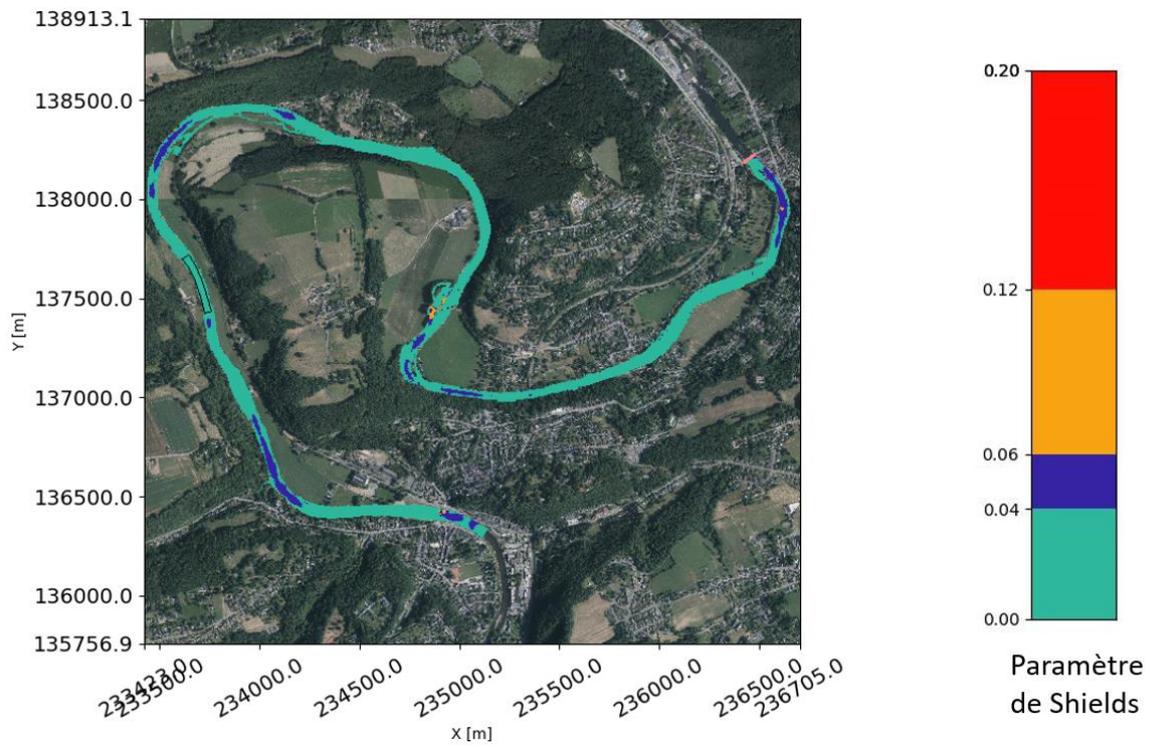
Annexe 18. Paramètre de Shields pour un diamètre critique de 42 mm pour un débit de 5 m<sup>3</sup>/s.



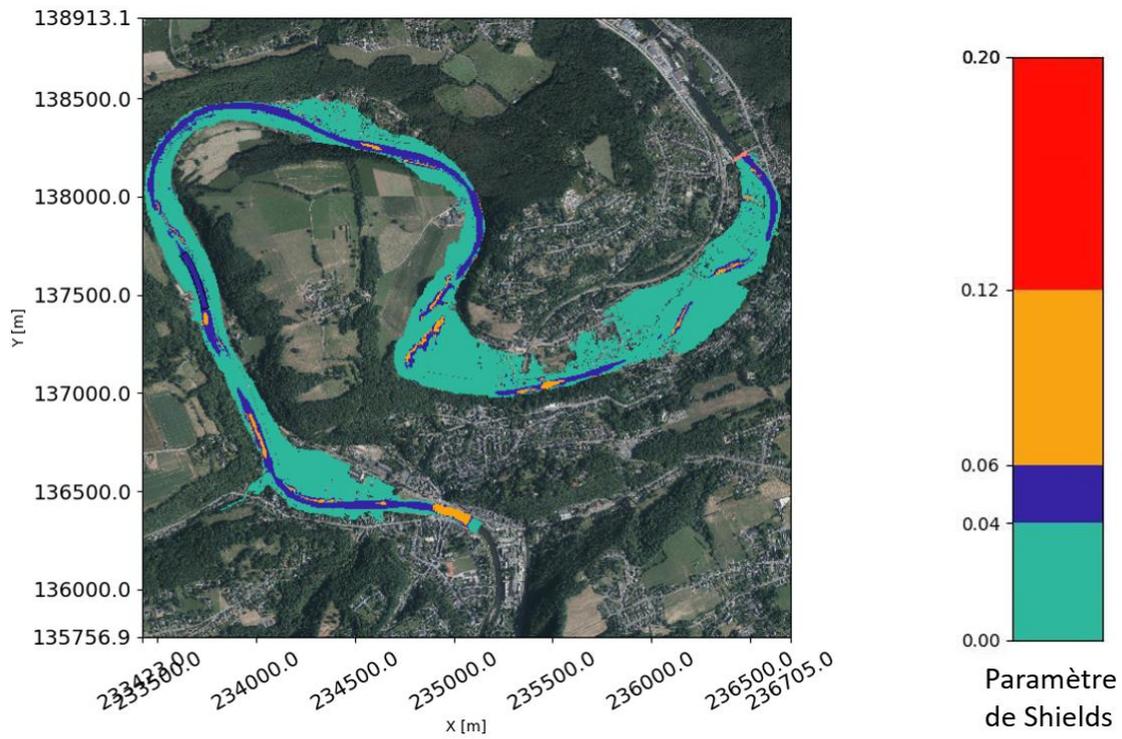
Annexe 19. Paramètre de Shields pour un diamètre critique de 42 mm pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/s.



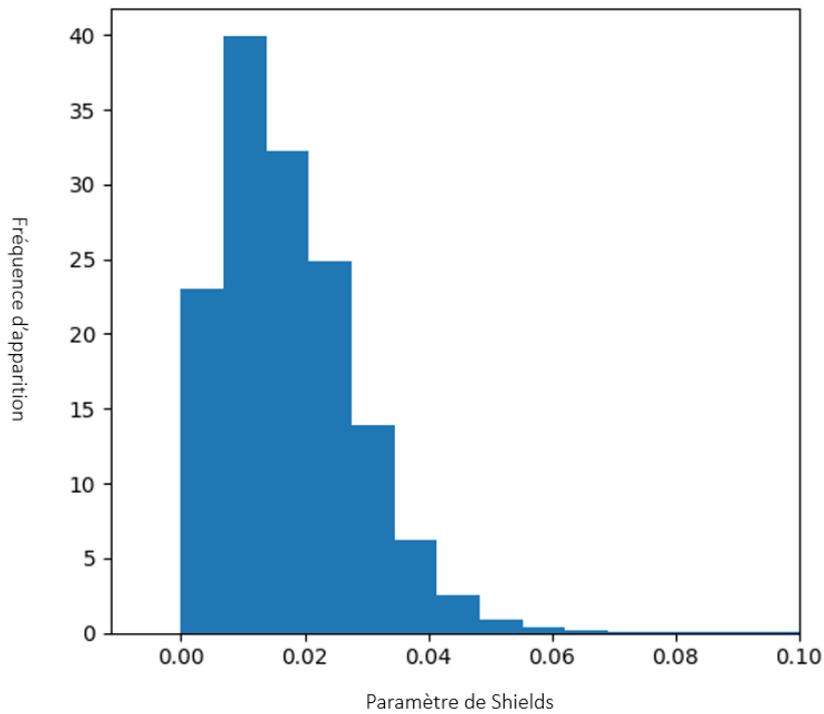
Annexe 20. Paramètre de Shields pour un diamètre critique de 42 mm pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s.



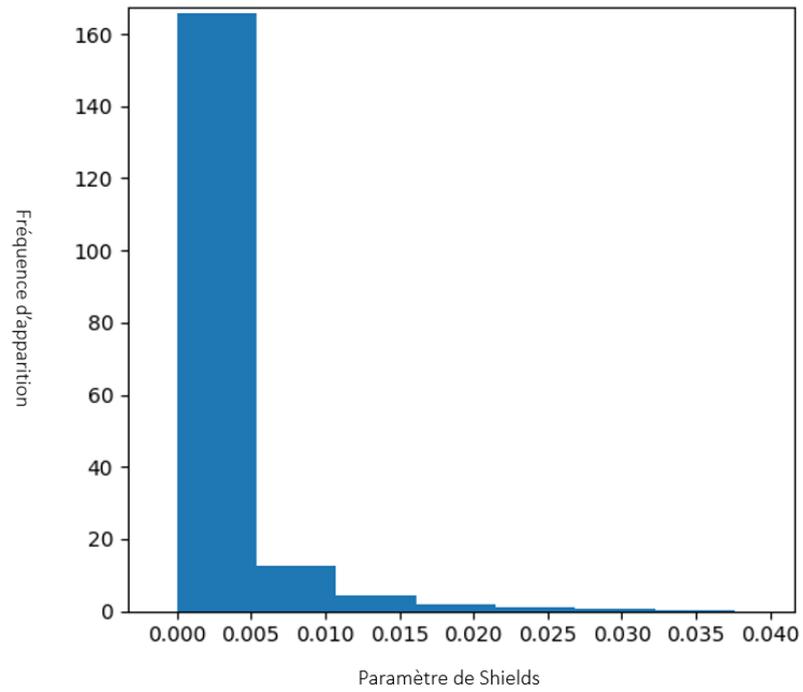
Annexe 21. Paramètre de Shields pour un diamètre critique de 42 mm pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s.



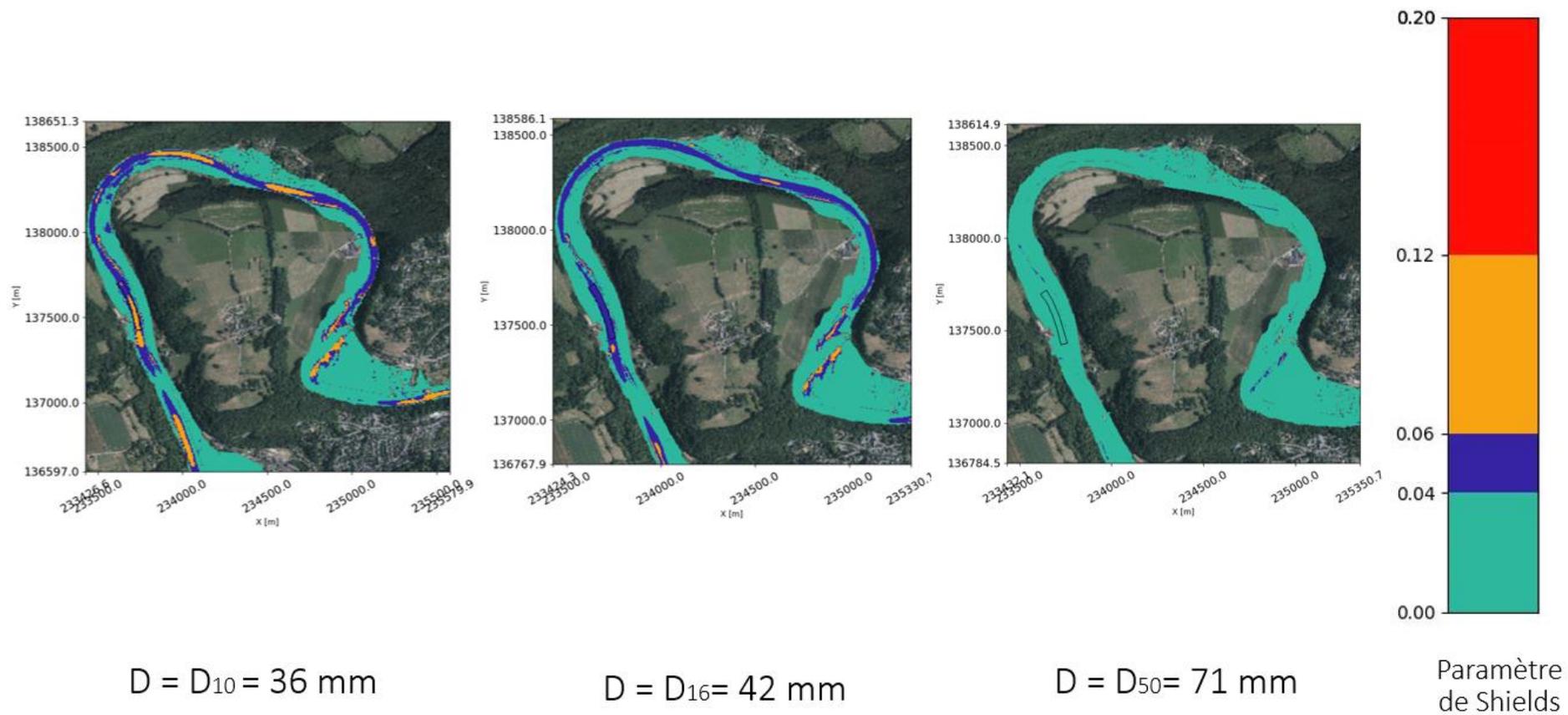
Annexe 22. Fréquence d'apparition des valeurs du paramètre de Shields pour une simulation possédant un débit de 150 m<sup>3</sup>/s et un diamètre critique du matériel de fond égal au D16 (42 mm).



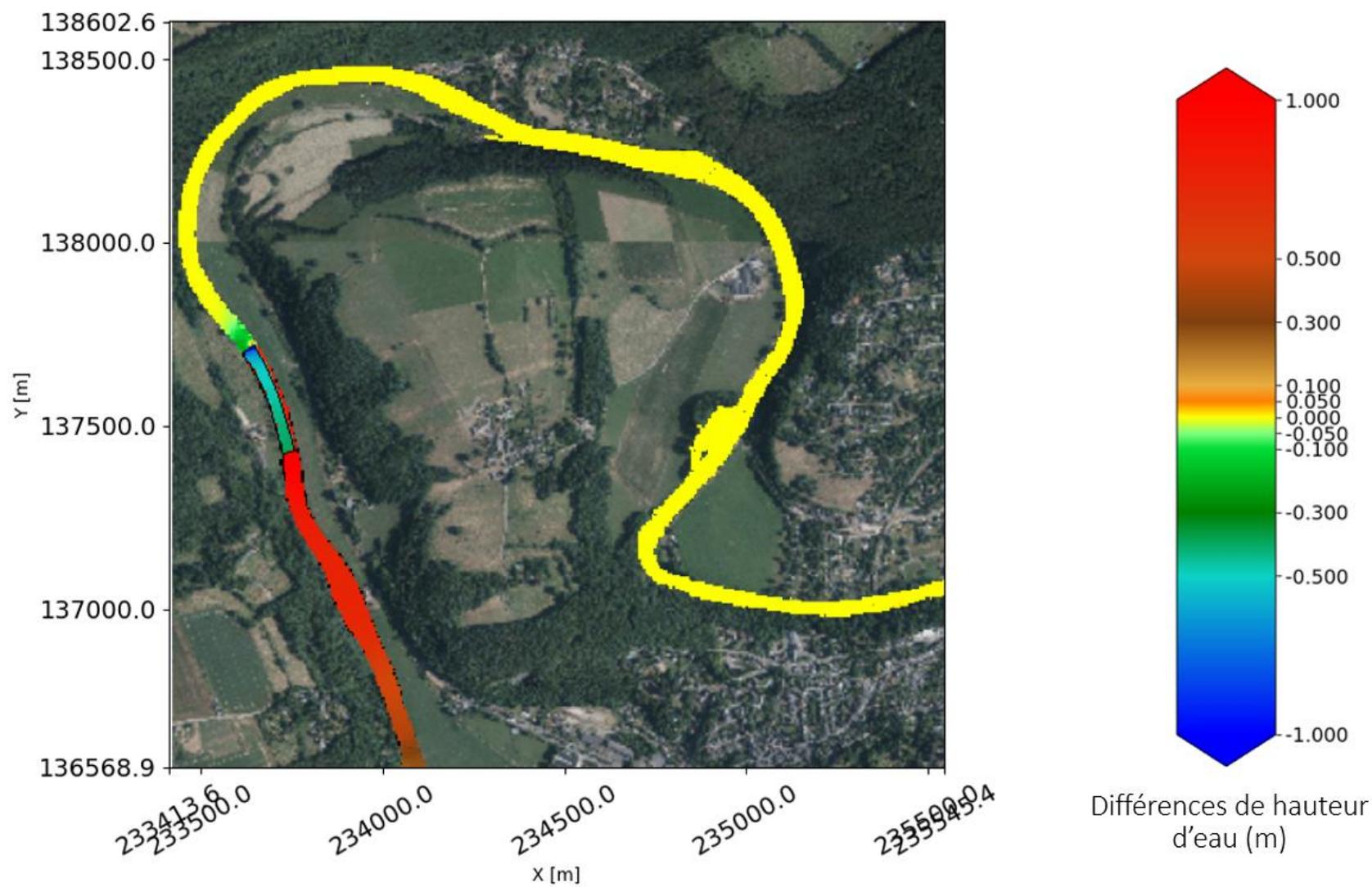
Annexe 23. Fréquence d'apparition des valeurs du paramètre de Shields pour une simulation possédant un débit de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  et un diamètre critique du matériel de matériel égal au D16 (42 mm).



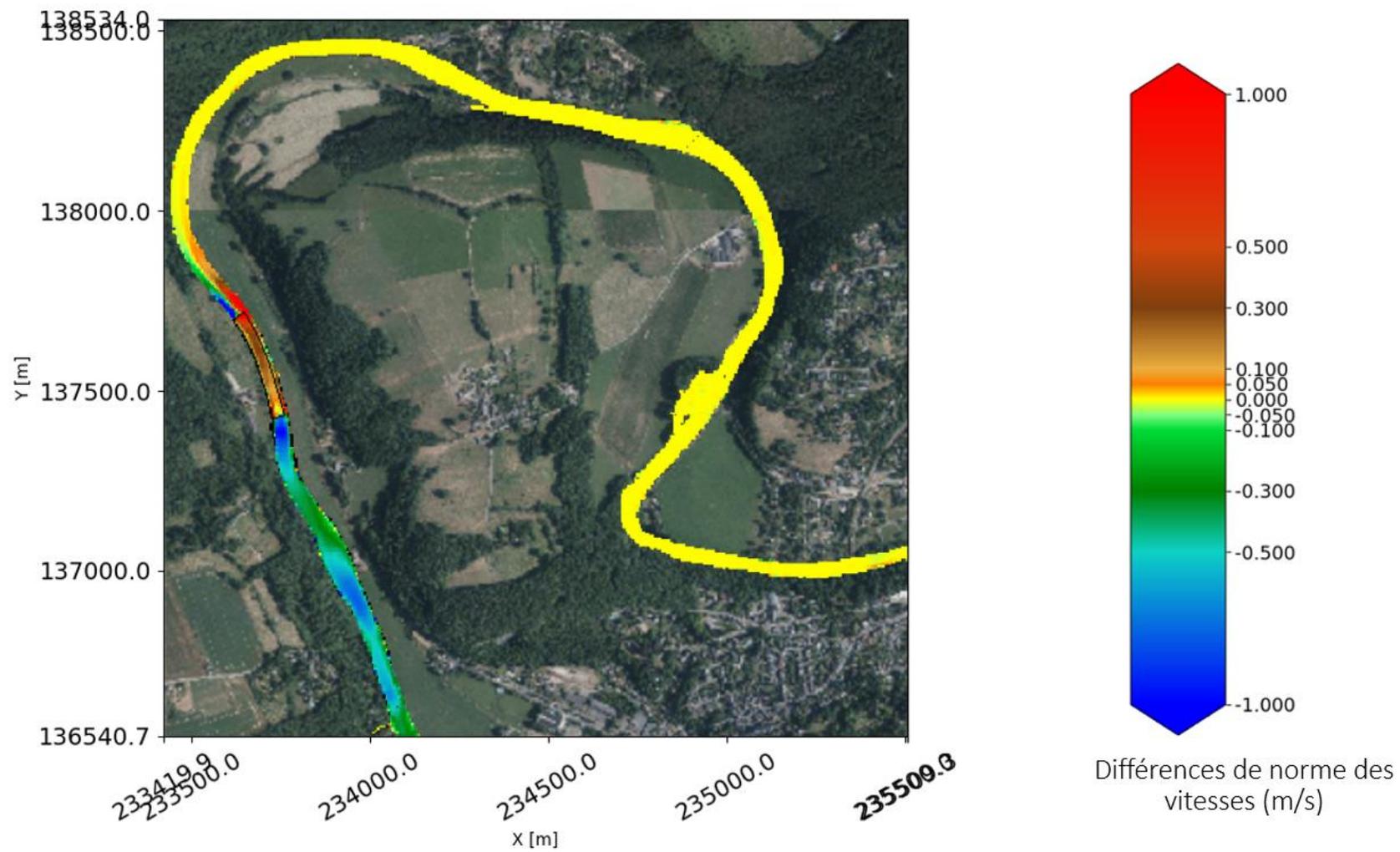
Annexe 24. Comparaison des valeurs du paramètres de Shields en fonction du diamètre critique pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$ .



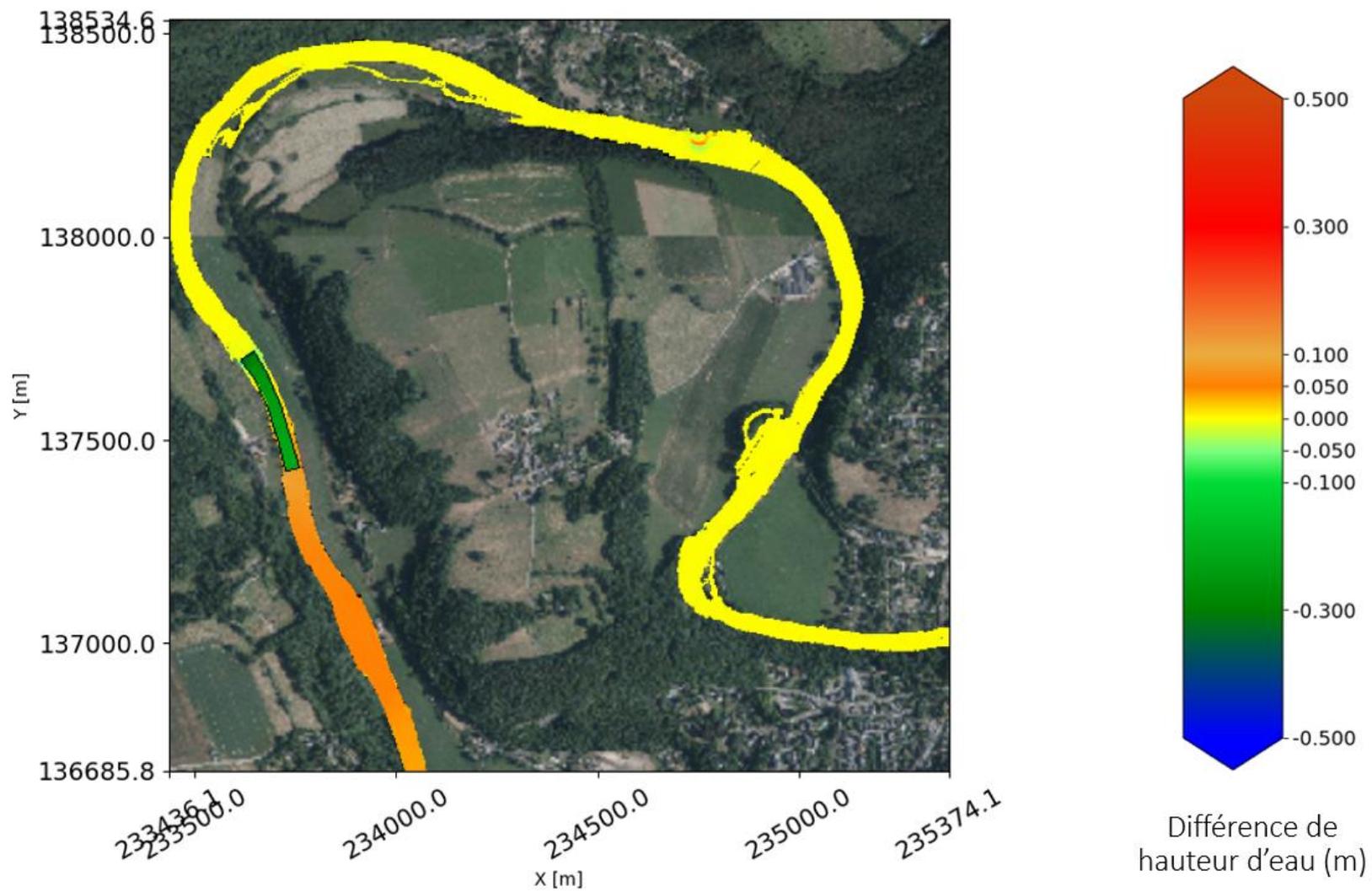
Annexe 25. Comparaison des hauteurs d'eau avant/après réinjection pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/s.



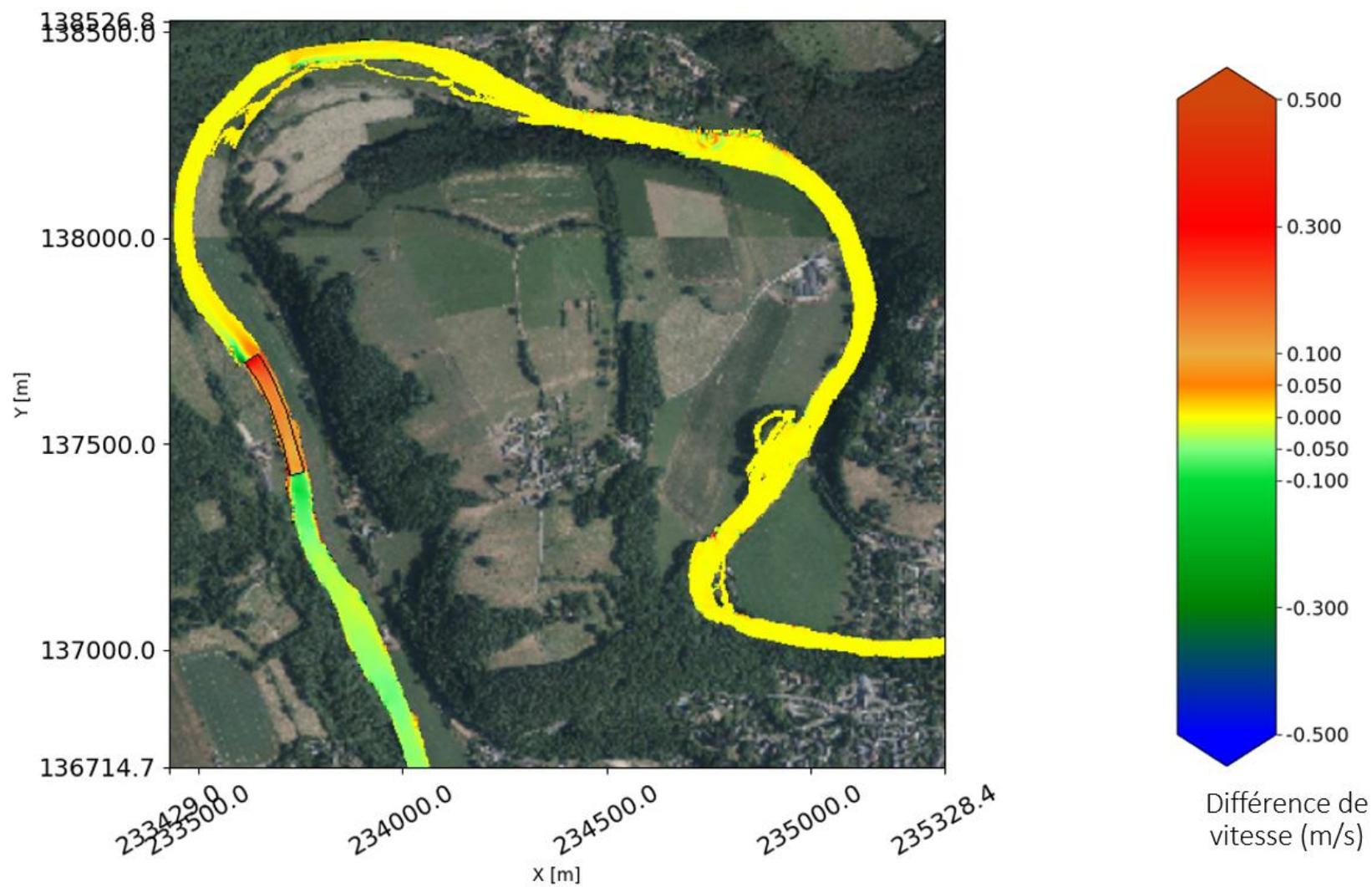
Annexe 26. Comparaison de la norme des vitesses avant/après réinjection pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/s.



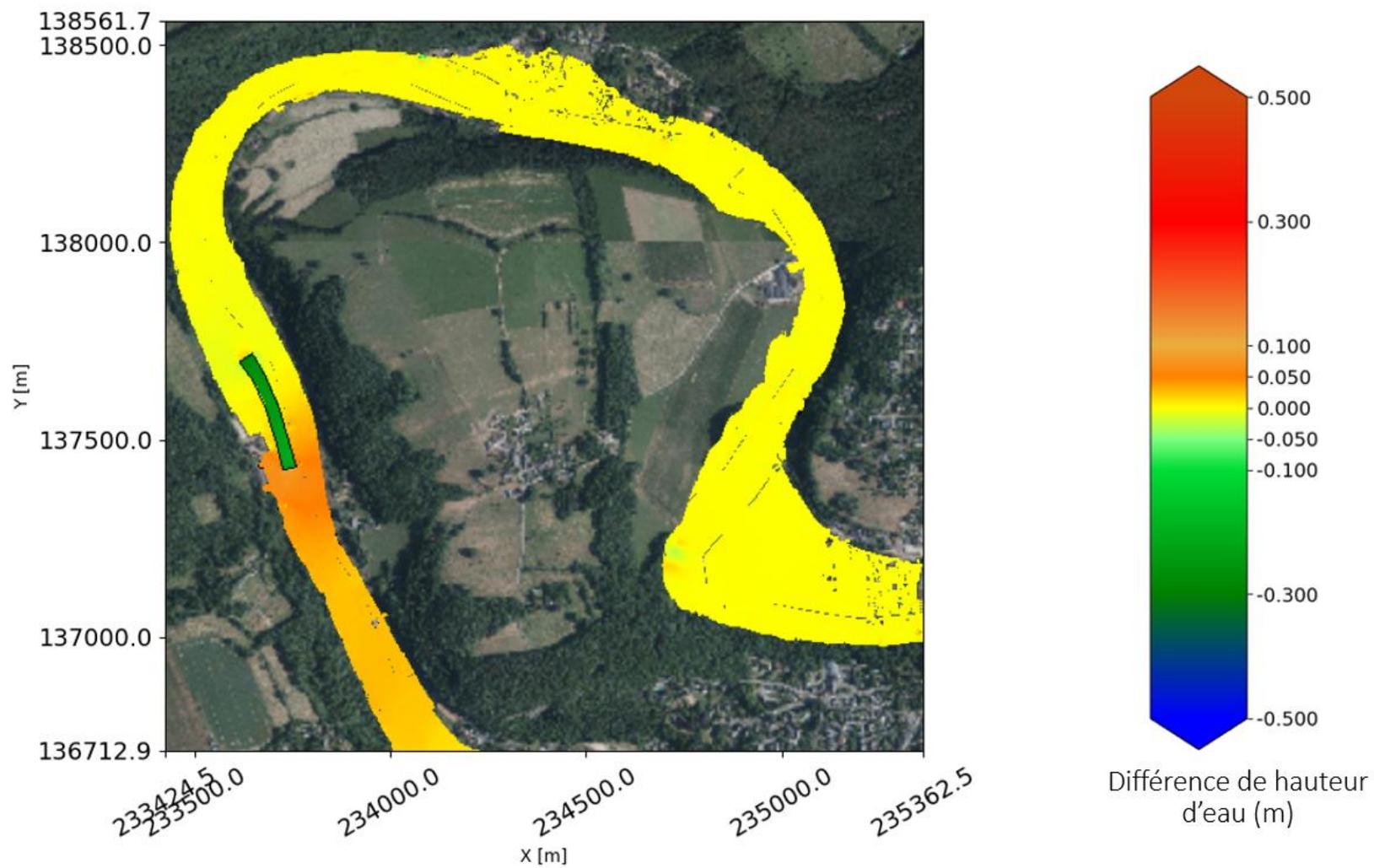
Annexe 27. Différences de hauteur d'eau avant/après réinjection pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s



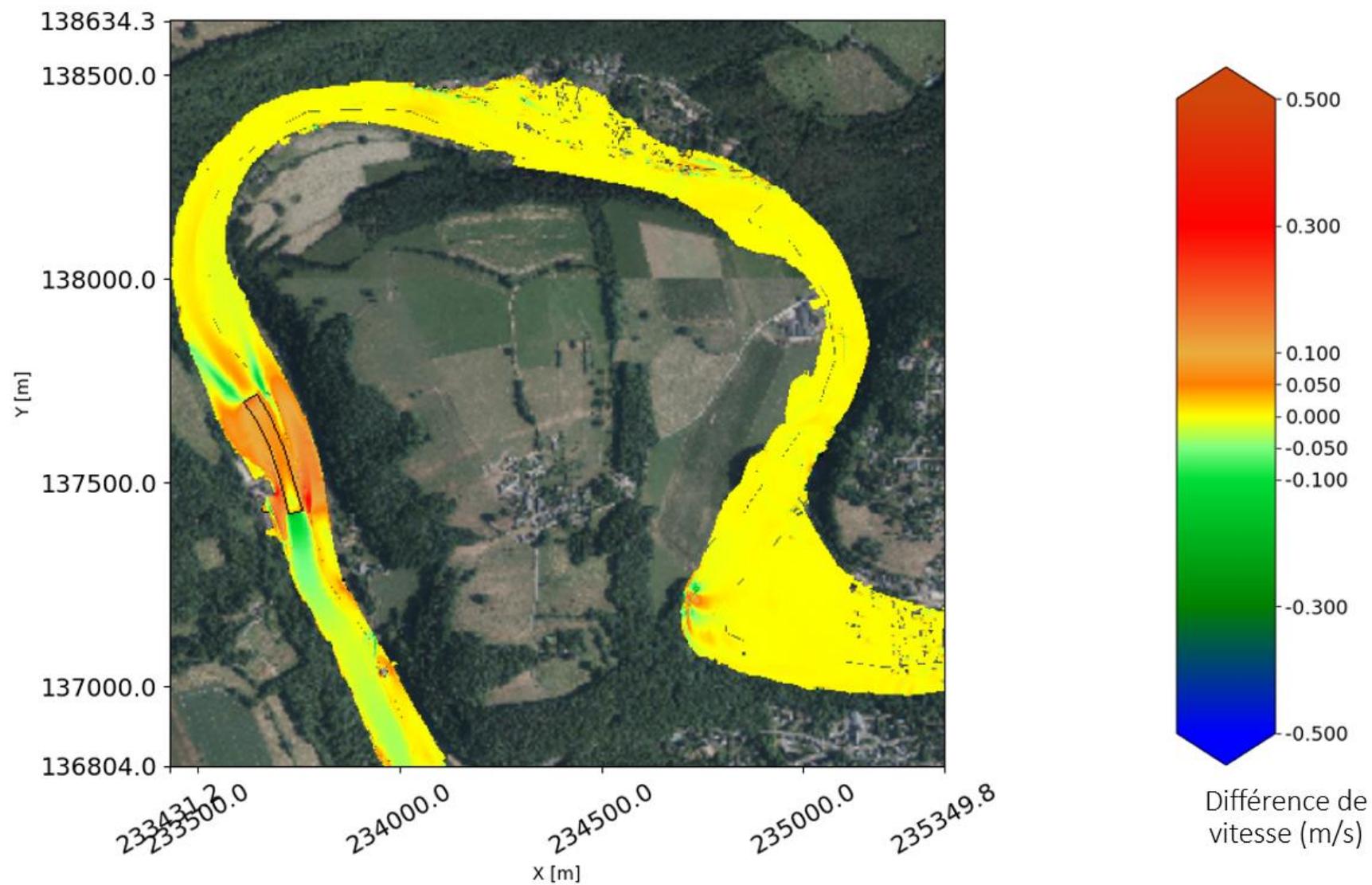
Annexe 28. Différences de normes des vitesses avant/après réinjection pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$



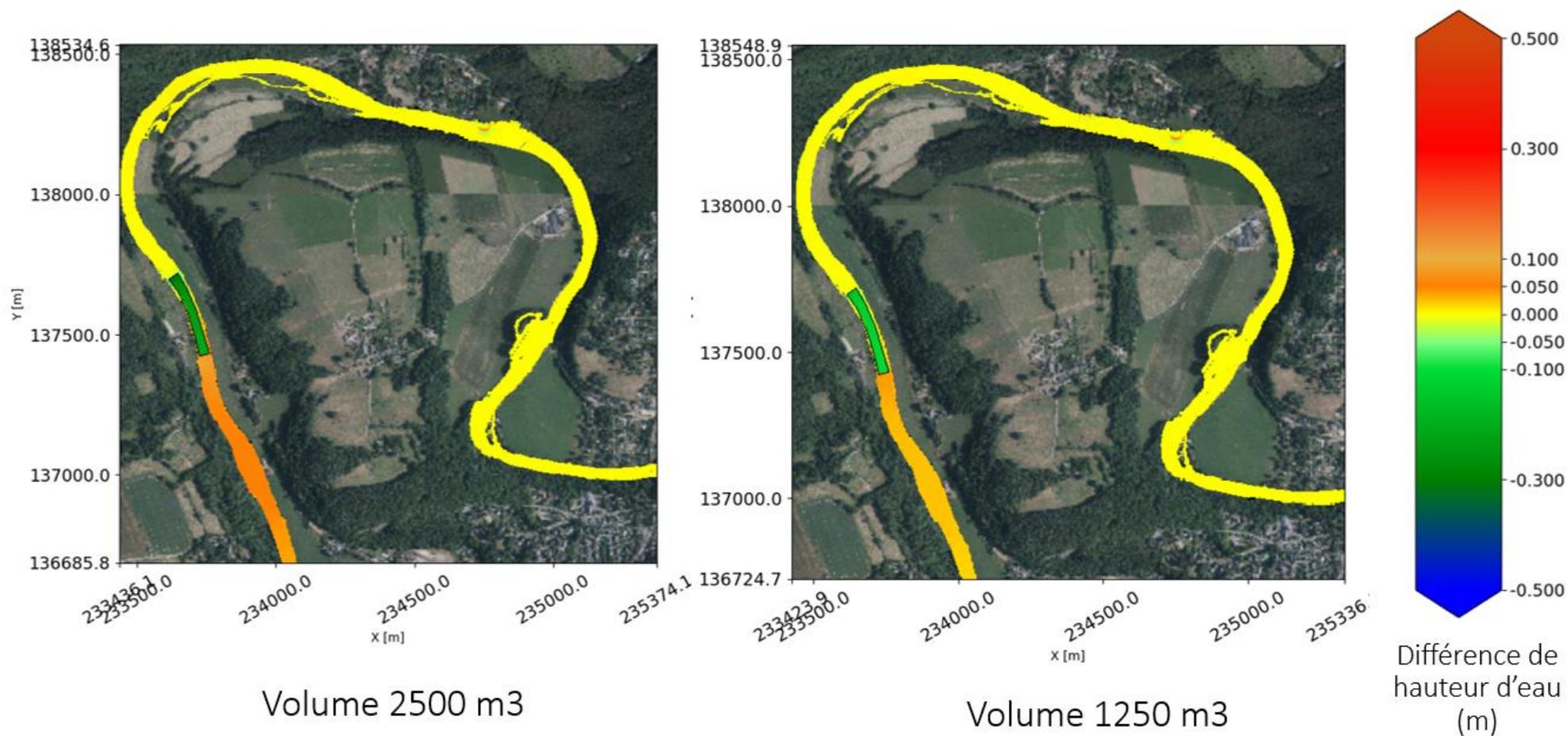
Annexe 29. Différences de hauteur d'eau avant/après réinjection pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s



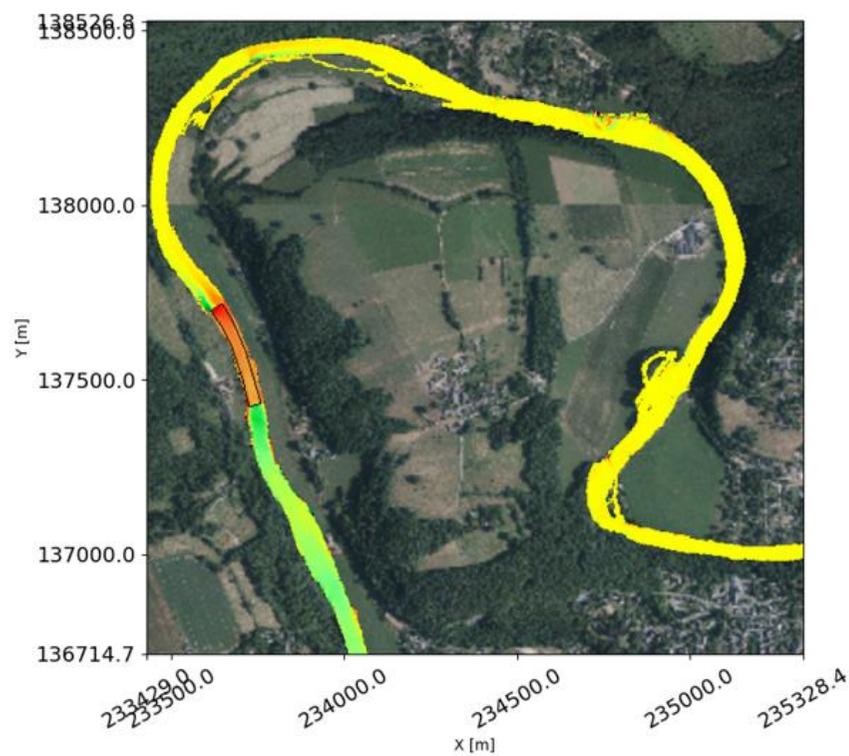
Annexe 30. Différences de normes des vitesses avant/après réinjection pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$



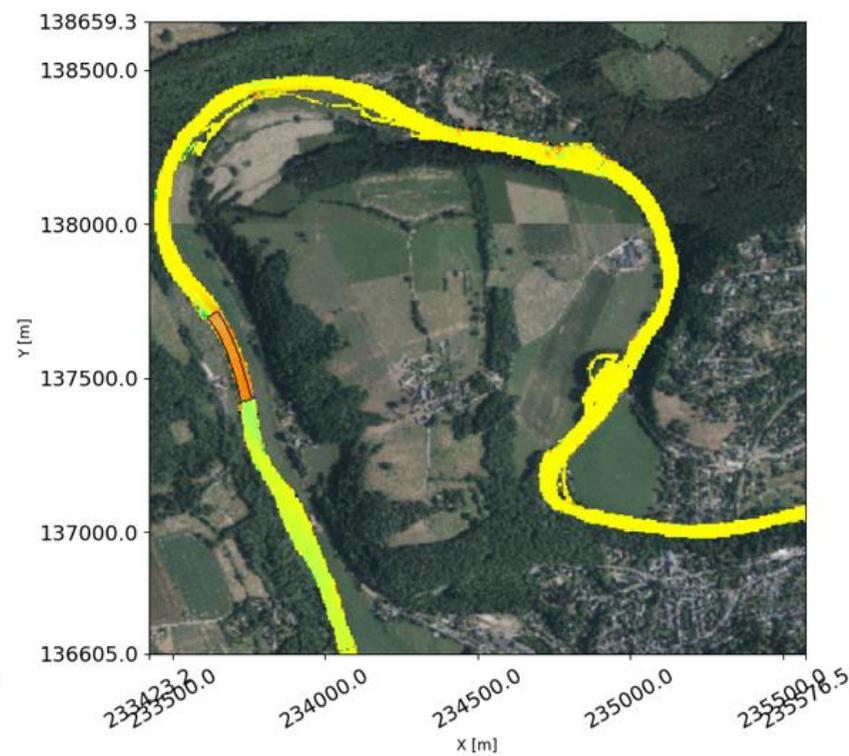
Annexe 31. Comparaison des variations de hauteur avant / après réinjection pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m<sup>3</sup> (droite) pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s



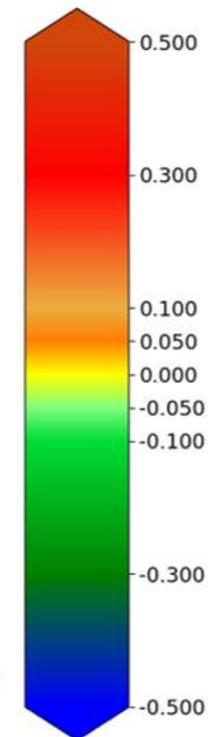
Annexe 32. Comparaison des variations de vitesse avant / après réinjection pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m<sup>3</sup> (droite) pour un débit de 300 m<sup>3</sup>/s



Volume 2500 m<sup>3</sup>

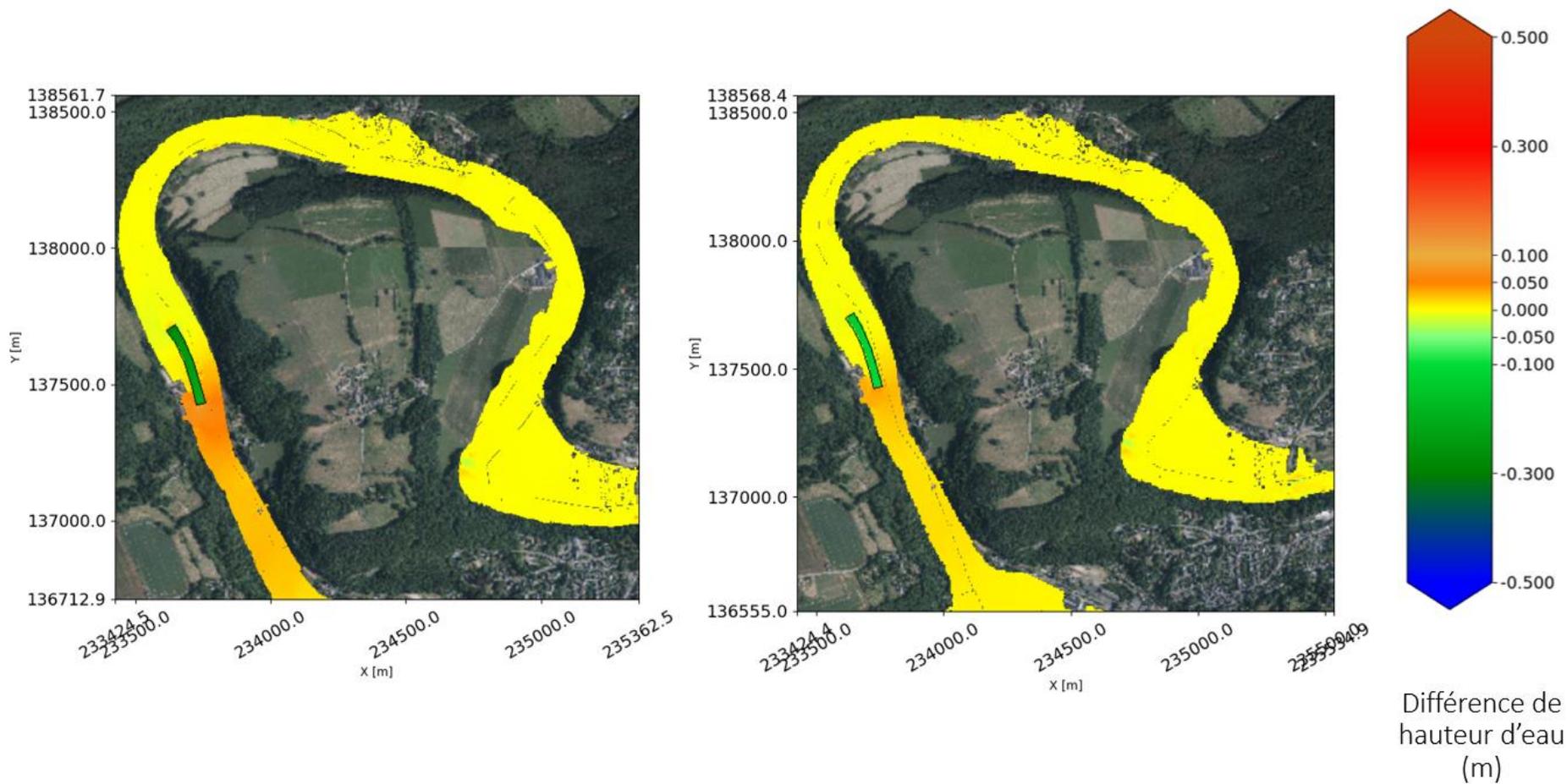


Volume 1250 m<sup>3</sup>

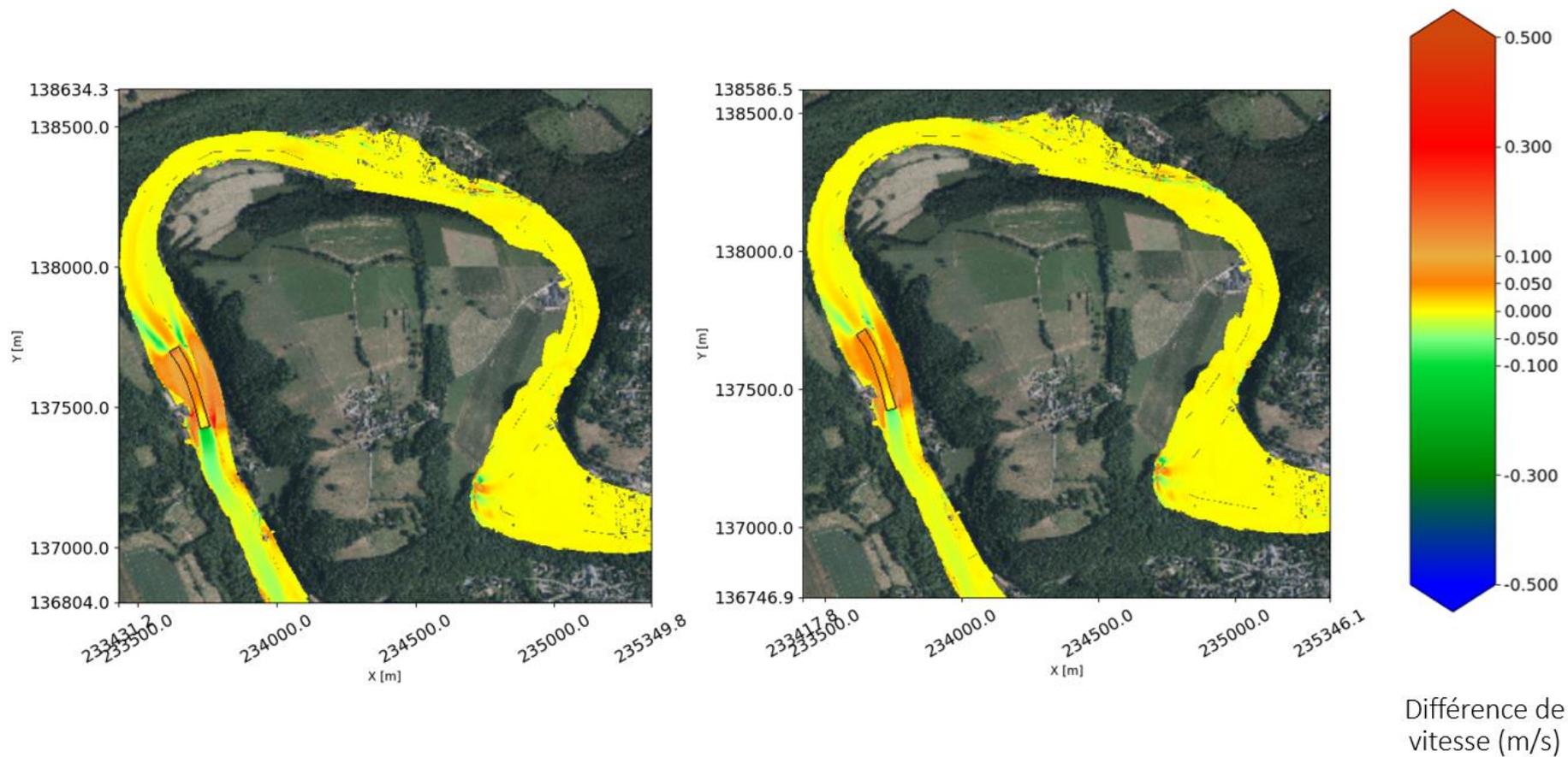


Différence de vitesse (m/s)

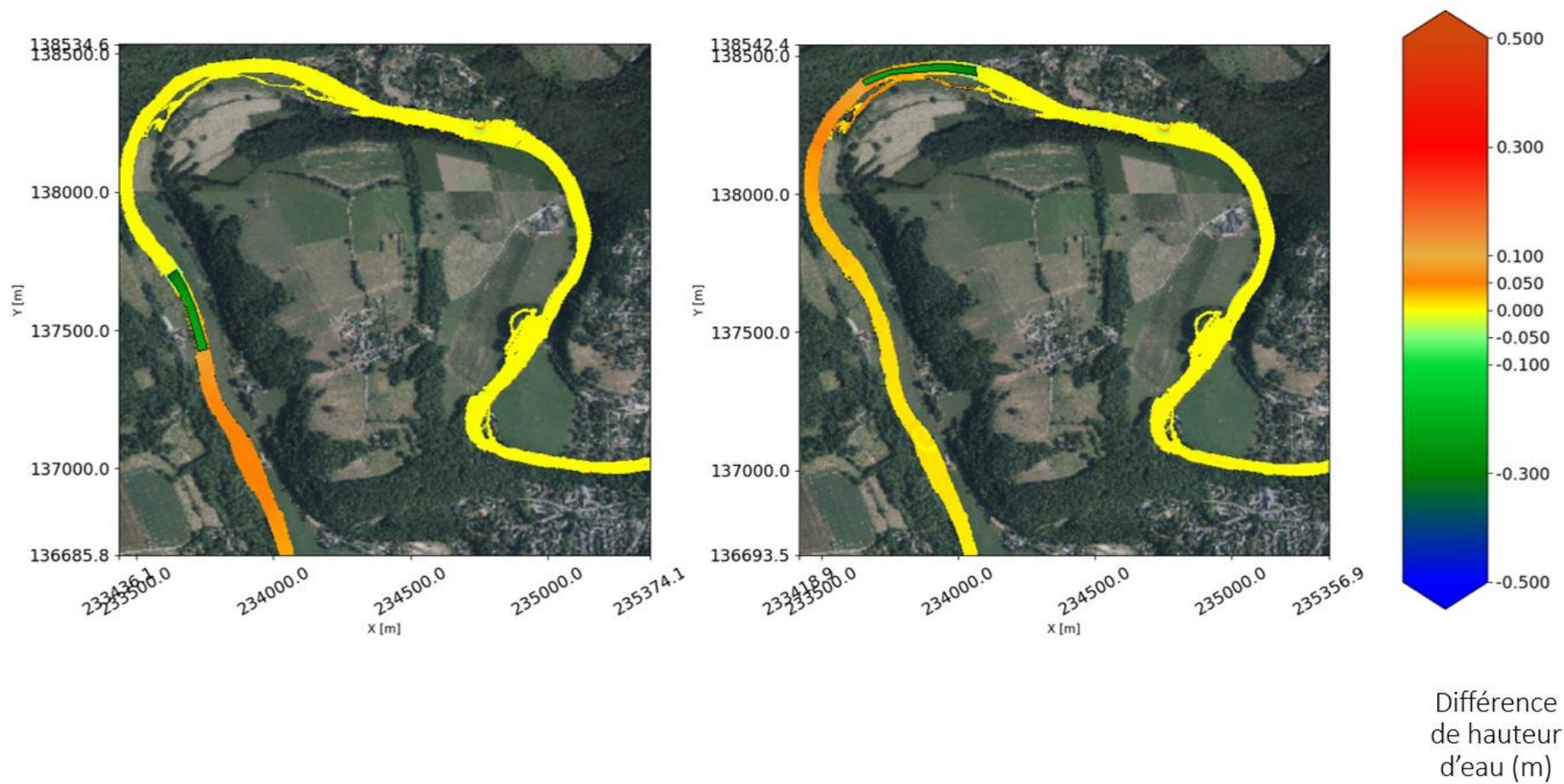
Annexe 33. Comparaison des variations de hauteur d'eau avant / après réinjection pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m<sup>3</sup> (droite) pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s



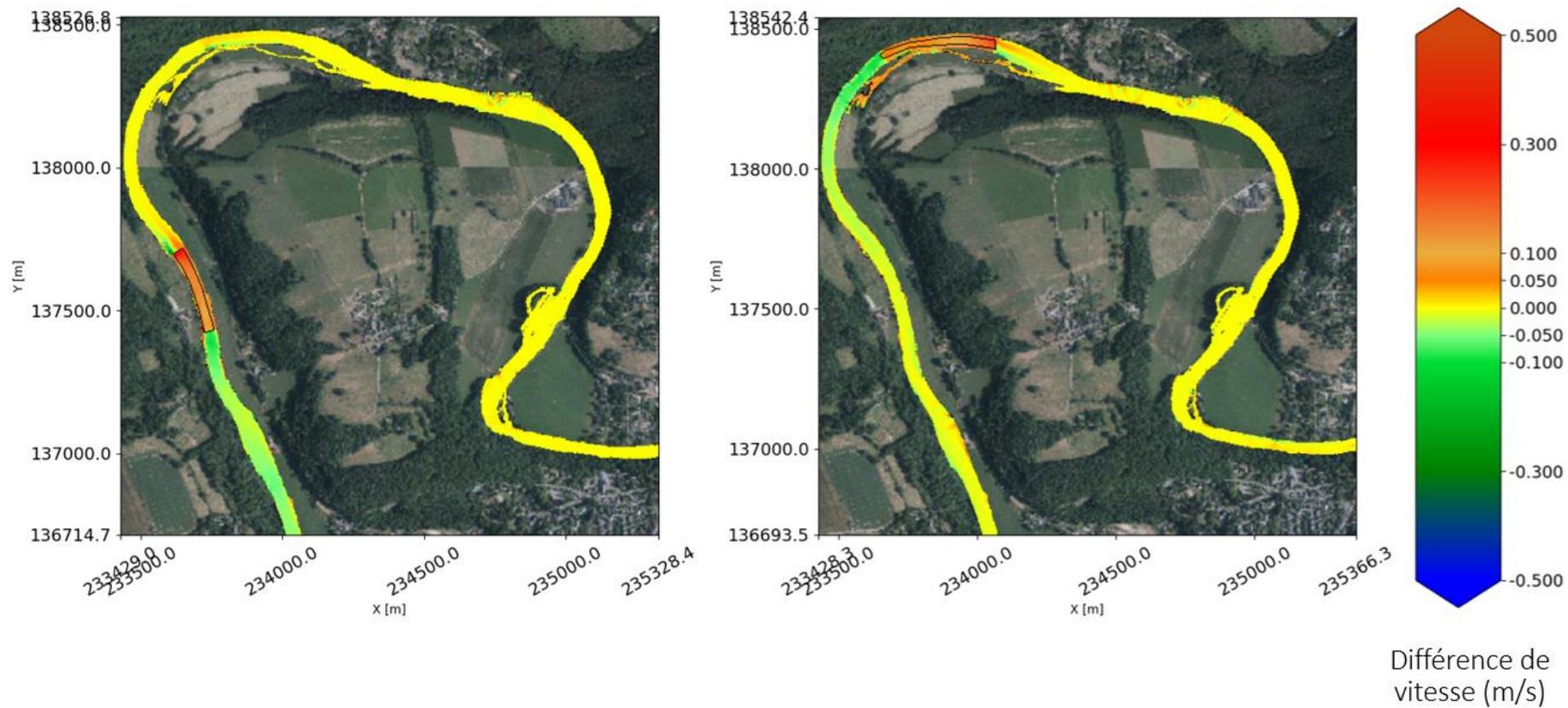
Annexe 34. Comparaison des variations de vitesse avant / après réinjection pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> (gauche) et un volume de 1250 m<sup>3</sup> (droite) pour un débit de 726 m<sup>3</sup>/s



Annexe 35. Comparaison des variations des hauteurs d'eau avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$



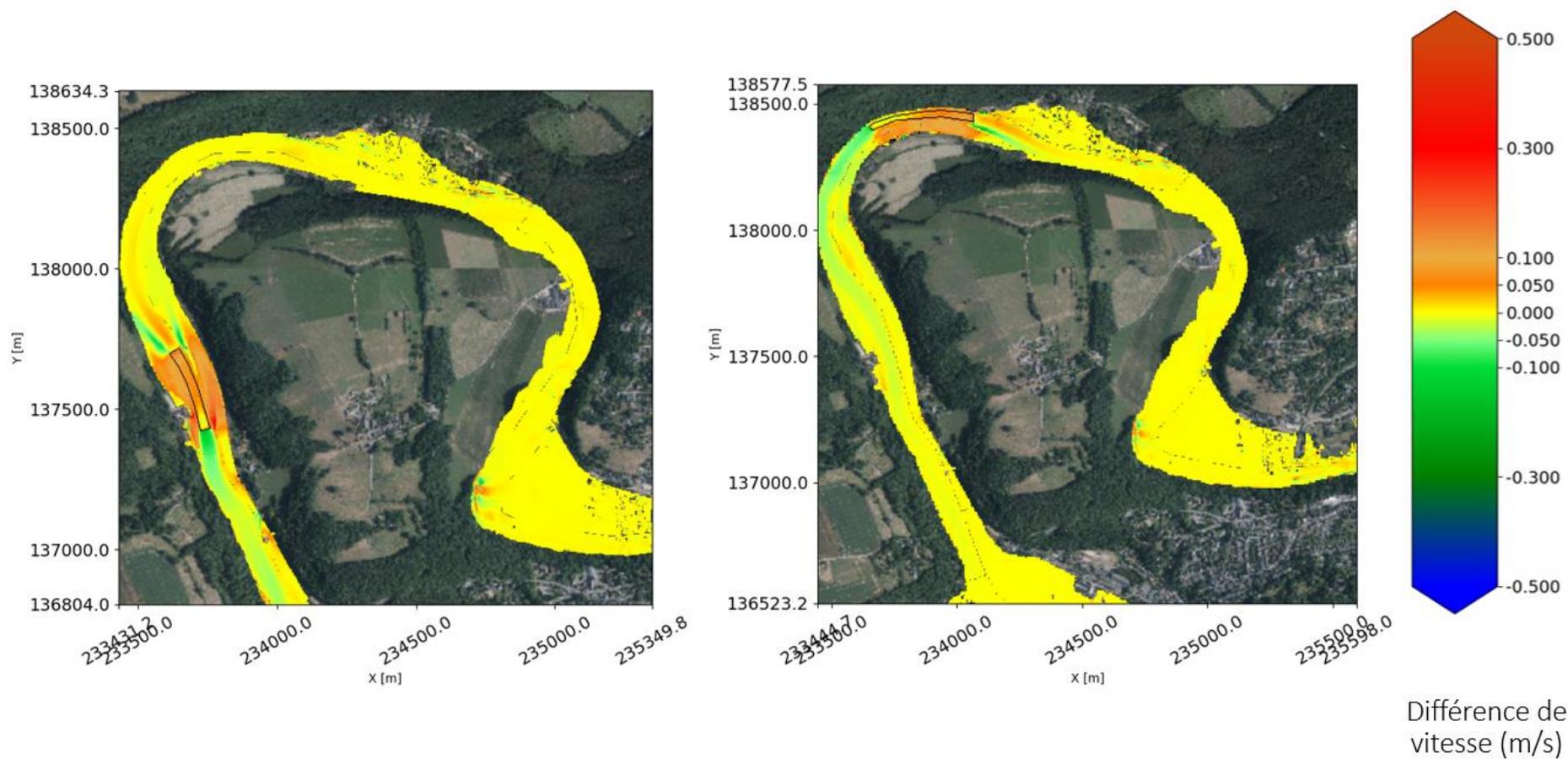
Annexe 36. Comparaison des variations de la norme des vitesses avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$



Annexe 37. Comparaison des variations des hauteurs d'eau avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$



Annexe 38. Comparaison des variations de la norme des vitesses avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation dans la boucle du méandre (droite) pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$



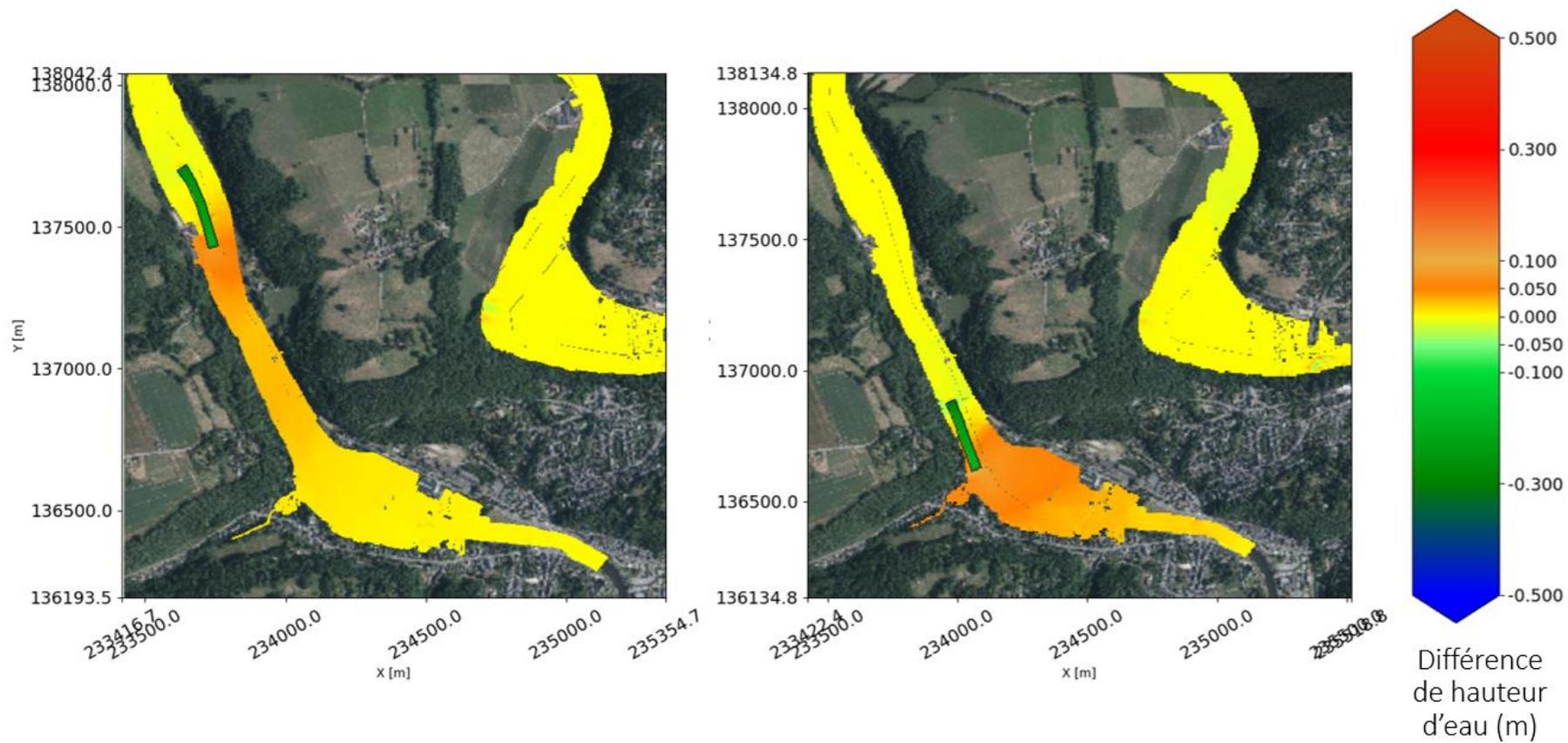
Annexe 39. Comparaison des variations de hauteurs avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$



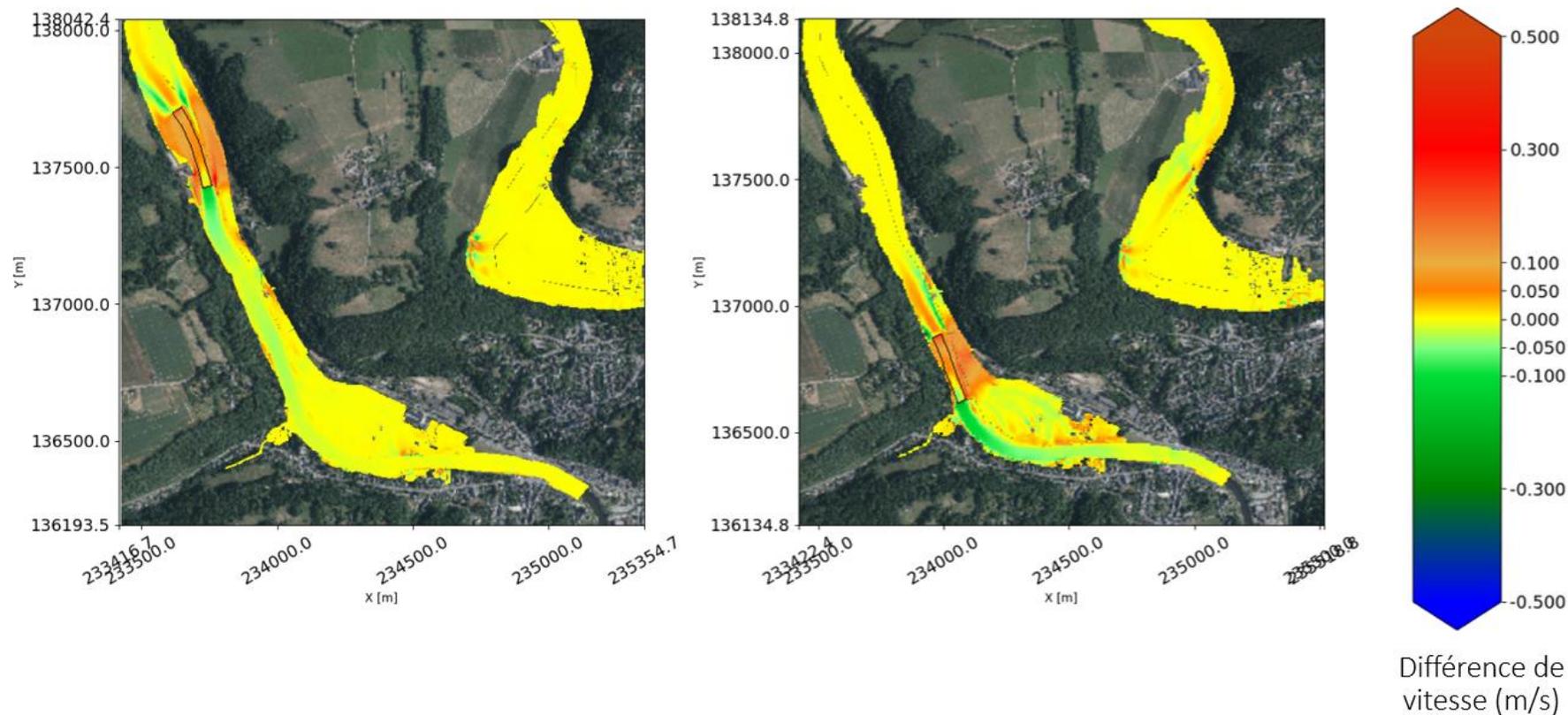
Annexe 40. Comparaison des variations des normes de vitesse avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$



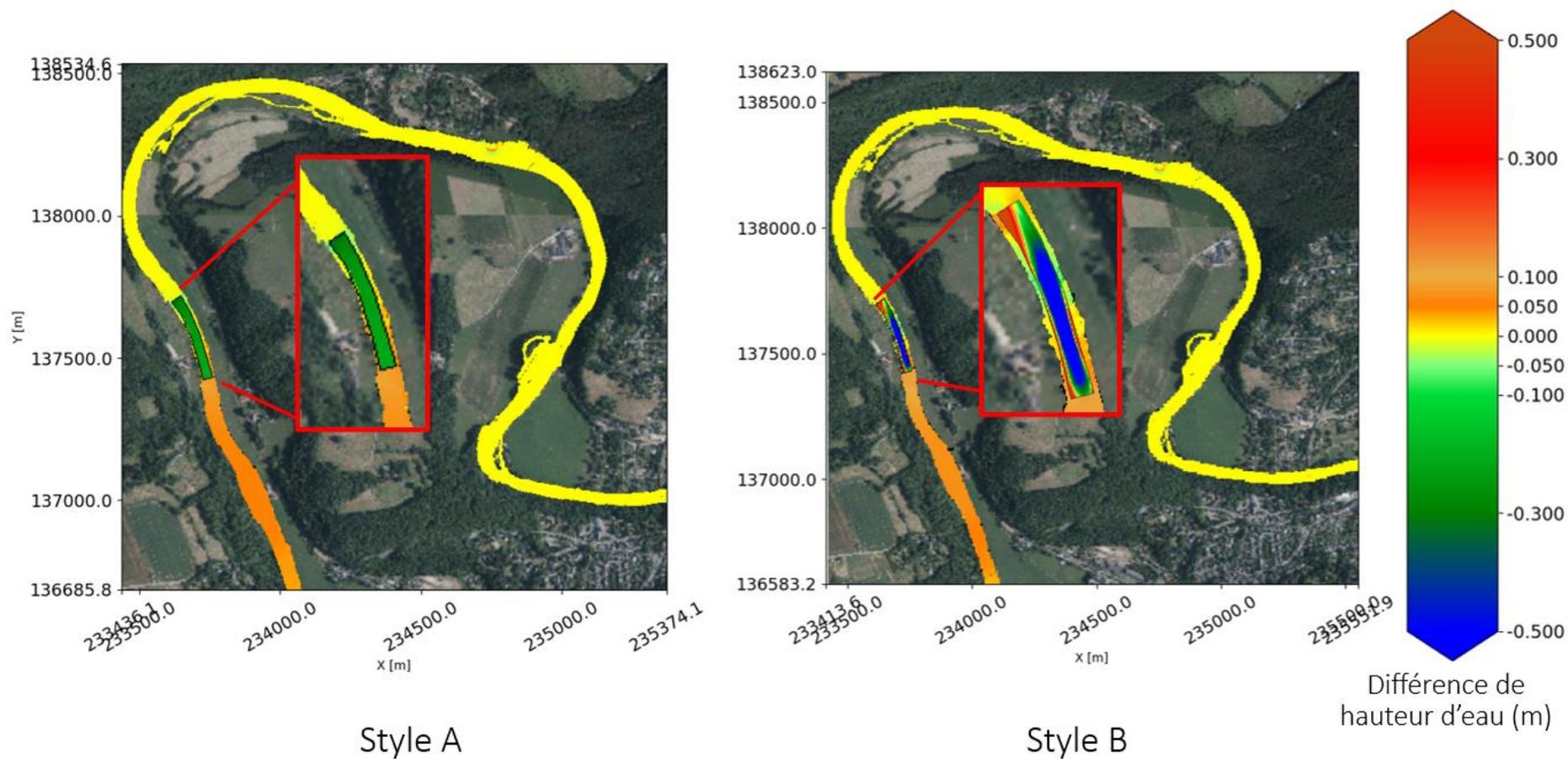
Annexe 41. Comparaison des variations de hauteurs d'eau avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initial d'une classe supérieure (droite) pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$



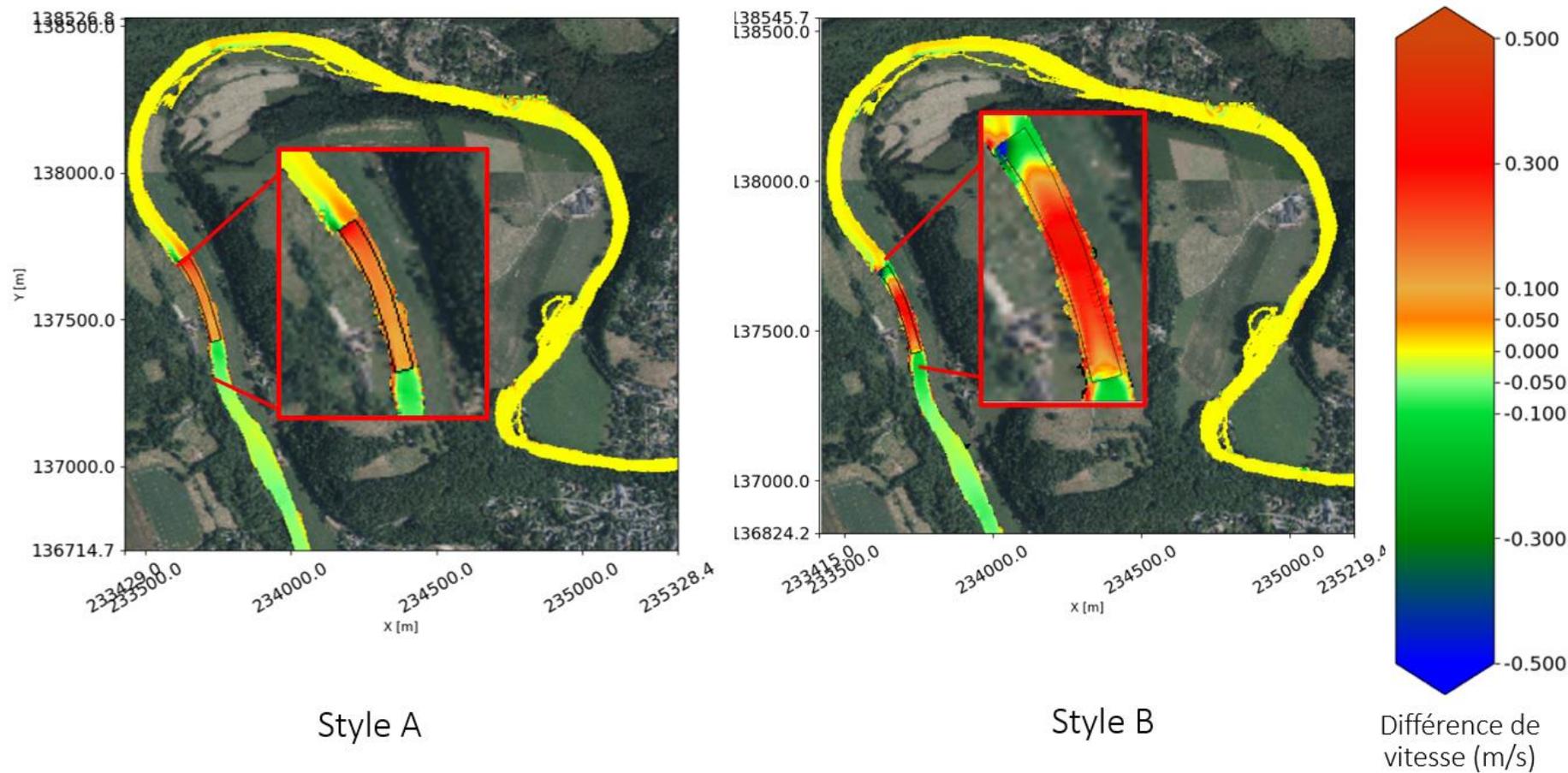
Annexe 42. Comparaison des variations de normes de vitesse avant / après réinjection pour une localisation dans l'axe rectiligne (gauche) et pour une localisation où la valeur du paramètre Shields initiale d'une classe supérieure (droite) pour un débit de  $726 \text{ m}^3/\text{s}$



Annexe 43. Différences de hauteurs d'eau avant / après réinjection pour une élévation constante de 0.25 m de la topographie (à gauche) et pour une altitude constante (à droite) pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> et un débit de 300 m<sup>3</sup>/s.



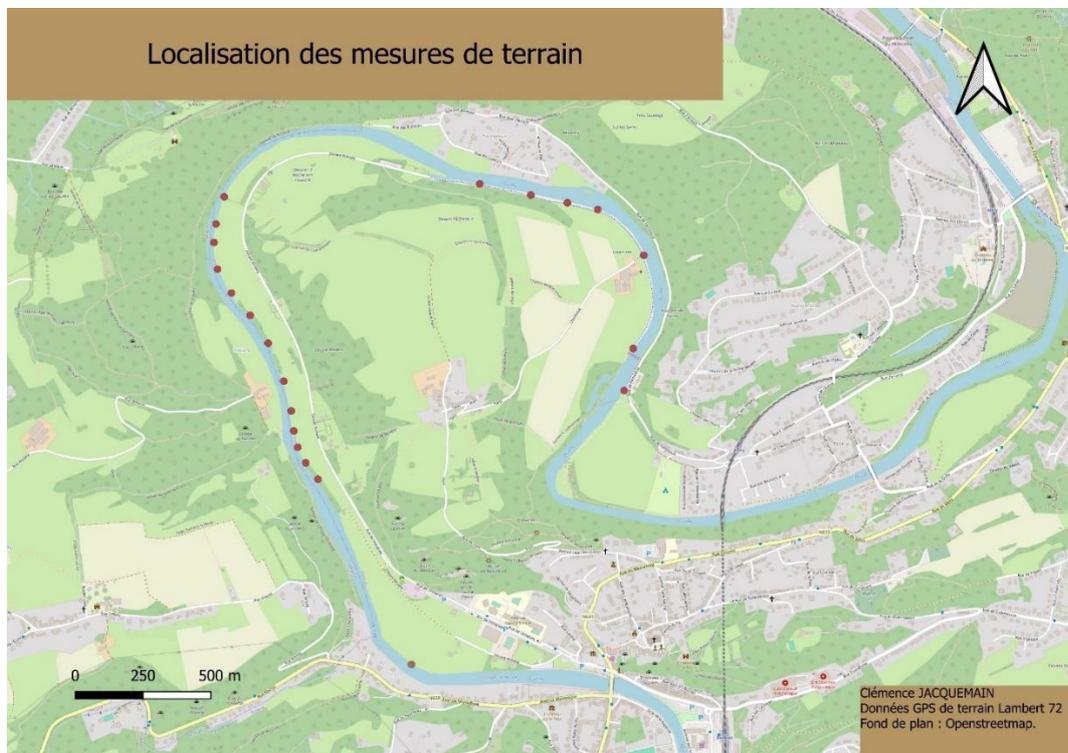
Annexe 44. Différences des normes de vitesse avant / après réinjection pour une élévation constante de 0.25 m de la topographie (à gauche) et pour une altitude constante (à droite) pour un volume de 2500 m<sup>3</sup> et un débit de 300 m<sup>3</sup>/s.



Annexe 45. GPS - RTK.



Annexe 46. Localisation des mesures de terrain d'altitude de surface libre.

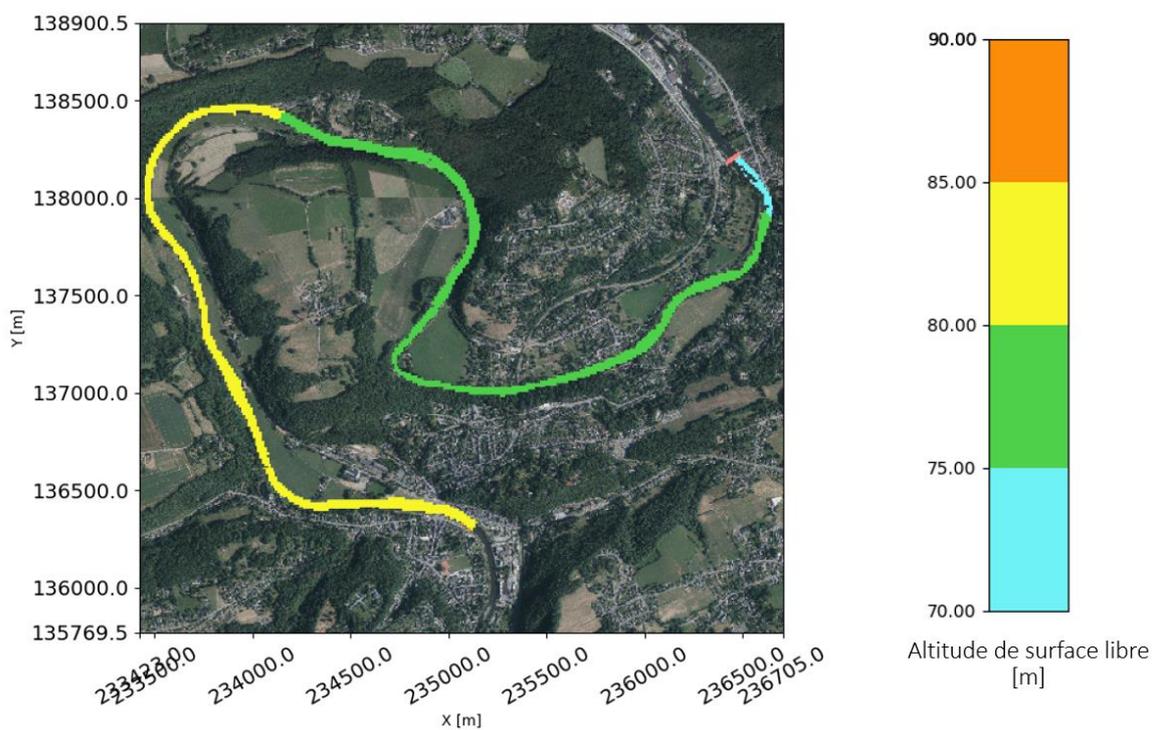


## FICHE ALTIMÉTRIQUE

## Sij9.1

<b>Commune</b> ESNEUX	<b>Matricule</b> Sij9.1	
<b>Nature du point</b> Repère en fonte (DNG)	<b>Altitude</b> H <sub>TAW</sub> = 88.910 m (09 février 2018)	
<b>Demi-planchette</b> 49/2N	<b>Lambert2008</b> x = 734977 m y = 636430 m	<b>Lambert72</b> x = 234974 m y = 136419 m
<b>Date de révision</b> 20 juillet 2018	Coordonnées digitalisées à l'échelle du 1:25 000, précision +/- 25m	
<b>Description</b> Route Tilff - Esneux. -Km 15.350 Pont sur l'Ourthe. -Culée N. Bajoyer E. -Escalier. A 142 de l'arête droite. A 75 cm de l'arête supérieure.	<b>Remarques</b> -	

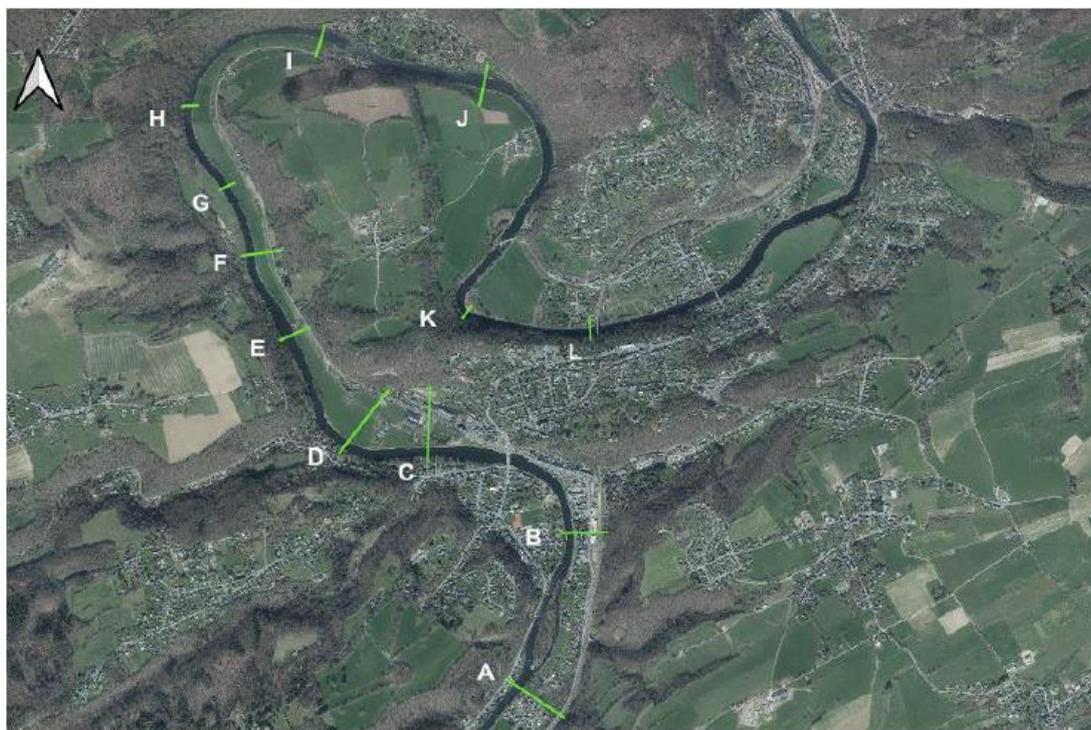
Annexe 48. Altitude de surface libre [m] pour un débit de 42.8 m<sup>3</sup>/s.



Annexe 49. Comparaison des altitudes de surface libre entre les données de terrain et numérique.

Coordonnée		Altitude de surface libre	
X_Lambert72	Y_Lambert72	Terrain	Numérique
233865.098	137158.183	81.844	81.6243
233820.284	137218.908	81.957	81.6063
233790.92	137276.654	81.936	81.5633
233776.589	137337.165	81.713	81.4826
233767.014	137411.192	81.834	81.3176
233739.855	137522.086	81.677	81.3073
233682.172	137662.701	81.492	81.2665
233615.791	137766.138	81.408	81.0976
233546.497	137848.976	81.143	80.8696
233495.27	137937.206	81.049	80.8199
233482.308	138036.581	80.974	80.6525
233490.123	138105.027	80.912	80.6329
233520.16	138205.723	80.813	80.5141
234461.635	138253.491	80.146	79.6635
234649.832	138212.607	80.202	79.6465
234784.513	138183.73	80.137	79.6277
234896.44	138158.495	79.996	79.6117
235066.055	137988.722	79.843	79.6062
235027.23	137642.961	80.036	79.6023
234993.685	137487.102	80.036	79.6011

Annexe 50. Zones sélectionnées pour la réalisation des profils en travers (Brault, 2023).



Brault Estelle, 2023  
source: Orthophoto 2021, Géoportail

