

Amélioration des conditions d'écoulement au droit de centrales hydroélectriques pour favoriser la dévalaison piscicole et optimiser la production hydroélectrique

Auteur : Hannachi, Lucas

Promoteur(s) : Erpicum, Sébastien; Archambeau, Pierre

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20399>

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.



Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées

Amélioration des conditions d'écoulement au droit de centrales hydroélectriques pour favoriser la dévalaison piscicole et optimiser la production hydroélectrique

Promoteur : Sébastien Erpicum

Co-promoteur : Pierre Archambeau

Membres du jury : Benjamin Dewals & Niels Duchesne

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur Civil en
Construction par Lucas Hannachi

Année académique 2023-2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Tout d'abord, je remercie sincèrement mon promoteur, Monsieur Sébastien Erpicum, pour son suivi attentif et ses conseils avisés tout au long de ce projet. Sa disponibilité, son expertise, et son soutien indéfectible ont été des atouts précieux pour mener à bien cette recherche.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à mon co-promoteur, Monsieur Pierre Archambeau, pour son accompagnement précieux dans le domaine de la modélisation numérique. Ses connaissances approfondies sur le logiciel Wolf et le code Wolf GPU ont été indispensables à la réalisation des simulations nécessaires à cette étude.

Un grand merci à Niels Duchesne et Frédéric Chaudoir, les exploitants des centrales hydroélectriques, pour leurs conseils précieux et les informations détaillées qu'ils m'ont fourni sur les trois sites étudiés.

Je remercie également Utashi Ciraane Docile pour ses conseils et son aide dans la relecture de ce mémoire. Sa perspicacité et son attention aux détails ont permis d'améliorer significativement la qualité de ce document.

Je tiens à exprimer ma gratitude la plus profonde à mes parents et ma soeur pour leur dévouement total et leur soutien constant tout au long de mon parcours académique. Ils m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions possibles et de surmonter les défis de ce projet.

Enfin, je remercie du fond du coeur ma copine et mes amis pour leur soutien, leurs échanges enrichissants sur le sujet, et leur aide précieuse dans la relecture de ce mémoire. Leur présence et leurs encouragements ont été une source constante de motivation et de réconfort.

À tous, je vous adresse mes plus sincères remerciements.

Résumé

Ce rapport porte sur l'optimisation de la gestion des sites hydroélectriques de Chanxhe, Méry, et des Grosses-Battes, avec pour objectif principal d'améliorer la dévalaison des smolts de saumon tout en maximisant la production hydroélectrique. Les objectifs spécifiques de cette étude incluent l'analyse des conditions hydrauliques actuelles des trois sites, l'identification des obstacles à la dévalaison des smolts, la proposition de modifications pour apporter une plus-value à la double problématique étudiée.

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie rigoureuse a été adoptée. Tout d'abord, une étude détaillée des conditions hydrauliques actuelles a été réalisée, incluant des simulations numériques pour identifier les zones critiques et les obstacles à la dévalaison. Ensuite, des modèles hydrauliques ont été utilisés pour simuler différents scénarios d'aménagement et de gestion des débits. Ces simulations ont permis d'évaluer les effets potentiels des modifications proposées sur les conditions de dévalaison et la production hydroélectrique. Enfin, des ajustements spécifiques de la bathymétrie de la rivière, la fermeture de certaines échancrures sur les déversoirs et des stratégies de gestion des débits ont été formulés pour chaque site, visant à créer des conditions hydrauliques favorables tout en optimisant la production hydroélectrique.

Les résultats de cette étude ont montré que les modifications proposées permettent d'améliorer significativement les conditions de dévalaison des smolts de saumon, tout en maintenant ou augmentant la production hydroélectrique. Pour le site de Chanxhe, une modification légère de la bathymétrie et l'amélioration de la gestion des débits réservés ont augmenté la franchissabilité de 83,9% à 89,1% et diminué le débit réservé non turbinable de 21,4%. À Méry, les ajustements de la bathymétrie ont permis de proposer des conditions favorables augmentant la franchissabilité du site 29% à 92,4%. Enfin, au Grosses-Battes, une meilleure gestion des débits réservés et des échancrures offrent à la fois une zone de conditions hydrauliques favorables pour la dévalaison du site et réduit le débit réservé non turbinable de 64%.

En conclusion, cette étude démontre qu'il est possible de concilier la protection des écosystèmes aquatiques avec la production hydroélectrique en utilisant des approches intégrées et adaptatives. Les résultats obtenus sont prometteurs et ouvrent la voie à une mise en oeuvre pratique des solutions proposées, ainsi qu'à des recherches futures pour optimiser davantage la gestion des sites hydroélectriques en faveur de la biodiversité et de l'efficacité énergétique.

Summary

This report focuses on optimizing the management of the Chanxhe, Méry, and Grosses-Battes hydroelectric sites, with the primary objective of improving the downstream migration of salmon smolts while maximizing hydroelectric production. The specific objectives of this study include analyzing the current hydraulic conditions of the three sites, identifying obstacles to smolt downstream migration, and proposing modifications to add value to the dual issue being studied.

To achieve these objectives, a rigorous methodology was adopted. First, a detailed study of the current hydraulic conditions was conducted, including numerical simulations to identify critical areas and obstacles to downstream migration. Next, hydraulic models were used to simulate various development and flow management scenarios. These simulations allowed for the evaluation of the potential effects of the proposed modifications on the conditions for downstream migration and hydroelectric production. Finally, specific adjustments to the riverbed bathymetry, the closure of certain incisions on the spillways, and flow management strategies were formulated for each site, aiming to create favorable hydraulic conditions while optimizing hydroelectric production.

The results of this study showed that the proposed modifications significantly improve the conditions for the downstream migration of salmon smolts while maintaining or increasing hydroelectric production. For the Chanxhe site, a slight modification of the bathymetry and enhanced management of reserved flows increased the passability from 83.9% to 89.1% and reduced the unturbined reserved flow by 21.4%. In Méry, bathymetry adjustments created favorable conditions, increasing the site's passability from 29% to 92.4%. Finally, in Grosses-Battes, better management of reserved flows and incisions offers both a favorable hydraulic conditions zone for the site's downstream migration and reduces the unturbined reserved flow by 64%.

In conclusion, this study demonstrates that it is possible to reconcile the protection of aquatic ecosystems with hydroelectric production by using integrated and adaptive approaches. The results obtained are promising and pave the way for the practical implementation of the proposed solutions, as well as future research to further optimize the management of hydroelectric sites in favor of biodiversity and energy efficiency.

Table des Matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduction | 1 |
| 1.1 | Contexte général | 1 |
| 1.2 | Importance de la dévalaison des smolts de saumon dans le cycle de vie de l'espèce | 1 |
| 1.3 | Hydroélectricité et franchissement piscicole des sites | 3 |
| 1.3.1 | Impacts sur le franchissement piscicole | 3 |
| 1.3.2 | Contraintes liées au débit réservé | 3 |
| 1.4 | Objectif de l'étude et justification de son importance | 4 |
| 2 | Contexte et état de l'art | 5 |
| 2.1 | Influence anthropique sur la dévalaison des poissons migrateurs | 5 |
| 2.1.1 | Les obstacles anthropiques | 5 |
| 2.1.2 | Technologies et aménagements pour faciliter la dévalaison des poissons migrateurs | 6 |
| 2.2 | Les différents facteurs impactant la dévalaison des smolts | 7 |
| 2.2.1 | Les conditions hydrauliques | 7 |
| 2.2.1.a | Vitesse du courant | 8 |
| 2.2.1.b | Gradient de vitesse | 9 |
| 2.2.1.c | Hauteur d'eau | 10 |
| 2.2.1.d | Gradient de hauteur d'eau | 11 |
| 2.2.2 | Facteurs environnementaux | 11 |
| 2.2.3 | Facteurs comportementaux | 12 |
| 2.3 | La production hydroélectrique | 12 |
| 2.3.1 | Processus de fonctionnement | 12 |
| 2.3.2 | Les turbines des micros centrales hydroélectriques | 13 |
| 2.3.2.a | Turbine Kaplan | 13 |
| 2.3.2.b | Turbine VLH | 14 |
| 2.3.2.c | Vis d'Archimède | 16 |
| 3 | Présentation des sites étudiés | 18 |
| 3.1 | Contexte général de l'Ourthe | 19 |
| 3.2 | Chanxhe | 21 |
| 3.2.1 | Présentation du site | 21 |
| 3.2.2 | Etude du site | 22 |
| 3.3 | Méry | 23 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3.1 | Présentation du site | 23 |
| 3.3.2 | Etude du site | 24 |
| 3.4 | Grosses-Battes | 25 |
| 3.4.1 | Présentation du site | 25 |
| 4 | Méthodologie | 27 |
| 4.1 | Outil numérique | 27 |
| 4.1.1 | Description | 27 |
| 4.1.2 | Défis de manipulation dans un environnement de développement logiciel en évolution | 28 |
| 4.2 | Données d'entrée, conditions initiales et conditions limites du schéma numérique | 28 |
| 4.2.1 | Sources des données d'entrée | 29 |
| 4.2.1.a | Chanxhe et Méry | 29 |
| 4.2.1.b | Grosses-Battes | 33 |
| 4.2.2 | Bornes d'étude de chaque site en terme de débit d'entrée | 36 |
| 4.2.3 | Conditions initiales | 39 |
| 4.2.4 | Conditions limites | 40 |
| 4.2.4.a | Chanxhe | 41 |
| 4.2.4.b | Méry | 41 |
| 4.2.4.c | Grosses-Battes | 41 |
| 4.3 | Procédure de travail | 42 |
| 5 | Confirmation des critères hydrodynamiques de la littérature | 43 |
| 5.1 | Méry | 43 |
| 5.2 | Chanxhe | 47 |
| 6 | Quantification de la franchissabilité des sites dans l'état actuel | 50 |
| 6.1 | Chanxhe | 51 |
| 6.1.1 | Etablissement du score actuel du site sur sa franchissabilité | 51 |
| 6.1.2 | Dégradation de la franchissabilité du site par débits inférieurs | 53 |
| 6.2 | Méry | 59 |
| 6.2.1 | Etablissement du score actuel du site sur sa franchissabilité | 59 |
| 6.2.2 | Dégradation de la franchissabilité du site par débits inférieurs | 61 |
| 6.3 | Grosses-Battes | 68 |
| 6.3.1 | Etablissement du score actuel du site sur sa franchissabilité | 68 |
| 6.3.2 | Dégradation de la franchissabilité du site par débits inférieurs | 70 |
| 7 | Modifications à apporter aux sites pour favoriser le franchissement piscicole et optimiser la production hydroélectrique | 75 |
| 7.1 | Chanxhe | 75 |
| 7.2 | Méry | 79 |
| 7.3 | Grosses-Battes | 82 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 8 | Discussion | 87 |
| 8.1 | Comparaison des sites entre eux | 87 |
| 8.2 | Robustesse du modèle utilisé | 89 |
| 9 | Conclusion | 91 |
| 9.1 | Rappel des objectifs | 91 |
| 9.2 | Synthèse de l'étude réalisée et rappel des résultats | 91 |
| 9.3 | Enseignements tirés des résultats | 93 |
| 9.4 | Perspectives futures | 93 |
| A | Annexe au chapitre 4 | 103 |

Liste des Figures

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Cycle de vie du saumon atlantique | 2 |
| 2.1 | Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique | 13 |
| 2.2 | Turbine Kaplan | 14 |
| 2.3 | Disposition de la turbine VLH | 15 |
| 2.4 | Description de la Turbine VLH | 16 |
| 2.5 | Vis d'Archimède | 17 |
| 3.1 | Géolocalisation du site hydroélectrique de Chanxhe | 19 |
| 3.2 | Géolocalisation du site de Méry | 20 |
| 3.3 | Localisation des trois sites | 20 |
| 3.4 | Les quatre zones du site de Chanxhe | 21 |
| 3.5 | Les zones du site de Méry | 24 |
| 3.6 | Vue aérienne du site des Grosses-Battes | 25 |
| 3.7 | Centrale hydroélectrique des Grosses-Battes | 26 |
| 3.8 | Incisions dans le déversoir | 26 |
| 4.1 | Vue aérienne du site de Chanxhe | 30 |
| 4.2 | Données bathymétriques du site de Chanxhe [m] | 30 |
| 4.3 | Vue aérienne du site de Méry | 31 |
| 4.4 | Données bathymétriques du site de Méry [m] | 31 |
| 4.5 | Zone d'exfiltration à Chanxhe | 32 |
| 4.6 | Zones d'infiltration à Chanxhe | 32 |
| 4.7 | Zone d'exfiltration à Méry | 33 |
| 4.8 | Zones d'infiltration à Méry | 33 |
| 4.9 | Données bathymétriques à compléter [m] | 34 |
| 4.10 | Données bathymétriques du site des Grosses-Battes [m] | 35 |
| 4.11 | Zone d'exfiltration aux Grosses-Battes | 36 |
| 4.12 | Zones d'infiltration aux Grosses-Battes | 36 |
| 4.13 | Courbe des débits classés au site de Chanxhe pendant la période de dévalaison des smolts entre 1999 et 2024 | 38 |
| 4.14 | Approximation de la courbe des débits classés au site de Méry pendant la période de dévalaison des smolts entre 1999 et 2024 | 39 |
| 4.15 | Courbe des débits classés au site des Grosses-Battes pendant la période de dé- valaison des smolts entre 1999 et 2024 | 39 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.16 | Incision sur le déversoir des Grosses-Battes | 40 |
| 5.1 | Tracé d'un smolt non-concluant: première détection au droit de la turbine Kaplan | 45 |
| 5.2 | Tracé d'un smolt non-concluant: détection en aval du barrage inappropriée . . . | 45 |
| 5.3 | Smolt - h_1 [m] - Méry | 46 |
| 5.4 | Smolt - u_1 [m/s] - Méry | 46 |
| 5.5 | Smolt - h_2 [m] - Méry | 47 |
| 5.6 | Smolt - u_2 [m/s] - Méry | 47 |
| 5.7 | Smolt - h_1 [m] - Chanxhe | 48 |
| 5.8 | Smolt - u_1 [m/s] - Chanxhe | 48 |
| 5.9 | Smolt - h_2 [m] - Chanxhe | 49 |
| 5.10 | Smolt - u_2 [m/s] - Chanxhe | 49 |
| 5.11 | Smolt - h_3 [m] - Chanxhe | 49 |
| 5.12 | Smolt - u_3 [m/s] - Chanxhe | 49 |
| 6.1 | Chanxhe / h / $Q=18m^3/s$ | 51 |
| 6.2 | Chanxhe / h / validité / $Q=18m^3/s$ | 51 |
| 6.3 | Chanxhe / \vec{u} / $Q=18m^3/s$ | 52 |
| 6.4 | Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=18m^3/s$ | 52 |
| 6.5 | Chanxhe / $\nabla\vec{u}$ / $Q=18m^3/s$ | 52 |
| 6.6 | Chanxhe / $\nabla\vec{u}$ / validité / $Q=18m^3/s$ | 52 |
| 6.7 | Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=18m^3/s$ | 53 |
| 6.8 | Chanxhe / h / validité / $Q=17,4m^3/s$ | 54 |
| 6.9 | Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=17,4m^3/s$ | 54 |
| 6.10 | Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=17,4m^3/s$ | 54 |
| 6.11 | Chanxhe / h / validité / $Q=16,7m^3/s$ | 55 |
| 6.12 | Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=16,7m^3/s$ | 55 |
| 6.13 | Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=16,7m^3/s$ | 55 |
| 6.14 | Chanxhe / h / validité / $Q=13,6m^3/s$ | 56 |
| 6.15 | Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=13,6m^3/s$ | 56 |
| 6.16 | Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=13,6m^3/s$ | 56 |
| 6.17 | Chanxhe / h / validité / $Q=12,8m^3/s$ | 57 |
| 6.18 | Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=12,8m^3/s$ | 57 |
| 6.19 | Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=12,8m^3/s$ | 57 |
| 6.20 | Chanxhe / h / validité / $Q=10m^3/s$ | 58 |
| 6.21 | Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=10m^3/s$ | 58 |
| 6.22 | Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=10m^3/s$ | 58 |
| 6.23 | Méry / h / $Q=18m^3/s$ | 59 |
| 6.24 | Méry / h / validité / $Q=18m^3/s$ | 59 |
| 6.25 | Méry / \vec{u} / $Q=18m^3/s$ | 60 |
| 6.26 | Méry / \vec{u} / validité / $Q=18m^3/s$ | 60 |
| 6.27 | Méry / $\nabla\vec{u}$ / $Q=18m^3/s$ | 60 |

| | | |
|------|--|----|
| 6.28 | Méry / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$ | 60 |
| 6.29 | Méry - superposition des critères hydrauliques - $Q=60\text{m}^3/\text{s}$ | 61 |
| 6.30 | Méry / h / validité / $Q=48\text{m}^3/\text{s}$ | 62 |
| 6.31 | Méry / \vec{u} / validité / $Q=48\text{m}^3/\text{s}$ | 62 |
| 6.32 | Méry - superposition des critères hydrauliques - $Q=48\text{m}^3/\text{s}$ | 62 |
| 6.33 | Méry / h / validité / $Q=38^3/\text{s}$ | 63 |
| 6.34 | Méry / \vec{u} / validité / $Q=38^3/\text{s}$ | 63 |
| 6.35 | Méry - superposition des critères hydrauliques - $Q=38^3/\text{s}$ | 63 |
| 6.36 | Méry / h / validité / $Q=27^3/\text{s}$ | 64 |
| 6.37 | Méry / \vec{u} / validité / $Q=27^3/\text{s}$ | 64 |
| 6.38 | Méry - superposition des critères hydrauliques - $Q=27^3/\text{s}$ | 64 |
| 6.39 | Méry / h / validité / $Q=19,9^3/\text{s}$ | 65 |
| 6.40 | Méry / \vec{u} / validité / $Q=19,9^3/\text{s}$ | 65 |
| 6.41 | Méry / superposition des critères hydrauliques / $Q=19,9^3/\text{s}$ | 65 |
| 6.42 | Méry / h / validité / $Q=18,4^3/\text{s}$ | 66 |
| 6.43 | Méry / \vec{u} / validité / $Q=18,4^3/\text{s}$ | 66 |
| 6.44 | Méry / superposition des critères hydrauliques / $Q=18,4 \text{ m}^3/\text{s}$ | 66 |
| 6.45 | Méry / h / validité / $Q=5,15 \text{ m}^3/\text{s}$ | 67 |
| 6.46 | Méry / \vec{u} / validité / $Q=5,15 \text{ m}^3/\text{s}$ | 67 |
| 6.47 | Méry / superposition des critères hydrauliques / $Q=5,15 \text{ m}^3/\text{s}$ | 67 |
| 6.48 | GB / h / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$ | 68 |
| 6.49 | GB / h / validité / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$ | 68 |
| 6.50 | Grosses-Battes / \vec{u} / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$ | 69 |
| 6.51 | Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$ | 69 |
| 6.52 | Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$ | 69 |
| 6.53 | Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$ | 69 |
| 6.54 | Grosses-Battes / superposition des critères hydrauliques / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$ | 70 |
| 6.55 | Grosses-Battes / h / validité / $Q=33\text{m}^3/\text{s}$ | 71 |
| 6.56 | Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=33^3/\text{s}$ | 71 |
| 6.57 | Grosses-Battes / superposition des critères hydrauliques / validité / $Q=33^3/\text{s}$. . | 71 |
| 6.58 | Grosses-Battes / h / validité / $Q=25^3/\text{s}$ | 72 |
| 6.59 | Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=25^3/\text{s}$ | 72 |
| 6.60 | Grosses-Battes / superposition des critères hydrauliques / validité / $Q=25^3/\text{s}$. . | 72 |
| 6.61 | Grosses-Battes / h / validité / $Q=22^3/\text{s}$ | 73 |
| 6.62 | Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=22^3/\text{s}$ | 73 |
| 6.63 | Grosses-Battes / superposition des critères hydrauliques / validité / $Q=22^3/\text{s}$. . | 73 |
| 6.64 | Grosses-Battes / h / validité / $Q=19^3/\text{s}$ | 74 |
| 6.65 | Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=19^3/\text{s}$ | 74 |
| 6.66 | Grosses-Battes / superposition des critères hydrauliques / validité / $Q=19^3/\text{s}$. . | 74 |
| 7.1 | Bathymétrie actuelle du site Chanxhe | 76 |

| | | |
|------|---|-----|
| 7.2 | Amélioration de la bathymétrie du site de Chanxhe | 76 |
| 7.3 | Chanxhe / h / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$ | 77 |
| 7.4 | Chanxhe / h / validité / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$ | 77 |
| 7.5 | Chanxhe / \vec{u} / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$ | 78 |
| 7.6 | Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$ | 78 |
| 7.7 | Chanxhe / $\nabla\vec{u}$ / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$ | 78 |
| 7.8 | Chanxhe / $\nabla\vec{u}$ / validité / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$ | 78 |
| 7.9 | Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$ | 79 |
| 7.10 | Bathymétrie actuelle du site de Méry | 80 |
| 7.11 | Amélioration de la bathymétrie du site de Méry | 80 |
| 7.12 | Méry / h / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ | 81 |
| 7.13 | Méry / h / validité / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ | 81 |
| 7.14 | Méry / \vec{u} / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ | 81 |
| 7.15 | Méry / \vec{u} / validité / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ | 81 |
| 7.16 | Méry / $\nabla\vec{u}$ / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ | 82 |
| 7.17 | Méry / $\nabla\vec{u}$ / validité / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ | 82 |
| 7.18 | Méry / superposition des critères hydrauliques / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ | 82 |
| 7.19 | Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=33\text{m}^3/\text{s}$ / actuellement | 84 |
| 7.20 | Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=33\text{m}^3/\text{s}$ / amélioré | 84 |
| 7.21 | Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ / actuellement | 85 |
| 7.22 | Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ / amélioré | 85 |
| 7.23 | Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=25\text{m}^3/\text{s}$ / amélioré | 85 |
| 7.24 | Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=28\text{m}^3/\text{s}$ / amélioré | 85 |
| 8.1 | Chanxhe / superposition des critères hydrauliques et d'un tracé de smolt / $Q=12\text{m}^3/\text{s}$ | 89 |
| 8.2 | Chanxhe / superposition des critères hydrauliques et d'un tracé de smolt / $Q=20\text{m}^3/\text{s}$ | 89 |
| 8.3 | Méry / superposition des critères hydrauliques et d'un tracé de smolt / $Q=27,5\text{m}^3/\text{s}$ | 90 |
| 8.4 | Méry / superposition des critères hydrauliques et d'un tracé de smolt / $Q=18,4\text{m}^3/\text{s}$ | 90 |
| 1 | Photo n°1 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage | 103 |
| 2 | Photo n°2 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage | 104 |
| 3 | Photo n°3 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage | 104 |
| 4 | Photo n°4 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage | 105 |
| 5 | Photo n°5 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage | 105 |
| 6 | Photo n°6 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage | 106 |

Liste des Tableaux

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Critères de vitesse du courant | 9 |
| 2.2 | Critères de gradient de vitesse | 9 |
| 2.3 | Critères de hauteur d'eau - Gamme disponible connue | 10 |
| 2.4 | Critère de lame d'eau sur ouvrage de dévalaison | 10 |
| 3.1 | Débits réservés du site de Chanxhe | 22 |
| 3.2 | Débits réservés du site de Méry | 23 |
| 3.3 | Débits réservés du site des Grosses-Battes | 26 |
| 4.1 | Seuil minimum du débit des trois sites pour cette étude | 37 |
| 4.2 | Seuil maximum du débit des trois sites pour cette étude | 37 |
| 4.3 | Froude moyen dans le canal de l'ourthe au site de Chanxhe calculé sur base des simulations de Reardy et al. (2023). | 41 |
| 5.1 | Scénarios de suivis de smolts à Méry | 44 |
| 5.2 | Scénarios de suivis de smolts à Chanxhe | 47 |
| 6.1 | Scénario 18 m ³ /s à Chanxhe | 51 |
| 6.2 | Scénario 17,4 m ³ /s à Chanxhe | 53 |
| 6.3 | Scénario 16,7 m ³ /s à Chanxhe | 54 |
| 6.4 | Scénario 13,6 m ³ /s à Chanxhe | 55 |
| 6.5 | Scénario 12,8 m ³ /s à Chanxhe | 56 |
| 6.6 | Scénario 10 m ³ /s à Chanxhe | 57 |
| 6.7 | Scénario 60 m ³ /s à Méry | 59 |
| 6.8 | Scénario 48 m ³ /s à Méry | 61 |
| 6.9 | Scénario 38 m ³ /s à Méry | 62 |
| 6.10 | Scénario 27 m ³ /s à Méry | 63 |
| 6.11 | Scénario 19,9 m ³ /s à Méry | 64 |
| 6.12 | Scénario 18,4 m ³ /s à Méry | 65 |
| 6.13 | Scénario 5,15 m ³ /s à Méry | 66 |
| 6.14 | Scénario 34 m ³ /s aux Grosses-Battes | 68 |
| 6.15 | Scénario 33 m ³ /s aux Grosses-Battes | 70 |
| 6.16 | Scénario 25 m ³ /s aux Grosses-Battes | 71 |
| 6.17 | Scénario 22 m ³ /s aux Grosses-Battes | 72 |
| 6.18 | Scénario 19,4 m ³ /s aux Grosses-Battes | 73 |

| | | |
|-----|--|----|
| 7.1 | Améliorations / Scénario 16 m ³ /s à Chanxhe | 77 |
| 7.2 | Améliorations / Scénario 19 m ³ /s à Méry | 80 |
| 7.3 | Améliorations / Scénario 33 m ³ /s aux Grosses-Battes | 83 |
| 7.4 | Améliorations / Scénario 19 m ³ /s aux Grosses-Battes | 84 |
| 7.5 | Améliorations / Scénario 25 m ³ /s aux Grosses-Battes | 86 |
| 7.6 | Améliorations / Scénario 28 m ³ /s aux Grosses-Battes | 86 |
| 8.1 | Comparatif des améliorations apportées sur chaque sites | 88 |
| 8.2 | Comparatif de la plus-value apportée sur chaque sites | 88 |

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte général

Les rivières jouent un rôle fondamental dans nos écosystèmes et nos sociétés. Elles sont des habitats vitaux pour une diversité d'espèces, notamment les poissons et une flore riche qui dépendent de l'eau douce pour leur survie (Allan et al., 1997). Par ailleurs, les rivières servent de voies de déplacement essentielles, non seulement pour les poissons migrateurs tels que les saumons atlantiques, mais aussi pour le transport de marchandises et de personnes par bateau (Gelwick et al., 2000).

En plus de leur importance écologique et logistique, les rivières sont exploitées pour la production d'énergie renouvelable, en particulier par le biais des centrales hydroélectriques. Ces installations convertissent l'énergie cinétique de l'eau en électricité, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la transition énergétique (Demarco et al., 2020). Cependant, cette utilisation des rivières n'est pas sans conséquence. Les barrages et autres infrastructures hydroélectriques peuvent entraver la migration des poissons, perturbant leur cycle de vie et, dans certains cas, menaçant leur survie (Noonan et al., 2012).

Dans une perspective de développement durable, il est crucial de concilier ces différents rôles des rivières de manière harmonieuse. Cela implique de minimiser les impacts négatifs des activités humaines sur les écosystèmes fluviaux tout en maximisant les bénéfices économiques et sociaux. Ce mémoire se concentre sur les interactions entre la production d'énergie hydroélectrique et la migration des poissons, avec un accent particulier sur la dévalaison des smolts de saumon atlantique. La dévalaison, ou migration vers l'aval des jeunes saumons vers l'océan, est une étape critique de leur cycle de vie. Assurer la sécurité et l'efficacité de cette migration est essentiel pour la préservation des populations de saumons (Havn et al., 2018).

1.2 Importance de la dévalaison des smolts de saumon dans le cycle de vie de l'espèce

La dévalaison est le premier grand voyage entrepris par les smolts de saumon. Généralement, cette migration a lieu au printemps, lorsque les conditions environnementales sont propices.

Après avoir passé douze à vingt-quatre mois dans les rivières et les ruisseaux où ils sont nés, les smolts sont prêts à entreprendre leur périple océanique. Ce voyage vers l'océan est crucial pour leur croissance et leur développement ultérieurs. Une fois dans l'océan, les smolts de saumon bénéficient d'un environnement riche en nutriments qui favorise une croissance rapide. Cette période de croissance accélérée est essentielle pour qu'ils atteignent la maturité sexuelle et la taille nécessaire à leur retour vers leurs rivières natales pour se reproduire. La FIGURE 1.1 illustre le cycle de vie du saumon atlantique.

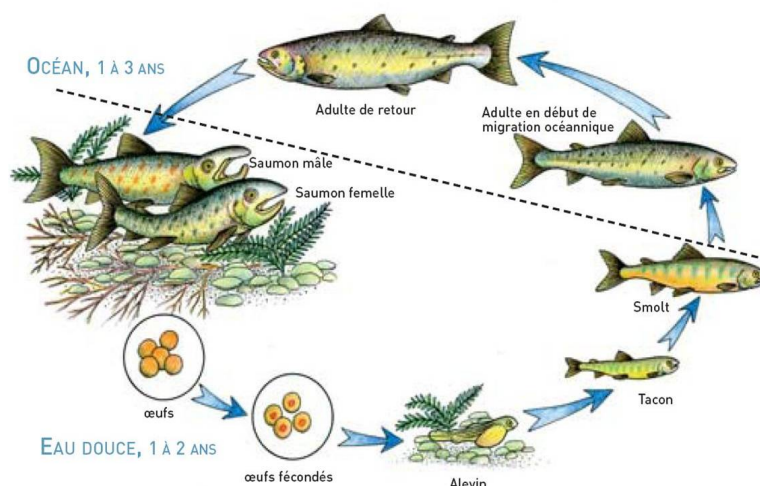


Figure 1.1: Cycle de vie du saumon atlantique ¹

La dévalaison assure donc la transition entre les habitats d'eau douce et d'eau salée, offrant ainsi aux smolts la possibilité de se développer pleinement. Les conditions environnementales jouent un rôle crucial dans le succès de la dévalaison des smolts. Des facteurs tels que la température de l'eau, les conditions hydrodynamiques des rivières et la disponibilité de nourriture peuvent influencer le moment et la réussite de la migration des smolts vers l'océan (Jonsson & Jonsson, 2011). Les variations dans ces conditions peuvent avoir des répercussions importantes sur la survie des smolts et, par conséquent, sur la population globale de saumons (McCormick et al., 1998).

La dévalaison des smolts de saumon a également un impact significatif sur l'écosystème des rivières et des zones côtières. En tant que prédateurs clés, les saumons jouent un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre écologique. Leur migration vers l'océan et leur retour ultérieur apportent des nutriments vitaux des océans aux écosystèmes fluviaux, favorisant ainsi la croissance de la biomasse et soutenant une variété d'espèces, de la faune aux plantes (Naiman et al., 2002).

Malheureusement, la dévalaison des smolts de saumon est confrontée à de nombreux défis et menaces. La dégradation de l'habitat, la pollution, les barrages et les changements climatiques perturbent les processus migratoires et mettent en péril la survie des saumons (Gustafson et al., 2007). Pour assurer la pérennité de l'espèce, il est crucial de mettre en œuvre des mesures de conservation efficaces pour protéger les habitats essentiels et restaurer les voies migratoires.

¹(2018, Décembre 10). La présence du Saumon sur la rivière Dore. L'Echo du Parc Livradois-Forez Disponible sur : <https://www.echo-livradois-forez.org/la-presence-du-saumon-sur-la-riviere-dore/>

En conclusion, la dévalaison des smolts de saumon est bien plus qu'un simple déplacement d'un environnement à un autre. C'est un élément fondamental du cycle de vie du saumon, crucial pour sa survie et pour la santé des écosystèmes aquatiques. Comprendre et protéger ce processus migratoire est essentiel pour assurer la perpétuation de cette espèce emblématique et la préservation des écosystèmes fluviaux et côtiers qui dépendent d'elle.

1.3 Hydroélectricité et franchissement piscicole des sites

L'hydroélectricité est une source d'énergie renouvelable cruciale qui utilise la force de l'eau pour produire de l'électricité. Malgré ses avantages environnementaux en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'hydroélectricité peut avoir des impacts significatifs sur les écosystèmes aquatiques, notamment sur les poissons migrateurs.

1.3.1 Impacts sur le franchissement piscicole

Les barrages hydroélectriques constituent des obstacles majeurs pour les poissons migrateurs tels que les saumons et les anguilles, perturbant leurs cycles de migration et de reproduction. Selon Larinier et al. (2001), les principales difficultés pour les poissons comprennent :

1. Blocage Physique : Les barrages empêchent les poissons de migrer en amont, réduisant l'accès à leurs habitats de frai;
2. Mortalité par les Turbines : Les poissons peuvent être blessés ou tués lorsqu'ils passent à travers les turbines des centrales hydroélectriques;
3. Altération des Conditions Hydrologiques : Les fluctuations artificielles des débits et des niveaux d'eau peuvent modifier les habitats aquatiques, affectant les conditions de frai et de croissance des poissons.

Pour atténuer ces impacts, des dispositifs de franchissement comme les passes à poissons et les échelles à poissons sont souvent installés. L'efficacité de ces dispositifs varie cependant et nécessite une conception et une gestion minutieuses pour répondre aux besoins des différentes espèces piscicoles (Kemp & O'Hanley, 2010).

1.3.2 Contraintes liées au débit réservé

Le débit réservé est la quantité minimale d'eau qui doit être maintenue non turbinée pour assurer la migration aval des poissons et la santé écologique du cours d'eau. Cette contrainte est essentielle pour préserver les écosystèmes aquatiques et permettre la survie des espèces locales. Selon Poff et Zimmerman (2010), les principales considérations incluent :

1. Migration aval des poissons : Le débit réservé permet aux poissons de migrer en aval sans être entraînés dans les turbines, réduisant ainsi la mortalité piscicole;

2. Maintien des habitats aquatiques : Un débit réservé adéquat aide à maintenir des habitats aquatiques sains, nécessaires pour les poissons et autres organismes aquatiques;
3. Qualité et température de l'eau : Le débit réservé contribue à maintenir une qualité et une température de l'eau suffisantes pour les écosystèmes aquatiques.

Ces contraintes peuvent limiter la quantité d'eau disponible pour la production d'électricité, nécessitant une gestion équilibrée entre les besoins énergétiques et la protection des écosystèmes aquatiques (Williams, 2008).

1.4 Objectif de l'étude et justification de son importance

Le programme "Meuse Saumon 2000" ² en Wallonie vise à réintroduire le saumon atlantique (*Salmo salar*) dans les rivières de la région, particulièrement dans le bassin de la Meuse. Ce projet a été lancé en réponse à la disparition de cette espèce due à la dégradation de la qualité de l'eau et à la construction de barrages infranchissables pour les poissons,

La présence des saumons dans les rivières belges revêt une importance écologique et économique significative. Sur le plan écologique, les saumons sont des espèces clés qui jouent un rôle crucial dans les écosystèmes aquatiques. Leur migration de l'océan vers les rivières pour se reproduire est un processus essentiel qui contribue au transport de nutriments, à la diversification génétique et au maintien de l'équilibre écologique. De plus, les saumons sont souvent considérés comme des espèces sentinelles de la santé des écosystèmes fluviaux, leur présence ou leur absence pouvant refléter l'état de ces environnements aquatiques.

D'un point de vue économique, la présence de saumons dans les rivières belges peut avoir des retombées positives importantes. De plus, les saumons contribuent à soutenir les industries de la pêche et du tourisme en offrant des opportunités d'emploi et de développement économique local.

Probablement en raison d'un manque de connaissance sur leurs réponses comportementale, les stratégies destinées à faciliter la migration aval des smolts de saumons atlantiques sont souvent peu efficaces, ne permettant pas une progression en toute sécurité et sans délai. L'association de la télémétrie radio en 2D, pour le suivi de smolts en dévalaison, avec la modélisation hydrodynamique des sites étudiés s'est révélée être un outil précieux pour approfondir la compréhension de l'impact des facteurs hydrodynamiques sur la sélection des itinéraires migratoires des poissons aux centrales hydroélectriques. Cette étude vise à comprendre le comportement des smolts de saumon atlantique vis à vis des conditions hydrodynamiques aux droit des micros centrales hydroélectriques et à quantifier des critères hydrauliques rendant le passage attrayant pour les smolts. Mais aussi, la franchissabilité des sites actuels fera l'objet d'une évaluation quantitative. Enfin, des améliorations sur la disposition des sites seront imaginées et analysées pour tenter d'améliorer la franchissabilité de chaque site tout en maintenant le taux de productivité hydroélectrique, voire en l'augmentant.

²2007. Projet Meuse Saumon 2000. environnement.wallonie. Disponible sur : <http://environnement.wallonie.be/publi/education/saumon2000.pdf>

Chapitre 2

Contexte et état de l’art

2.1 Influence anthropique sur la dévalaison des poissons migrateurs

L’influence anthropique sur la dévalaison des poissons migrateurs est un aspect crucial à considérer dans la gestion et la conservation des populations de poissons dans les rivières belges, telles que l’Ourthe. Les activités humaines, telles que la construction de barrages, les aménagements hydroélectriques, l’urbanisation et la pollution, ont un impact significatif sur les schémas de migration des poissons migrateurs. Par exemple, les barrages et les stations hydroélectriques fragmentent les habitats fluviaux et créent des obstacles physiques qui entravent ou empêchent la dévalaison des poissons (Katopodis & Williams, 2011). De plus, l’urbanisation le long des cours d’eau peut entraîner une altération des habitats et une augmentation de la pollution de l’eau, ce qui affecte la qualité de l’habitat et la capacité des poissons à migrer (Walsh et al., 2005). La pollution de l’eau, notamment les rejets industriels et agricoles, peut compromettre la santé des poissons migrateurs et perturber leurs comportements de migration (Scholz et al., 2011). Il est donc impératif de prendre en compte ces influences anthropiques dans la planification et la gestion des ressources aquatiques afin de minimiser les impacts négatifs sur les populations de poissons migrateurs.

2.1.1 Les obstacles anthropiques

Les obstacles hydrauliques, tels que les barrages et les stations hydroélectriques, ont un impact significatif sur la dévalaison des poissons migrateurs, y compris les smolts de saumons, dans les rivières belges comme l’Ourthe. Ces structures peuvent créer des barrières physiques qui entravent ou empêchent la migration en aval des poissons. Les barrages et les stations hydroélectriques modifient les conditions hydrauliques naturelles des cours d’eau, créant des turbulences, des remous et des changements soudains de vitesse du courant qui peuvent désorienter les poissons migrateurs et rendre leur passage difficile voire impossible (Larinier, 2001). De plus, la présence de turbines et d’autres équipements hydroélectriques peut présenter un danger direct pour les poissons en provoquant des blessures ou des mortalités lors de la tentative de dévalai-

son (Castro-Santos, 2006). Les barrages et les stations hydroélectriques fragmentent également les habitats fluviaux et isolent les populations de poissons, ce qui peut avoir des conséquences néfastes sur la diversité génétique et la viabilité des populations de poissons migrateurs (Ferguson et al., 2011). Ainsi, la conception et la gestion des infrastructures hydroélectriques doivent prendre en compte les besoins de déplacement des poissons migrateurs et mettre en œuvre des mesures d'atténuation telles que les passages à poissons pour faciliter la dévalaison en aval et minimiser les impacts sur les populations de poissons migrateurs (Lacroix & Knox, 2004).

2.1.2 Technologies et aménagements pour faciliter la dévalaison des poissons migrateurs

La conception et la mise en œuvre de technologies et d'aménagements spécifiques jouent un rôle crucial dans la migration des poissons. Ces solutions visent à réduire l'entrave des obstacles anthropiques et à améliorer l'accessibilité des voies de migration en aval pour les poissons. Parmi les technologies et aménagements les plus couramment utilisés, il existe :

- Les échelles à poissons, qui sont des structures conçues pour permettre aux poissons de franchir les barrages et les autres obstacles hydrauliques. Bien qu'étant disponible aux espèces piscicoles tant pour la montaison que la dévalaison, cet ouvrage ne semble pas convenir aux espèces piscicoles en dévalaison. L'échelle à poisson trouve son utilité principale lors de leur montaison. Ces échelles sont généralement constituées de séries de bassins ou de rampes avec des débits d'eau contrôlés, offrant aux poissons des voies alternatives pour contourner les barrages (Larinier, 2001). Désormais, tout projet d'implantation ou de restauration d'obstacle hydraulique doit obligatoirement inclure la construction d'une échelle à poisson si aucune n'existait auparavant, conformément aux exigences de la directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE).
- Les vis d'Archimède, qui sont des dispositifs mécaniques rotatifs, d'abord utilisés pour la production hydroélectrique, peuvent aussi transporter les poissons en amont ou en aval des obstacles hydrauliques tels que les barrages (Calles & Greenberg, 2009). Les poissons sont capturés à la base de la vis et transportés à travers un tube en rotation jusqu'à une ouverture en amont ou en aval du barrage, permettant ainsi leur dévalaison ou leur remontée. De plus, les vis d'Archimède installées dans les microcentrales hydroélectriques permettent de produire de l'électricité de manière efficace.
- Les turbines Kaplan "fish friendly", qui sont des turbines hydroélectriques spécialement conçues pour réduire les risques pour les poissons migrateurs lors de leur passage à travers les installations hydroélectriques. Ces turbines sont dotées de conceptions de pales et de configurations de flux d'eau qui minimisent les dommages aux poissons et facilitent leur dévalaison (Castro-Santos, 2006).
- Les by-pass, qui sont des canaux ou des passages alternatifs autour des barrages ou des installations hydroélectriques, offrant aux poissons une voie de dévalaison sans obstacle.

Ces passages peuvent contourner complètement les barrages ou utiliser des dispositifs de guidage pour diriger les poissons vers des échelles à poissons ou d'autres dispositifs de franchissement (Lacroix & Knox, 2004).

- Les échancrures sur les déversoirs, qui sont des modifications apportées à la crête de la structure pour créer des zones où les conditions hydrauliques sont modifiées localement (lame d'eau sur le déversoir, débit et vitesse augmentés). Ces échancrures permettent aux poissons de trouver une incision locale le long d'un lieu qui peut se montrer peu favorable pour la dévalaison : le déversoir (Newton et al., 2019).
- Les déversoirs eux-mêmes peuvent être conçus et aménagés pour faciliter la dévalaison des poissons migrateurs en fournissant des rampes ou des pentes douces permettant aux poissons de franchir l'obstacle en aval à condition que la lame d'eau qui surplombe la crête soit suffisante (Larinier, 2001).
- En plus des solutions traditionnelles, de nombreuses autres idées innovantes émergent pour faciliter la dévalaison des poissons migrateurs. Cela peut inclure l'utilisation de systèmes de guidage acoustique ou magnétique ou encore l'installation de passages souterrains pour offrir des voies alternatives de migration en aval.

2.2 Les différents facteurs impactant la dévalaison des smolts

L'introduction des trois sous-sections suivantes offre un aperçu complet des divers facteurs qui influencent la dévalaison des smolts de saumons dans les rivières. Les conditions hydrauliques jouent un rôle crucial dans la migration en aval des smolts, influençant leur capacité à naviguer autour des obstacles et à franchir les barrages hydroélectriques (Williams, 2008). Les facteurs environnementaux, tels que la température de l'eau, la luminosité et la qualité de l'eau, sont également essentiels, car ils peuvent affecter le comportement et la navigation des smolts pendant leur migration (Castro-Santos, 2006). Enfin, les facteurs comportementaux, y compris l'orientation et la navigation des smolts en groupe, jouent un rôle significatif dans leur capacité à dévaler avec succès les barrages et les obstacles (Lacroix et al., 2004). Comprendre l'interaction de ces différents facteurs est crucial pour développer des stratégies de gestion et de conservation efficaces pour les populations de saumons migrateurs dans les rivières belges. La présente étude se déroulant dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude en génie civil hydraulique, c'est naturellement sur cet aspect que ce travail se concentre.

2.2.1 Les conditions hydrauliques

Les smolts de saumons, lors de leur migration en aval, ont tendance à suivre le débit principal des cours d'eau, souvent déterminé par le débit principal. Cette préférence est largement documentée dans la littérature scientifique. L'étude de Lacroix et Knox (2004) sur la technologie de passage des poissons met en évidence l'importance de comprendre le comportement des poissons

migrateurs, notamment leur tendance à suivre le débit principal pour naviguer efficacement à travers les cours d'eau.

Les travaux de Haro, Odeh et Castro-Santos (1998) sur le dépassement des obstacles à la migration des poissons soulignent l'importance de concevoir des solutions d'ingénierie qui prennent en compte le comportement naturel des poissons, y compris leur tendance à suivre le débit principal.

Enfin, les méthodes de suivi des migrations des poissons décrites par Franklin et al. (2012) fournissent des informations précieuses sur les déplacements des poissons migrateurs, confirmant ainsi leur préférence pour le débit principal lors de la dévalaison.

Ces études démontrent de manière convergente que les smolts de saumons et autres poissons migrateurs ont une forte propension à suivre le débit principal lors de leur migration en aval. Cependant, les poissons ne sont pas aptes à ressentir un débit. En effet, les poissons ne possèdent pas de capteur sensoriel capable de mesurer directement le débit d'un flux. Leurs capacités sensorielles leur permettent plutôt de détecter des caractéristiques telles que la vitesse du courant, les turbulences et les variations de pression, qui peuvent leur fournir des indications sur les conditions hydrodynamiques de leur environnement.

Ainsi, lorsque l'on parle du comportement des poissons migrateurs par rapport au débit d'un cours d'eau, il est plus précis de considérer comment ces facteurs hydrodynamiques, tels que la vitesse du courant, les turbulences et les variations de pression, influencent leur navigation et leur déplacement en aval. Les smolts de saumons peuvent être sensibles à ces caractéristiques du flux, et leur comportement de migration est influencé par ces facteurs.

En résumé, il est plus exact de dire que les poissons migrateurs réagissent aux caractéristiques hydrodynamiques du cours d'eau, telles que la vitesse du courant, la hauteur d'eau, les variations de pression et les turbulences, plutôt qu'à une perception directe du débit de l'écoulement à surface libre.

2.2.1.a Vitesse du courant

Plusieurs études ont examiné l'effet de la vitesse du courant sur la dévalaison des smolts, en identifiant les vitesses préférentielles qui favorisent ce processus.

Silva et al. (2009) ont constaté que les smolts de saumons atlantiques préfèrent des vitesses de courant comprises entre 0,3 et 1,0 m/s pour une dévalaison efficace. Cette gamme de vitesses permet aux smolts de naviguer rapidement en aval tout en conservant suffisamment d'énergie pour la migration.

Kemp et al. (2010) appuient le fait que la vitesse du courant doit être suffisamment faible pour permettre aux smolts de nager efficacement vers l'aval sans se fatiguer excessivement. Ils fixent tous deux un maxima à 0,6 m/s pour une nage aisée des smolts en dévalaison. Bien que le courant s'écoule dans la direction du smolt en dévalaison, des vitesses de courant trop élevées les obligeraient à dépenser plus d'énergie pour maintenir leur position ou pour naviguer correctement dans le courant, ce qui peut entraîner une fatigue excessive.

Quasiment toutes les études convergent vers la même conclusion sur les courants faibles. A

savoir, si la vitesse du courant est trop faible, le smolt est désorienté. Tout comme plusieurs autres études, Renardy et al. (2023) fixe 0,15-0,2 m/s comme seuil inférieur pour une dévalaison sans désorientation.

Le TABLEAU 2.1 présente un tableau de synthèse sur la vitesse du courant préférentielle pour la dévalaison des smolts de saumons.

| Vitesse | | |
|------------------|------------------|------------------------|
| Valeur min [m/s] | Valeur max [m/s] | Sources |
| 0,3 | 1 | Silva et al. (2009) |
| 0,2 | 0,6 | Kemp et al. (2011) |
| 0,2 | 0,6 | Bjornn et al. (1991) |
| 0,2 | 0,5-1 | Simmons et al. (2024) |
| 0,15-0,2 | / | Renardy et al. (2021) |
| 0,5 | 1 | Machiels et al. (2019) |
| / | 1 | Haro et al. (2019) |
| 0,2 | / | Jebria et al. (2021) |
| 0,2 | 0,5 | Renardy et al. (2023) |
| 0,2 | / | Renardy et al. (2023) |

Tableau 2.1: Critères de vitesse du courant

La littérature scientifique permet de conclure que la vitesse d'écoulement idéale pour la dévalaison des smolts se situe entre 0,2 m/s et 1 m/s.

2.2.1.b Gradient de vitesse

Le gradient spatial de vitesse est peu abordé dans la littérature. Cependant, lorsque le sujet est évoqué, la réponse est unanime: le gradient de vitesse doit être le plus petit possible pour que l'écoulement soit attractif pour le smolt de saumon atlantique. Enders et al. (2012) et Haro et al. (1998) ont chiffré un seuil de 1 m/s/m comme gradient de vitesse à ne pas dépasser pour voir une zone d'écoulement attirer un jeune salmonidé (TABLEAU 2.2)

| Gradient de vitesse | | |
|---------------------|--------------------|----------------------|
| Valeur min [m/s/m] | Valeur max [m/s/m] | Sources |
| / | 1 | Enders et al. (2012) |
| / | 1 | Haro et al (1998) |

Tableau 2.2: Critères de gradient de vitesse

En conclusion, d'après la littérature, le gradient de vitesse du courant est inversement proportionnel à l'attractivité aux smolts d'une zone d'écoulement, un delta de 1 m/s/m est suffisant pour repousser définitivement le poisson.

2.2.1.c Hauteur d'eau

Le TABLEAU 2.3 regroupe les valeurs minimales et maximales en terme de hauteur issues de la littérature. D'après une étude de Renardy et al. (2023) utilisant la radiotélémétrie 2D pour suivre les smolts in situ, ces derniers privilégiaient des profondeurs d'eau intermédiaires, évitant généralement les eaux peu profondes (moins de 1 mètre) et les eaux profondes (plus de 3 mètres). Dans une autre étude similaire concernant un autre site, la même équipe a constaté que les profondeurs d'eau inférieur à 1m étaient moins approchées par les smolts si de plus profondes zones étaient disponible.

| Hauteur d'eau naturelle de l'écoulement [m] | | | | |
|---|------------|----------------|------------|-------------------------------|
| Gamme disponible | | Gamme préférée | | Sources |
| Valeur min | Valeur max | Valeur min | Valeur max | |
| 0,03 | 2,25 | 1 | 2,25 | Renardy et al. (2023) chanxhe |
| 0 | 3,5 | 1,5 | 2,5 | Renardy et al. (2023) MERY |
| 1 | 40 | 1 | 4 | Rivinoja (2005) |

Tableau 2.3: Critères de hauteur d'eau - Gamme disponible connue

En conclusion, le critère de hauteur d'eau favorable retenu se situe entre 1 et 2,5 mètres.

En ce qui concerne la hauteur de la lame d'eau à partir de laquelle un smolt de saumon atlantique se sent à l'aise pour dévaler par dessus un ouvrage, Arnekleiv et al. (2007) ont objectivé une valeur de douze centimètres nécessaire pour rendre attractif la voie de passage. Baudoin et al. (2014) ont exposé une donnée commune aux différentes espèces piscicoles sur la lame d'eau minimum à atteindre sur un ouvrage de dévalaison pour le rendre effectif. Ils ont fixé une relation entre la hauteur de la lame d'eau et la hauteur du poisson. D'après eux, il faudrait deux fois et demi la hauteur du poisson comme hauteur de lame d'eau. Or, un smolt de saumon mesure en moyenne 5 centimètre de haut. Le calcul mène à une hauteur de lame d'eau de douze centimètres et demi minimum pour attirer un smolt de saumon à dévaler par une lame d'eau déversante. Cette valeur concorde avec l'étude de Arnekleiv et al. (2007) (TABLEAU 2.4)

| Lame d'eau sur ouvrage de dévalaison [m] | |
|--|-------------------------|
| Valeur min | Sources |
| 0,12 | Arnekleiv et al. (2007) |
| $2,5 \cdot h_{smolt,max} = 0,125$ | Baudoin et al. (2014) |

Tableau 2.4: Critère de lame d'eau sur ouvrage de dévalaison

Finalement, le critère de hauteur de lame d'eau sur ouvrage de dévalaison retenu est de 13 cm.

2.2.1.d Gradient de hauteur d'eau

La variation de la hauteur d'eau dans les rivières peut avoir un impact significatif sur ce processus de migration.

Des études telles que celle de Silva et al. (2009) ont montré que les smolts de saumons sont sensibles aux variations de la hauteur d'eau lors de leur migration en aval. Une diminution soudaine de la hauteur d'eau peut créer des obstacles à leur déplacement, entravant ainsi leur progression vers l'océan.

De plus, des recherches menées par Pollock et al. (2022) ont révélé que des fluctuations importantes de la hauteur d'eau peuvent modifier les caractéristiques hydrauliques des cours d'eau, affectant ainsi la capacité des smolts à naviguer efficacement. Les variations de hauteur d'eau peuvent influencer la vitesse du courant et la formation de turbulences, ce qui peut rendre la migration aval plus difficile pour les poissons. Pour une même largeur du lit d'une rivière, si la hauteur d'eau diminue, la section mouillée de l'écoulement diminue également. Ainsi, pour un même débit, si la section mouillée diminue, la vitesse augmente.

En outre, l'étude de Renardy et al. (2022) a montré que la construction de barrages et d'autres infrastructures hydrauliques peut impacter la hauteur d'eau dans les rivières, créant ainsi des obstacles supplémentaires pour la migration des smolts de saumons. Les variations artificielles de la hauteur d'eau perturbent les schémas naturels de migration et compromettent la survie des poissons.

En conclusion, la variation de la hauteur d'eau dans les rivières peut avoir un impact significatif sur la migration aval des smolts de saumons. Ces variations, qu'elles soient naturelles ou causées par des interventions humaines, peuvent influencer la capacité des smolts à naviguer efficacement à travers les cours d'eau et peuvent compromettre le succès de leur migration vers l'océan. Pour rendre une zone d'écoulement attractive pour les smolts, le gradient de hauteur d'eau doit donc être minimisé.

2.2.2 Facteurs environnementaux

Outre les conditions hydrauliques, plusieurs autres facteurs environnementaux peuvent influencer la dévalaison des smolts de saumons dans les rivières belges, telles que l'Ourthe.

Des études ont montré que les températures inférieures à 5°C peuvent ralentir la migration, tandis que des températures supérieures à 15°C peuvent augmenter le stress et la mortalité des smolts. Par exemple, McCullough et al. (1999) indiquent que les smolts présentent des performances de migration optimales dans cette plage de température. À des températures en dehors de cette gamme, les smolts peuvent subir des effets négatifs. Des températures trop basses peuvent réduire leur métabolisme et leur mobilité, tandis que des températures trop élevées peuvent entraîner une déshydratation, un épuisement et une vulnérabilité accrue aux maladies et aux prédateurs (Brett, 1952).

La luminosité et la photopériode, c'est-à-dire la durée du jour, peuvent également influencer le comportement de migration des smolts de saumons. Les smolts sont sensibles aux variations de luminosité et de photopériode, qui peuvent affecter leurs rythmes biologiques et leur ori-

entation lors de la dévalaison . Des études ont montré que les smolts utilisent la lumière du jour comme un indice pour leur migration en aval, ajustant leur comportement en fonction des changements de luminosité (Castro-Santos, 2006).

La qualité de l'eau, y compris les niveaux de pollution, l'eau trouble et la qualité de l'habitat, peut avoir un impact significatif sur la dévalaison des smolts de saumons. Les smolts sont sensibles à la qualité de leur environnement aquatique, et des conditions environnementales défavorables peuvent perturber leur comportement de migration (Wedemeyer et al., 1984). La pollution de l'eau, par exemple, peut affecter la santé et le comportement des smolts, tandis que l'eau trouble peut réduire la visibilité et compliquer la navigation.

2.2.3 Facteurs comportementaux

Les smolts se déplacent souvent en groupes serrés, un comportement qui peut améliorer leur capacité à naviguer efficacement à travers les environnements fluviaux perturbés. Ce regroupement permet une meilleure synchronisation des mouvements et réduit les risques individuels liés à la prédation et à l'épuisement énergétique (Lacroix et al., 2004).

2.3 La production hydroélectrique

D'après l'étude de Kumar et al. (2011), la production hydroélectrique joue un rôle crucial dans la transition vers les énergies renouvelables, en offrant une source d'énergie propre et fiable. Elle contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en fournissant une production d'électricité stable et prévisible. De plus, les centrales hydroélectriques peuvent répondre rapidement aux fluctuations de la demande en énergie, ce qui en fait un complément essentiel aux autres sources d'énergie renouvelable intermittentes comme le solaire et l'éolien.

2.3.1 Processus de fonctionnement

La production hydroélectrique utilise l'énergie cinétique de l'eau pour actionner des turbines, qui à leur tour entraînent des générateurs électriques. Le processus peut être divisé en plusieurs étapes :

- Capture de l'eau : l'eau est capturée à partir de sources naturelles telles que les rivières;
- Conduite forcée : l'eau est ensuite acheminée à travers des conduites forcées, qui dirigent le flux d'eau vers les turbines avec une grande pression;
- Turbines : l'eau transfère sa charge hydraulique aux turbines, convertissant l'énergie cinétique en énergie mécanique;
- Générateurs : les turbines entraînent des générateurs électriques, produisant de l'électricité;
- Transformateurs: les transformateurs servent à convertir l'électricité produite à une tension appropriée pour la distribution dans le réseau électrique.

- Distribution : l'électricité produite est ensuite distribuée via un réseau électrique pour être utilisée par les consommateurs.

La FIGURE 2.1 illustre le principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.

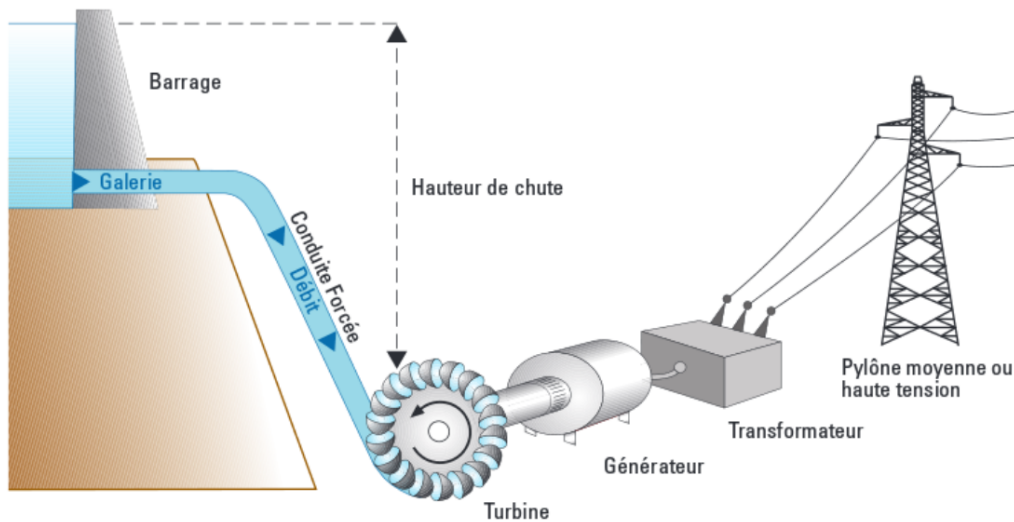


Figure 2.1: Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique ¹

Le débit nominal d'une turbine hydroélectrique fait référence au volume d'eau par seconde qui est prévu pour être utilisé par la turbine lorsque celle-ci fonctionne de manière optimale, généralement exprimée en mètres cubes par seconde (m^3/s) ou en litres par seconde (l/s). Ce débit est déterminé à la conception de la turbine par les caractéristiques hydrauliques du site, et il est crucial pour assurer un fonctionnement optimal de la centrale hydroélectrique en fournissant une production d'électricité constante et fiable. L'optimum niveau production hydroélectrique pour chaque site est donc d'avoisiner ce débit constamment.

2.3.2 Les turbines des micros centrales hydroélectriques

2.3.2.a Turbine Kaplan

La turbine hydraulique Kaplan (FIGURE 2.2) est une turbine à réaction réputée pour sa flexibilité opérationnelle et son efficacité énergétique (Brekke, 2012). Dotée de pales réglables, cette turbine est particulièrement adaptée aux environnements à faible chute d'eau et à débit élevé, offrant ainsi une solution efficace pour une gamme étendue de conditions hydrauliques (Polák 2021).

¹(2018). La petite hydraulique. Centrales Villageoise sur : <https://www.centralesvillageoises.fr/la-petite-hydraulique>



Figure 2.2: Turbine Kaplan ²

L'élément central de la conception de la turbine Kaplan est son distributeur conique qui dirige l'eau vers les pales réglables. Ces pales, souvent similaires à des hélices, peuvent être ajustées en angle pour optimiser les performances de la turbine en fonction des variations du débit d'eau et de la chute (Philippart & Sonny 2003). Cette capacité d'ajustement permet à la turbine Kaplan de maintenir une efficacité élevée sur une plage étendue de débits, ce qui en fait un choix populaire pour les centrales hydroélectriques situées sur des rivières sujettes à des fluctuations importantes.

Il existe des préoccupations quant aux effets néfastes des turbines Kaplan sur la dévalaison piscicole. En raison de la conception des pales et de la force d'aspiration générée par ces turbines, les poissons en migration avale peuvent être entraînés vers les pales, ce qui peut amener des blessures ou même la mortalité des poissons. Cette caractéristique constitue un obstacle majeur pour les espèces migratrices telles que les saumons, compromettant ainsi leurs cycles de vie et leurs populations.

2.3.2.b Turbine VLH

La désignation "VLH" abrégée pour "Very Low Head" désigne les turbines spécifiquement conçues pour les applications à très faible hauteur de chute. C'est une variante de la turbine Kaplan proposant une alternative aux turbines conventionnelles. Contrairement aux approches traditionnelles qui privilégiaient la réduction des dimensions et du débit spécifique, le concept VLH (FIGURE 2.3) se distingue en visant à minimiser les coûts grâce à des diamètres de roue plus importants et à un débit spécifique réduit.

²(Mis à jour le 7 juin 2024). Kaplan Turbine: Working Principle, Design & Simulation. Simscale sur : <https://www.simscale.com/blog/kaplan-turbine/>

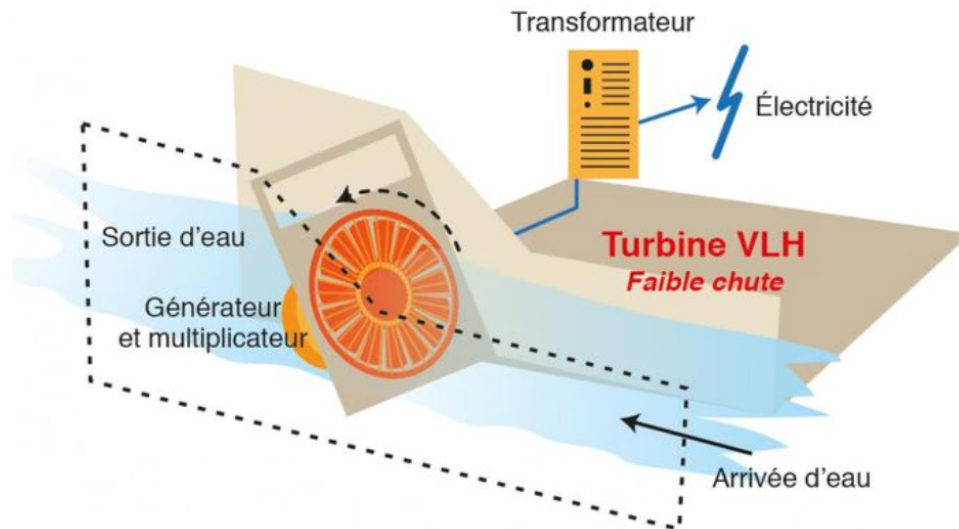


Figure 2.3: Disposition de la turbine VLH ³

Ces turbines ont été développées pour exploiter les structures transversales des rivières négligées jusqu'à présent en raison de leur faible hauteur de chute. La gamme standardisée des turbines VLH propose des diamètres de roue compris entre 3,15 et 5 mètres, adaptés aux sites présentant une faible hauteur de chute nette jusqu'à 1,5 mètres, avec une capacité de traitement d'eau variant de 2 m³/s à 35 m³/s en fonction des conditions du site. L'approche simplifiée du génie civil pour les installations VLH permet des structures de petite taille et peu d'excavation, réduisant ainsi les coûts et les délais de construction. La conception de la turbine VLH intègre plusieurs caractéristiques innovantes, notamment une turbine Kaplan standardisée à 8 pales réglables, une structure autoportante pour un montage rapide, un alternateur à attaque directe et un dispositif d'arrêt du débit sans vannes de tête. La FIGURE 2.4 illustre les différents composants d'une turbine VLH.

³Centrale hydroélectrique avec TURBINE VLH pour les très basses chutes de la petite hydraulique. Pinterest sur : <https://www.pinterest.fr/pin/180495897546846359/>

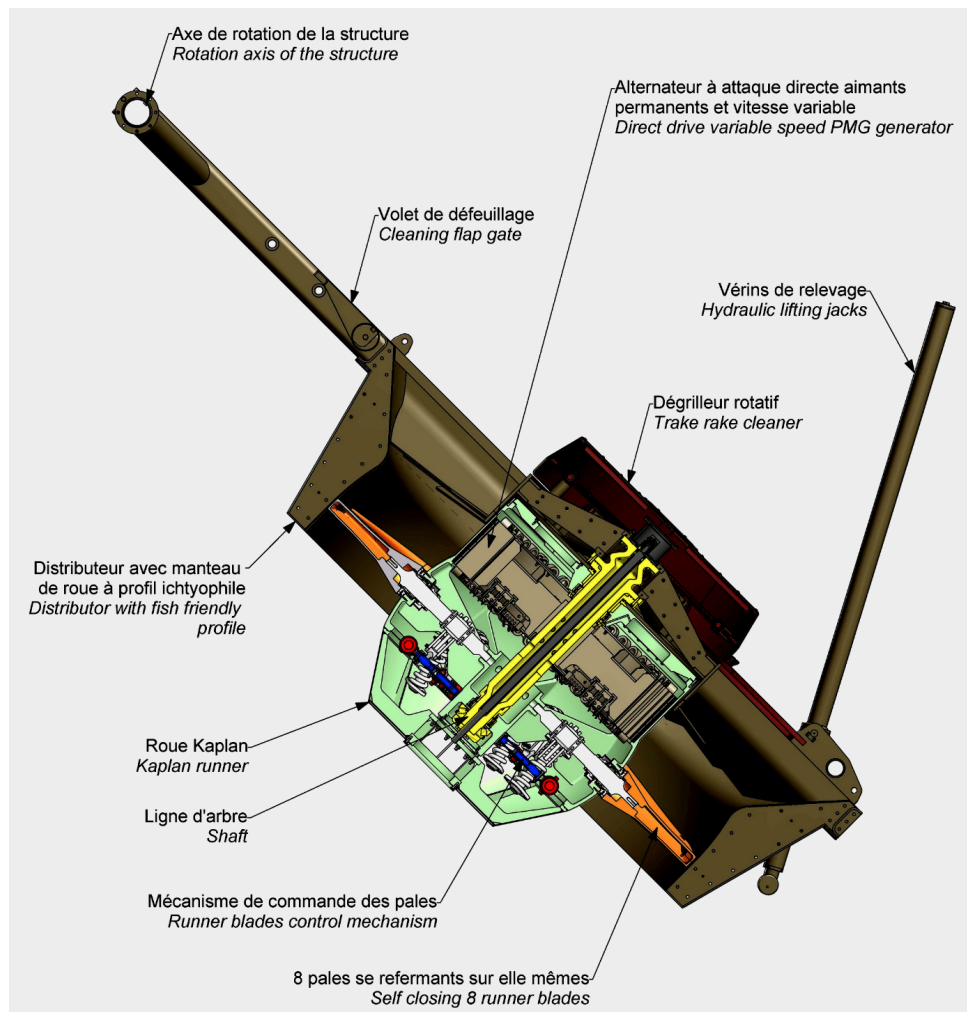


Figure 2.4: Description de la turbine VLH ⁴

Sur le plan environnemental, la VLH présente un impact visuel et sonore minime grâce à son immersion totale, et sa conception favorise le passage des poissons grâce à des espaces généreux entre les pales et une vitesse de rotation faible.

2.3.2.c Vis d'Archimède

La vis d'Archimède (FIGURE 2.5), inspirée par les principes de l'ancien mathématicien grec Archimède, est une technologie émergente qui présente un potentiel considérable dans la production d'énergie renouvelable (Doost et al., 2020). Contrairement aux turbines conventionnelles qui utilisent des pales pour convertir l'énergie hydraulique en énergie mécanique, la turbine vis d'Archimède repose sur un concept innovant qui implique une vis sans fin immergée dans le flux d'eau.

⁴(2014, août 19) Turbines VLH. Forma Tis sur : <https://blog.formatis.pro/turbines-vlh/>

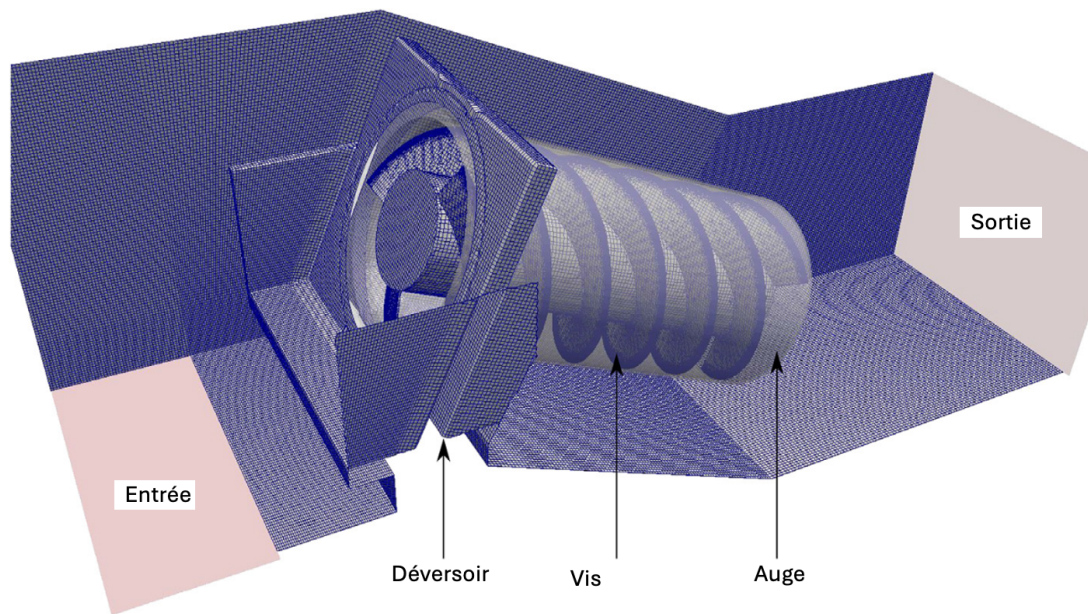


Figure 2.5: Vis d'Archimède ⁵

L'efficacité de la turbine vis d'Archimède repose sur le principe de la vis d'Archimède, qui convertit l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique grâce à la rotation de la vis (Erinofardi et al., 2022). Cette conception permet à la turbine de fonctionner efficacement même à des vitesses d'eau relativement faibles, ce qui la rend adaptée aux sites avec des ressources hydrauliques limitées.

⁵Guilhem Dellinger, Pierre-André Garambois, Nicolas Dellinger, Matthieu Dufresne, Abdelali Terfous, Jose Vazquez, Abdellah Ghenaim, Computational fluid dynamics modeling for the design of Archimedes Screw Generator, Renewable Energy, Volume 118, 2018, Pages 847-857, ISSN 0960-1481, ??

Chapitre 3

Présentation des sites étudiés

Ce mémoire se concentre sur trois sites, composés d'un déversoir, d'une station hydroélectrique et de voies de passages dédiés aux poissons migrateurs. Ces trois exploitations se situent :

1. à Chanxhe;
2. à Méry;
3. aux Grosses-Battes.

Chacune d'elles possède des voies de migration différentes. Cependant, elles possèdent toutes le même objectif, à savoir produire de l'énergie verte. Sur chacun de ces sites hydroélectriques, la problématique de ce mémoire est à solutionner. Les solutions proposées par le biais de cette étude visent à satisfaire chacun de ces trois sites bien différents du point de vue de leur configuration. De ce fait, les conclusions pourront satisfaire un pourcentage conséquent des micro-exploitations hydroélectriques implantées sur les rivières. La production hydroélectrique se calcule comme suit :

$$P = Q \cdot H \cdot e \cdot g$$

Où:

- P est la puissance produite [kW];
- Q est le débit turbiné [m³/s];
- H est la hauteur de chute [m];
- e est un facteur d'efficacité [-];
- g est la constante gravitationnelle [m/s²]

Le problème liant le franchissement des sites par les poissons et la production hydroélectrique réside dans le débit réservé non-turbinable qui sont imposés.

Les trois sites sélectionnés pour matérialiser ce travail de fin d'étude ont, en partie, déjà été étudiés. Par conséquent, les ressources disponibles pour chaque site sont différentes. De plus, les pistes pour optimiser à la fois la production hydroélectrique et la dévalaison des smolts de saumon sont également propres à chacune des trois configurations. En revanche, l'objectif final demeure identique. Les sections suivantes présentent brièvement les trois sites étudiés.

3.1 Contexte général de l'Ourthe

Comme la FIGURE 3.1 le montre, la centrale hydroélectrique de Chanxhe est située dans la partie inférieure de la rivière de l'Ourthe, un affluent de la Meuse en Belgique (Renardy et al., 2023). La Meuse est une grande rivière internationale de 950 km de long, avec un bassin versant de 36 000 km². Avec sa source en France, la Meuse traverse la Belgique avant de rejoindre la mer du Nord aux Pays-Bas.

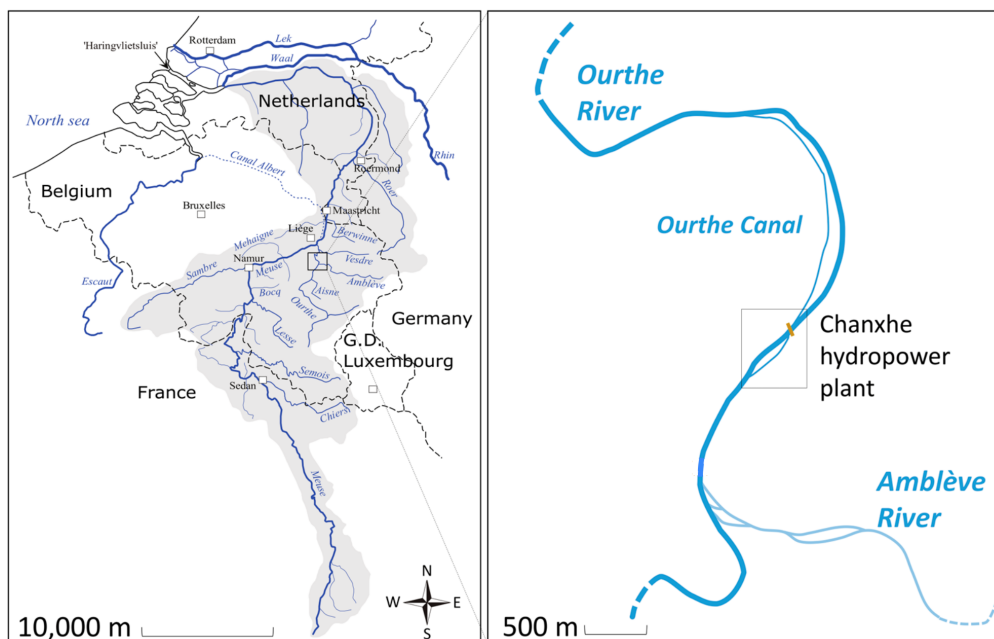


Figure 3.1: Géolocalisation du site hydroélectrique de Chanxhe ¹

L'Ourthe est une rivière de taille moyenne, elle est longue de 235 km, avec deux sources situées dans les Ardennes belges, et un bassin versant total de 3672 km². La basse rivière Ourthe est caractérisée comme une zone de barbeaux, avec la présence potentielle de 29 espèces de poissons, dominées en biomasse par des cyprinidés rhéophiles et ubiquistes. Dans l'ensemble de la rivière, les communautés macro-invertébrées prédominantes sont actuellement indicatrices d'une bonne qualité de l'eau.

La centrale hydroélectrique de Méry est située dans la partie inférieure de la rivière Ourthe, à une quinzaine de kilomètres en aval du site de Chanxhe et à 12,7 km en amont de la confluence de la rivière Ourthe avec la Meuse (FIGURE 3.2).

¹Renardy, S., Ciraane, U. D., Benitez, J.-P., Dierckx, A., Gelder, J., Silva, A. T., Archambeau, P., Dewals, B., Piroton, M., Erpicum, S., & Ovidio, M. (2023). Assessment of the Attractiveness and Passage Efficiency of Different Fish Passage Solutions at a Hydropower Plant by Combining Fine Scale 2D-Telemetry and Hydraulic Numerical Modelling. *Environments* (Basel, Switzerland), 10(7), 107-. <https://doi.org/10.3390/environments10070107>

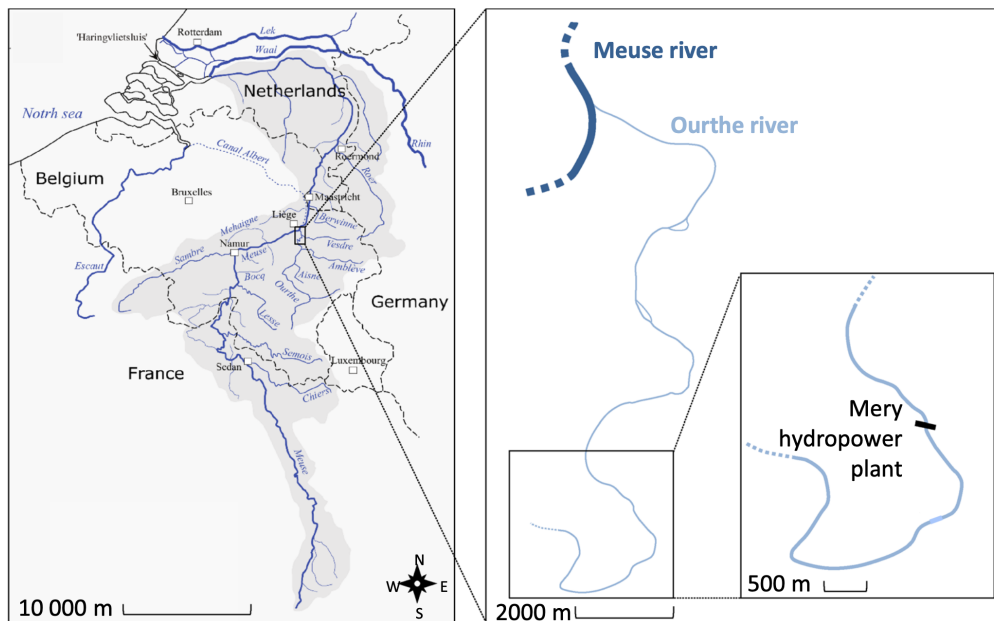


Figure 3.2: Géolocalisation du site de Méry ²

Comme le montre la (FIGURE 3.3), le site des Grosses Battes est le complexe hydroélectrique le plus en aval situé le long de l'Ourthe.

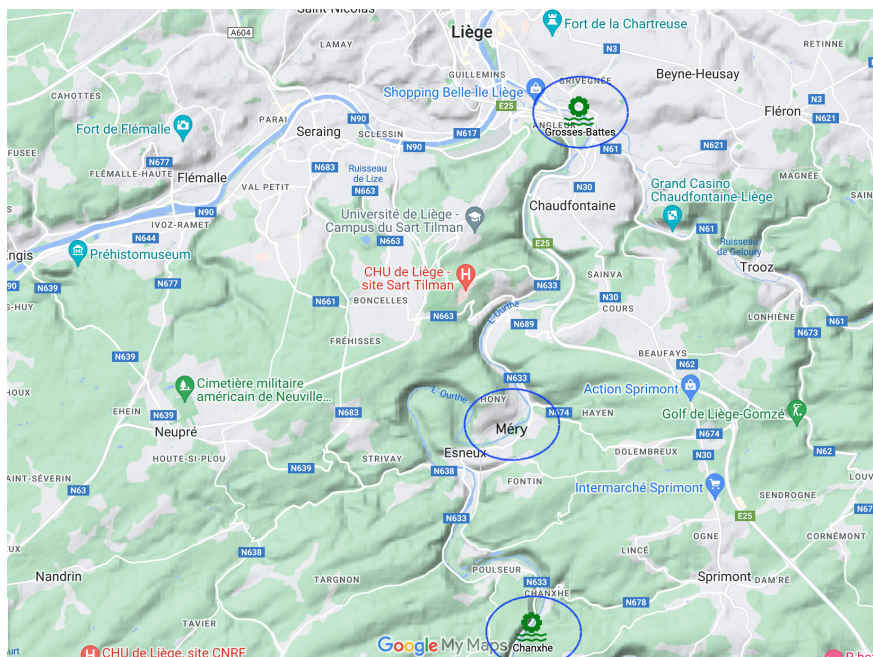


Figure 3.3: Localisation des trois sites³

²Renardy, S., Cirraane, U. D., Benitez, J.-P., Dierckx, A., Archambeau, P., Piroton, M., Erpicum, S., & Ovidio, M. (2023). Combining fine-scale telemetry and hydraulic numerical modelling to understand the behavioural tactics and the migration route choice of smolts at a complex hydropower plant. *Hydrobiologia*, 850(14), 3091–3111. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05237-z>

³(2024, février 22), Google maps : <https://www.google.com/maps/@50.5992955,5.61765,11.66z?entry=ttu>

3.2 Chanxhe

Renardy et al. (2023) ont déjà étudié le site hydroélectrique de Chanxhe. C'est grâce à cette étude qu'il existe les données suivantes sur le site.

3.2.1 Présentation du site

Le site se décompose en quatre zones présentant chacune une voie de passage différente pour les poissons migrateurs.

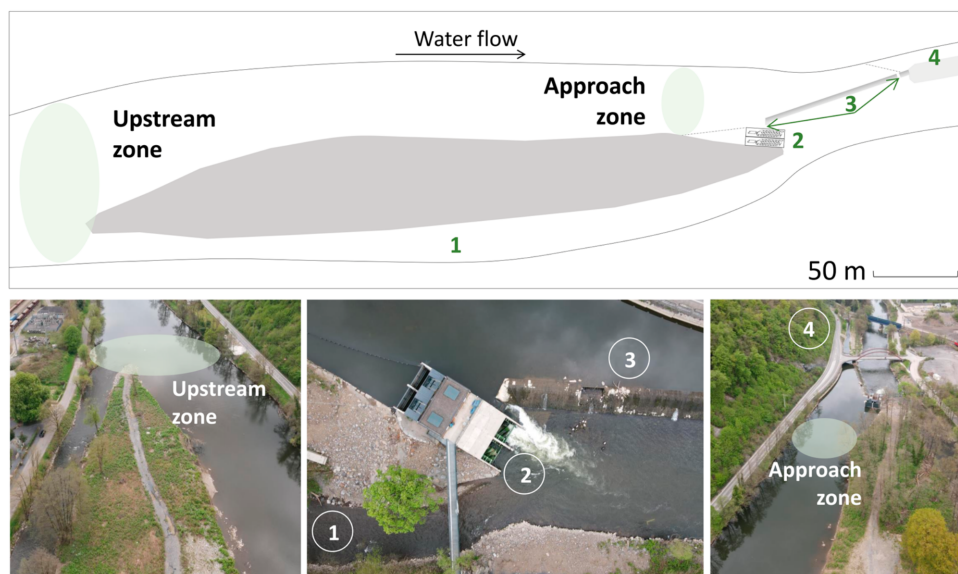


Figure 3.4: Les quatres zones du site de Chanxhe ⁴

La FIGURE 3.4 illustre, avec un schéma et trois photographies aériennes du lieu, les quatres zones que sont:

1. Une échelle à poisson naturelle: c'est un bras de rivière servant à contourner le déversoir avec une pente vraisemblablement continue;
2. Une station hydroélectrique: ce sont deux vis d'Archimède contribuant à la production d'électricité tout en permettant aux poissons de dévaler l'obstacle. Longues de 13 m, elles ont un diamètre de 4,25 m. Elles tournent à une cadence de 4 à 25 révolutions par minute et possède un débit nominale de 11 m³/s chacune;
3. Un déversoir de 103 m de long et 2,4 m de haut : une échancrure y est apposée au droit de la station hydroélectrique (1,8 m de long et 0,67 m de haut), une autre est au milieu du déversoir (5,05 m de long et 1,01 m de haut) et une dernière se trouve à l'extrémité en rive gauche (2,12 m de long et 0,77 m de haut);

⁴Renardy, S., Cirane, U. D., Benitez, J.-P., Dierckx, A., Gelder, J., Silva, A. T., Archambeau, P., Dewals, B., Pirotton, M., Erpicum, S., & Ovidio, M. (2023). Assessment of the Attractiveness and Passage Efficiency of Different Fish Passage Solutions at a Hydropower Plant by Combining Fine Scale 2D-Telemetry and Hydraulic Numerical Modelling. *Environments (Basel, Switzerland)*, 10(7), 107-. <https://doi.org/10.3390/environments10070107>

4. Un canal de dérivation.

Selon Renardy et al. (2023), le débit moyen sur le site est de 26 m³/s durant la période dévalaison des smolts. La puissance de la centrale vaut 420 kW et l'énergie produite vaut 1600 MWh/an. Cela représente 744 tonnes de CO₂ économisé par an. ⁵

Les débits réservés du site sont résumés dans le TABLEAU 3.1 :

| Débits réservés du site de Chanxhe [m ³ /s] | | | | |
|--|--------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| | Rivière de contournement | Canal de l'Ourthe | Echancrure rive gauche | Echancrure rive droite |
| 15 mars - 30 juin | 5 | 0,5 | 1 | 0,5 |
| 1 juillet - 14 mars | 5 | 1 | / | / |

Tableau 3.1: Débits réservés du site de Chanxhe

3.2.2 Etude du site

Renardy et al. (2023) ont combiné la radiotélémétrie 2D avec la modélisation hydrodynamique comme outil pour mieux comprendre l'influence des facteurs hydrodynamiques sur le choix de la route de migration des poissons.

Cette étude visait à enquêter sur la migration aval des smolts à une centrale hydroélectrique en Belgique qui propose cinq itinéraires de migration, dont deux vis d'Archimède et une passe à poissons de type naturel. Les objectifs étaient de comprendre le comportement migratoire des smolts en amont de la centrale, d'évaluer l'attractivité et l'utilisation des différentes voies de migration, et d'analyser les facteurs environnementaux influençant le comportement des smolts.

Les résultats ont montré que les vis d'Archimède étaient les voies de migration les plus utilisées en raison de débits plus élevés et de profondeurs d'eau plus importantes à leur entrée. La passe à poissons de type naturel était moins utilisée, avec seulement 23% des smolts l'utilisant, en raison de faibles profondeurs d'eau et de vitesses d'écoulement élevées, ce qui allongeait le temps de passage. Cependant, les vis d'Archimède n'étaient pas préjudiciables aux smolts et n'entraînaient aucun retard significatif dans le temps de passage.

Ces résultats soulignent la nécessité d'améliorer l'attrait et l'efficacité des solutions de passage pour les smolts de saumon atlantique en aval. La passe à poissons de type naturel a été identifiée comme ayant le potentiel d'être une bonne voie de migration après des améliorations pour augmenter son attractivité et son efficacité de passage. Les vis d'Archimède ont également été confirmées comme une option viable pour la migration des smolts sans causer de retards significatifs.

⁵(2024) Chanxhe, Hesbenergie : <https://hesbenergie.be/nos-projets/hydroelectricite-ourthe-et-sambre/chanxhe/>

3.3 Méry

Renardy et al. (2023) et Weis (2023) sont deux études qui ont déjà traité le sujet de la migration avale des smolts de saumon au barrage de Méry.

3.3.1 Présentation du site

Le site est équipé d'un barrage de 86 m de long et 1,8 m de haut, placé en travers de la largeur de la rivière, avec deux turbines Kaplan sur la rive gauche et une vis d'Archimède sur la rive droite.

D'après Renardy et al. (2023), la centrale hydroélectrique de Méry offre les cinq voies de migration différentes suivantes pour les smolts de saumon atlantique en dévalaison:

1. Une échelle à poisson de 42 m de long à fentes verticales avec 10 bassins (2X3 m). Elle possède un débit nominale de $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un débit d'attrait de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$;
2. Une vis d'Archimède contribuant à la production d'électricité tout en permettant aux poissons de dévaler le site possède une puissance électrique de 100 kW. Longues de 4,5 m, elle a un diamètre de 3,7 m. Elles tournent à une cadence de 22,8 révolutions par minute et possède un débit nominale de $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$;
3. Une turbine Kaplan en service d'une puissance électrique de 125 kW, un débit nominale de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ et une vitesse de rotation de 250 révolutions par minute. Son diamètre mesure 1,8 m pour une hauteur de 2,5 m avec un angle de 67° ;
4. Un Bypass de forme rectangulaire 480x300 mm dont le débit varie entre 0,1 et $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$;
5. Un déversoir de 103 m de long et 2,4 m de haut : quatre échancrures sont implantées sur le déversoir et mesurent, de la rive gauche vers la rive droite :
 - $l \times h = 0,5 \times 0,2 \text{ m}$;
 - $l \times h = 3 \times 0,4 \text{ m}$;
 - $l \times h = 3 \times 0,3 \text{ m}$;
 - $l \times h = 0,5 \times 0,4 \text{ m}$.
6. Un canal de dérivation.

Selon Renardy et al. (2023), le débit moyen sur le site est de $34,4 \text{ m}^3/\text{s}$ durant la période dévalaison des smolts.

Les débits réservés du site sont résumés dans le TABLEAU 3.2 :

| Débits réservés du site de Méry [m^3/s] | | | |
|---|-------------------|-----------------|---------|
| | Echelle à poisson | Vis d'Archimède | By-pass |
| Débit non turbinable | 1 | / | 0,15 |
| Débit turbinable | / | 4 | / |

Tableau 3.2: Débits réservés du site de Méry

En amont de la centrale hydroélectrique, six zones différentes ont été définies, comprenant cinq zones numérotées de 1 à 5 et une zone d’approche, située à 50 m en amont du site (FIGURE 3.5).

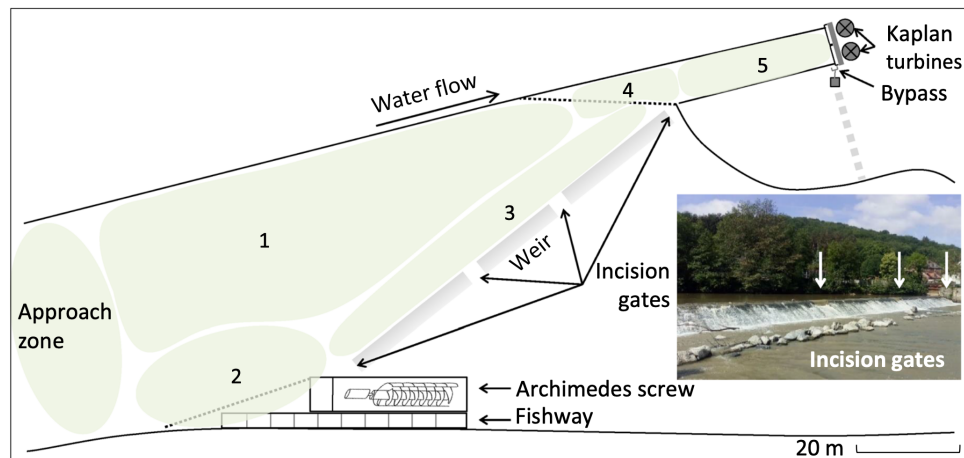


Figure 3.5: Les zones du site de Méry ⁶

3.3.2 Etude du site

La centrale hydroélectrique offre cinq voies de migration potentielles, dont une turbine Kaplan (la deuxième turbine est hors service) et une vis d’Archimède saine pour la survie des poissons. En 2018, un premier suivi préliminaire des smolts a été réalisé afin d’identifier la diversité du comportement de recherche. Dans cette étude, le suivi des smolts a également été combiné à la modélisation hydrodynamique pour obtenir des analyses plus précises sur la réponse comportementale des smolts en amont d’une centrale hydroélectrique. Le premier objectif de l’étude était d’identifier les tactiques comportementales exprimées par les smolts pour trouver une voie de migration pour traverser la centrale hydroélectrique, y compris les voies de migration approchées, utilisées et le temps de recherche. Le deuxième objectif était d’évaluer quels facteurs biologiques et environnementaux influencent les tactiques comportementales des smolts (Renardy et al. (2023)).

Weis (2023) a travaillé sur l’optimisation de la migration en aval des smolts de saumon Atlantique à Méry tout en maintenant la production d’énergie. Les simulations ont examiné l’impact des incisions et des changements topographiques sur la distribution du flux. Ses résultats montrent que la meilleure solution consiste à combiner le déplacement du canal avec la construction d’une grille à l’entrée du canal d’admission de la turbine Kaplan, offrant ainsi une meilleure migration des smolts et réduisant le risque de mortalité.

⁶Renardy, S., Ciraane, U. D., Benitez, J.-P., Dierckx, A., Archambeau, P., Pirotton, M., Erpicum, S., & Ovidio, M. (2023). Combining fine-scale telemetry and hydraulic numerical modelling to understand the behavioural tactics and the migration route choice of smolts at a complex hydropower plant. *Hydrobiologia*, 850(14), 3091–3111. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05237-z>

3.4 Grosses-Battes

Le site des Grosses-battes n'a pas encore été étudié concernant les conditions hydrodynamiques. Non plus, aucune donnée de suivis de smolts de saumons n'y est disponible à ce jour.

3.4.1 Présentation du site

La FIGURE 3.6 propose une vue aérienne du site. Le barrage est équipé des éléments numérotés suivants:

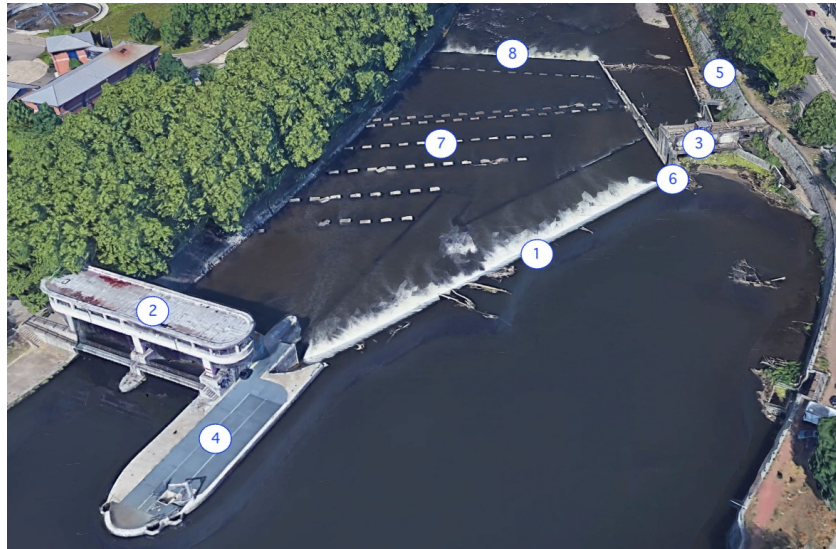


Figure 3.6: Vue aérienne du site des Grosses-Battes⁷

1) Un déversoir de 90 m de long et de 3,95 m de haut: en cas de crue ou de débit excessif, le déversoir assure le déchargement contrôlé de l'eau excédentaire, réduisant ainsi les risques d'inondation en aval et préservant l'intégrité du barrage;

2) Deux vannes: elles contrôlent le flux d'eau en aval. Ces vannes permettent de réguler le débit d'eau, ce qui est essentiel pour la production d'électricité et la gestion des ressources en eau.

3) Une station hydroélectrique d'une puissance de 1,4 MW ⁸ constituée d'une infrastructure du génie civil, elle exploite l'énergie hydraulique générée par le débit d'eau pour produire de l'électricité via deux turbines VLH (FIGURE 3.7) d'un débit nominale de 11 m³/s chacune pour une gamme de fonctionnement comprise entre 2,2 et 22 m³/s :

⁷(2020, octobre 8), Ourthe: Barrage des Grosses-Battes. Condroz Enerfies Citoyennes : <https://coopcec.be/wcec/nos-projets/hose/ourthe-barrage-des-grosses-battes/>

⁸(2024) Chanxhe, Hesbennergie : <https://hesbennergie.be/nos-projets/hydroelectricite-ourthe-et-sambre/grosse-battes-liege/>

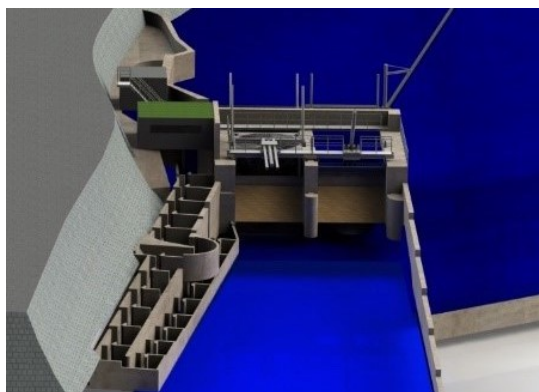


Figure 3.7: Centrale hydroélectrique des Grosses-Battes ⁹

Cette électricité est ensuite distribuée pour répondre aux besoins énergétiques locaux. Ce site joue un rôle crucial dans la production d'énergie électrique dans la région de Liège. Il équivaut à 1350 T de CO₂ économisé par an et 1257 ménages alimentés.

- 4) Une première échelle à poissons;
- 5) Une deuxième échelle à poissons;
- 6) Trois incisions dans le déversoir pour favoriser le passage piscicole :(FIGURE 3.8):



Figure 3.8: Incisions dans le déversoir

- 7) Un bassin de dissipation: il est constitué d'un radier et de plots de dissipation.

- 8) Un second déversoir.

Les débits réservés du site sont résumés dans le TABLEAU 3.3 :

| Débits réservés du site des Grosses-Battes [m ³ /s] | | | | | |
|--|-----------|----------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------|
| | Déversoir | Par incision sur déversoir | PAP ¹⁰ rive gauche | PAP rive droite | Echancrure par VLH |
| Débit non turbinable | 7,7 | 0,6 | 2,2 | 1,2 | 1 |

Tableau 3.3: Débits réservés du site des Grosses-Battes

⁹(2020, octobre 8), Ourthe: Barrage des Grosses-Battes. Condroz Energies Citoyennes : <https://coopcec.be/wcec/nos-projets/hose/ourthe-barrage-des-grosses-battes/>

¹⁰PAP = passe à poissons

Chapitre 4

Méthodologie

4.1 Outil numérique

4.1.1 Description

Les conditions d'écoulement ont été modélisées numériquement avec une approche hydrodynamique 2D, c'est-à-dire en résolvant les équations d'écoulement intégrées en profondeur avec le solveur d'écoulement WOLF2D¹. Le logiciel WOLF est un programme de simulation des écoulements d'eau dans les rivières et les bassins versants, développé par le groupe de recherche HECE (Hydraulics in Environmental and Civil Engineering). Ce logiciel se distingue par sa précision et sa robustesse, offrant des solutions fiables et performantes aux problématiques complexes des écoulements hydrodynamiques.

La qualité du logiciel WOLF est le reflet de l'expertise et du dévouement de ses développeurs principaux, dont la rigueur scientifique et l'innovation technique sont largement reconnues dans le domaine. L'efficacité des algorithmes, combinée à la flexibilité et à la puissance de calcul offertes par l'utilisation conjointe de Fortran et des technologies GPU, positionne WOLF comme un outil incontournable pour les chercheurs et les ingénieurs en hydraulique. La transition vers une interface Python démontre une vision proactive d'évolution et d'amélioration continue, rendant le logiciel encore plus accessible et fonctionnel.

Les données principales requises par le modèle numérique sont la topographie/bathymétrie de la zone d'étude et les débits d'entrées/sorties. La topographie/bathymétrie de chaque site hydroélectrique a d'abord été extraite des données LIDAR (détection et télémétrie légères) collectées par une enquête aérienne fournie par le Service public de Wallonie (1 point par mètre carré - précision altimétrique de 0,15 mètre) puis complétée par interpolation linéaire à la précision d'un demi-mètre (Renardy et al. 2023). Grâce à ces données précises et au modèle numérique performant qu'est WOLF, nous pouvons obtenir des simulations d'une grande fiabilité, contribuant de manière significative à la compréhension et à la gestion des écosystèmes aquatiques.

¹Archambeau, P. (2024) Welcome to WOLF's documentation! WOLF. wolf.hece.uliege Disponible sur : <https://wolf.hece.uliege.be/index.html#welcome-to-wolf-s-documentation> (Consulté le 10/05/2024).

4.1.2 Défis de manipulation dans un environnement de développement logiciel en évolution

Lors de la phase initiale de la recherche, plusieurs défis ont été rencontrés lors de la prise en main du logiciel de simulation WOLF. Ces obstacles, bien que difficiles, ont été surmontés grâce à des efforts concertés et à une approche méthodique. Cette sous-section vise à présenter de manière objective les différentes difficultés rencontrées, ainsi que les solutions mises en place pour les résoudre.

L'une des principales complications est survenue en raison de l'exigence d'une carte graphique plus récente pour exécuter efficacement les simulations avec WOLF GPU. Les ordinateurs portables disponibles ne répondaient pas à cette exigence, ce qui a entraîné des limitations dans la capacité à effectuer des simulations de manière autonome. Les discussions des huit premières semaines ont été portées sur la revue de la littérature, les tentatives d'installations du paquet python sur ordinateur portable et sur l'accessibilité à une machine compatible avec le logiciel. Pour pallier à cette contrainte, les ordinateurs disponibles à l'université pendant les heures d'ouverture ont dû être utilisés, sous réserve de disponibilité et de réservation préalable.

Une autre complication était la transition de l'utilisation du CPU à celle du GPU pour l'exécution des simulations. Cette transition impliquait une courbe d'apprentissage prononcée, étant donné l'absence de familiarité préalable avec le code GPU. Cette étape a nécessité une familiarisation approfondie avec les concepts et les fonctionnalités propres au traitement parallèle sur GPU. Malgré les défis initiaux, cette expérience s'est avérée être une opportunité d'acquérir de nouvelles compétences en informatique parallèle. Douze semaines après la genèse du projet, la dernière mise à jour du code permettaient de lancer une simulation GPU pour ce projet.

La prise en main des outils logiciels tels que Visual Studio Code, Python le code WOLF GPU et l'interface graphique de WOLF, a constitué un défi supplémentaire. Cette phase d'adaptation a nécessité un investissement de temps significatif pour comprendre les fonctionnalités et les workflows associés à chaque outil. De plus, la modélisation impliquant l'intégration de scripts Python et de l'interface utilisateur de WOLF a exigé une compréhension approfondie de la manière dont ces éléments interagissaient.

4.2 Données d'entrée, conditions initiales et conditions limites du schéma numérique

Le code WOLF GPU traite des matrices. Ses données d'entrée sont :

- La bathymétrie;
- Le coefficient de frottement distribué;
- Les débits d'infiltration/exfiltration.

A cela, des conditions initiales et des conditions limites sont jointes au modèle numérique afin de fournir les informations nécessaires pour déterminer une solution unique aux équations qui

modélisent le système. Les conditions initiales sont formées par :

- La hauteur d'eau [m];
- Le débit spécifique selon x [m^2/s];
- Le débit spécifique selon y [m^2/s].

Sans condition limite imposée aux bords, ces derniers sont perçus comme imperméables par le code, par défaut. En revanche, les conditions limites offrent les choix suivant aux bords du domaine:

- Un débit par unité de longueur selon x [m^2/s];
- Un débit par unité de longueur selon y [m^2/s];
- Un bords libre perméable;
- Une hauteur d'eau [m];
- Un Froude normal au bord [-].

4.2.1 Sources des données d'entrée

4.2.1.a Chanxhe et Méry

Concernant les sites de Chanxhe et Méry, les trois matrices d'entrées étaient déjà disponibles sous fichier de format CPU. Le tout était de transformer ces matrices binaires en matrice Numpy afin que le code GPU puissent les lire. Renardy et al. (2023) ont publiés la manière dont les données d'entrées ont été relevées pour ces deux sites.

La topographie/bathymétrie des sites a été obtenue en combinant des données de détection et télémétrie par laser (LiDAR) collectées lors de levées aériennes réalisées par le service public de wallonie (résolution horizontale de 1 m et précision verticale de 0,15 m) et une levée bathymétrique manuelle dans le lit de la rivière obtenue à l'aide d'un GPS Trimble R10 et d'une station totale Leica (Renardy et al., 2023). Les levées bathymétriques étaient dotés une précision horizontale et verticale estimée à 0,10 m et 0,05 m respectivement. Les points des levées bathymétriques ont été interpolés linéairement sur une grille régulière de cellules de 0,50 x 0,50 m et combinés aux données LiDAR sur les rives pour obtenir un modèle numérique de terrain (MNT) complet et haute résolution de l'ensemble du site d'étude. La géométrie des déversoirs, y compris les incisions, et les entrées des turbines ont été ajoutées manuellement en tenant compte des plans des structures. A Chanxhe (FIGURE 4.1), 365 points ont été relevés manuellement dans le passe à poissons de type naturel avec un GPS (SinoGNSS N3) afin d'affiner les données bathymétriques dans cette zone peu profonde et complexe. Le modèle numérique de terrain résultant (FIGURE 4.2) couvrait 1400 m de la longueur de la rivière en amont de la centrale hydroélectrique avec une résolution horizontale de $0,5 \times 0,5$ m (596 937 cellules de grille) et une précision verticale de 0,15 m.

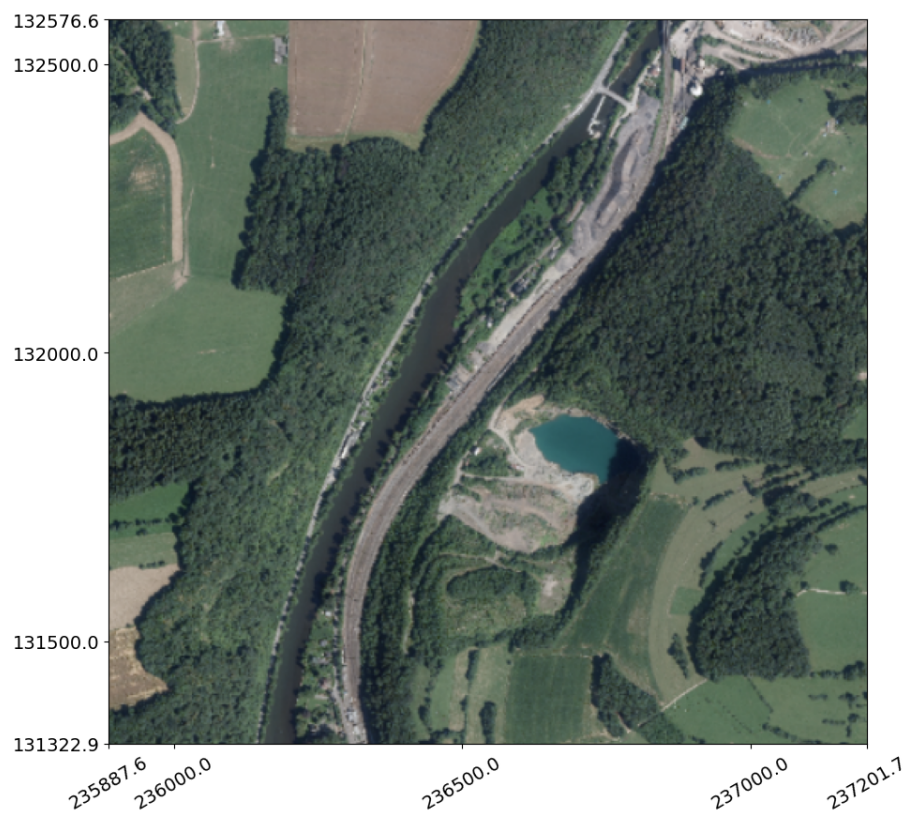


Figure 4.1: Vue aérienne du site de Chanxhe

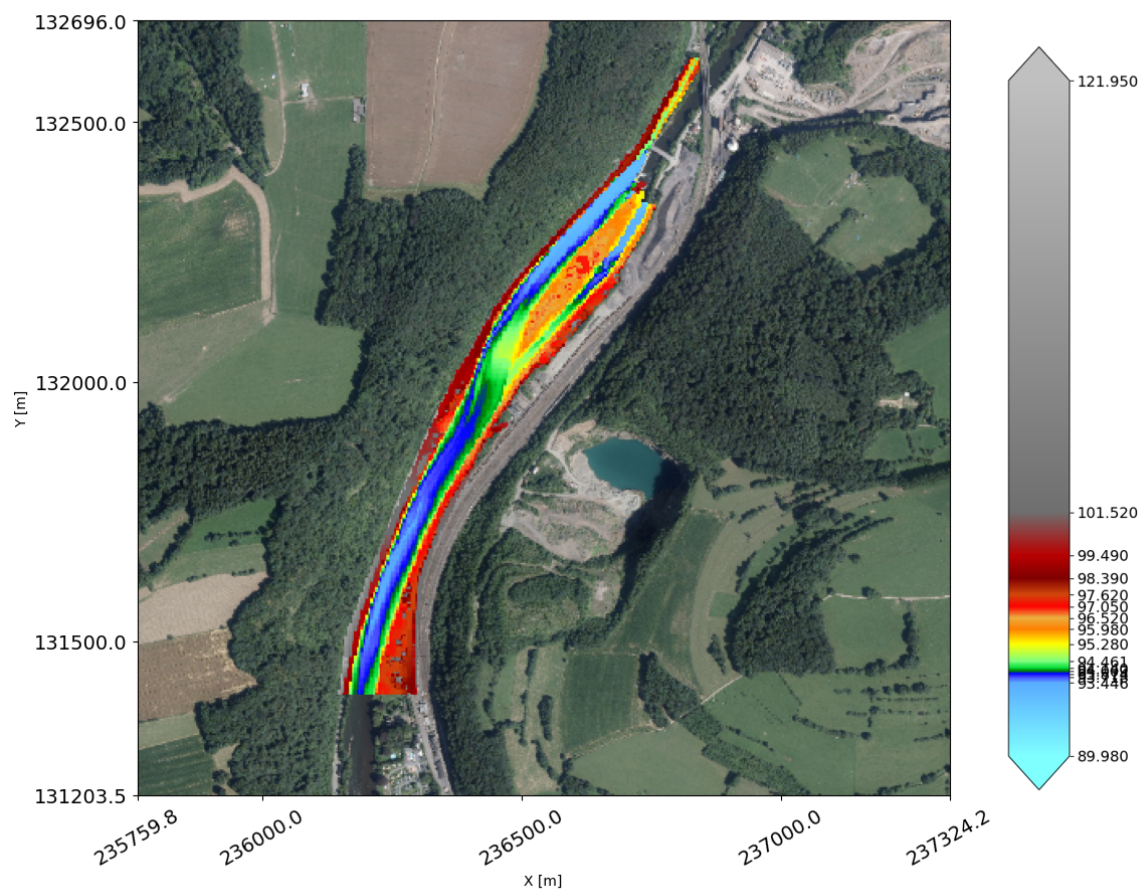


Figure 4.2: Données bathymétriques du site de Chanxhe [m]

A Méry (FIGURE 4.3), le MNT résultant (FIGURE 4.4) comprenait 165 064 cellules et couvrait un tronçon de 230,9 m de long de la rivière Ourthe en amont du déversoir, y compris le canal menant aux turbines Kaplan, avec une résolution horizontale globale de 0,5 m et une précision verticale supérieure à 0,15 m.

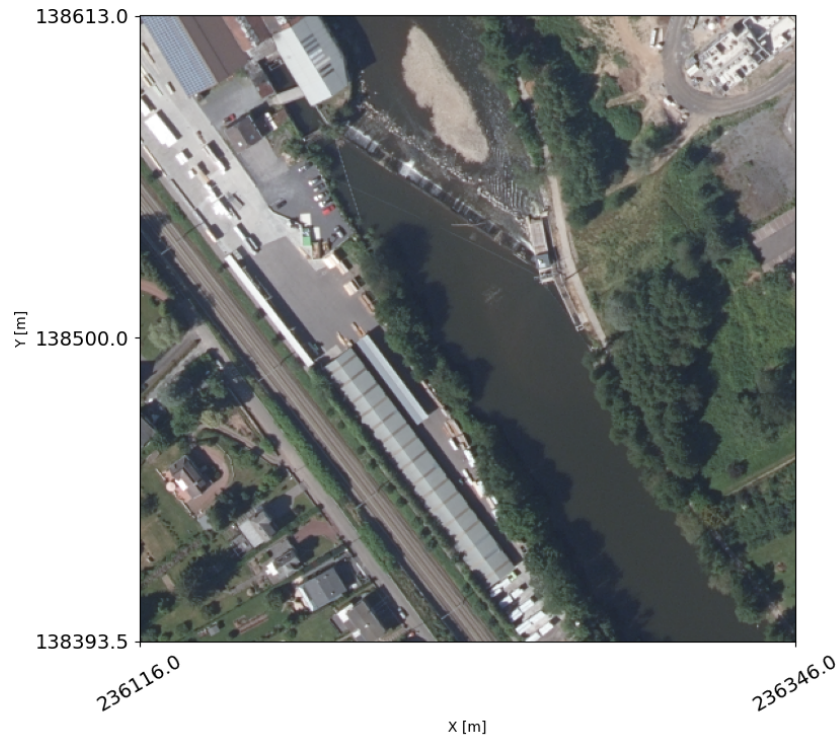


Figure 4.3: Vue aérienne du site de Méry

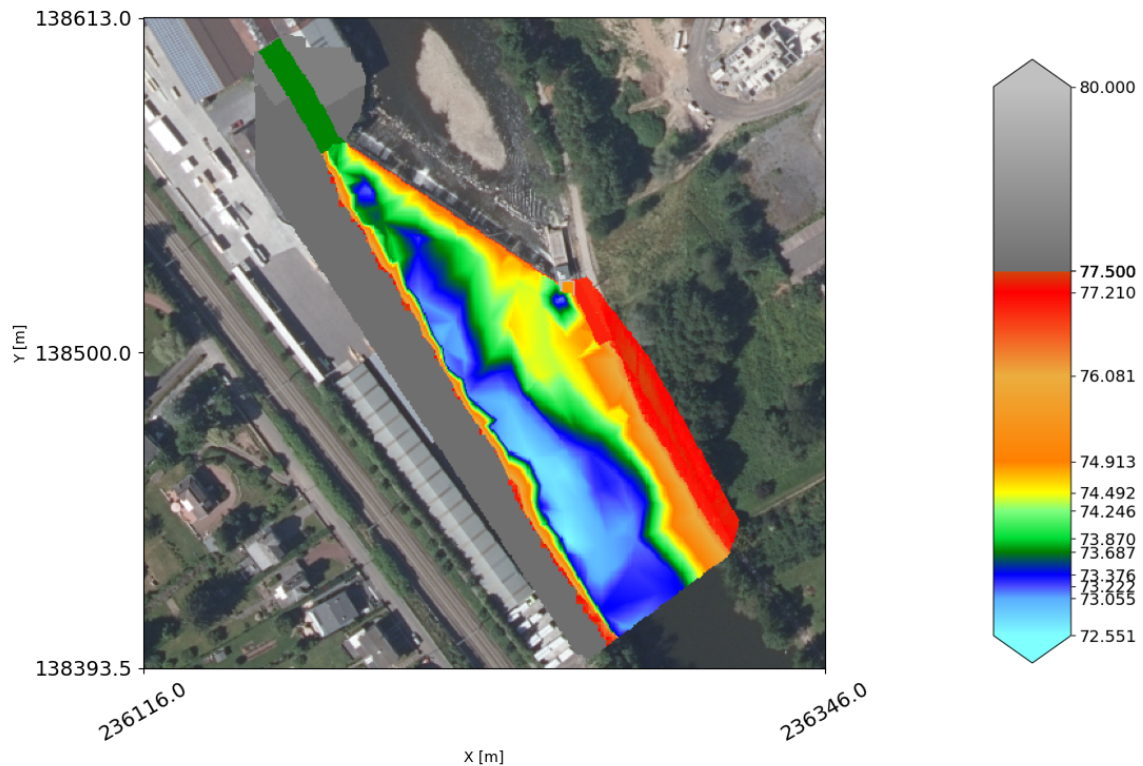


Figure 4.4: Données bathymétriques du site de Méry [m]

Le coefficient de frottement distribué des sites a été objectivé par le groupe de recherche HECE. Pour chaque site, la valeur est constante. A Chanxhe, il vaut 0,025 [-]. A Méry, il vaut 0,04 [-].

La valeur des débits d'infiltration et exfiltration modélisés diffère pour chaque scénario simulé.

A Chanxhe, le site compte sept zones différentes (FIGURES 4.5 & 4.6):

1. Le débit principal de la rivière à l'entrée du domaine (seul débit d'entrée);
2. La vis d'Archimède;
3. L'échancrure en rive droite;
4. L'échancrure centrale;
5. L'échancrure en rive gauche;
6. Le déversoir;
7. Le canal de l'ourthe.



Figure 4.5: Zone d'exfiltration à Chanxhe



Figure 4.6: Zones d'infiltration à Chanxhe

A Méry, le site compte dix zones différentes (FIGURES 4.7 & 4.8):

1. Le débit principal de la rivière à l'entrée du domaine (seul débit d'entrée);
2. La turbine Kaplan (une deuxième turbine Kaplan y est juxtaposée mais demeure hors service)
3. La vis d'Archimède;
4. L'échelle à poissons;

5. L'échancrure en rive gauche;
6. L'échancrure centrale sur la gauche;
7. L'échancrure centrale sur la droite;
8. L'échancrure en rive droite;
9. Le déversoir;
10. Le by-pass.



Figure 4.7: Zone d'exfiltration à Méry

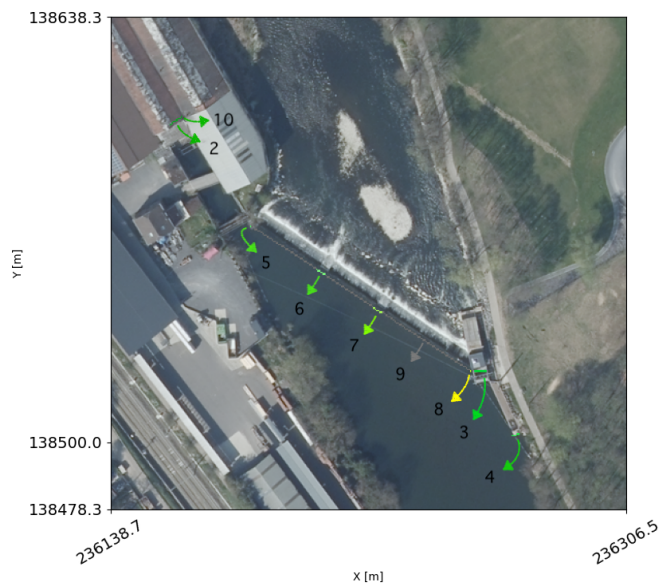


Figure 4.8: Zones d'infiltration à Méry

4.2.1.b Grosses-Battes

Les seules données préalablement disponibles du site des Grosses-Battes relevaient d'un levé bathymétrique partiel de la partie amont du barrage réalisé en août 2022.

La zone grisée de la (FIGURE 4.9) expose les données manquante pour compléter la bathymétrie du domaine d'étude.

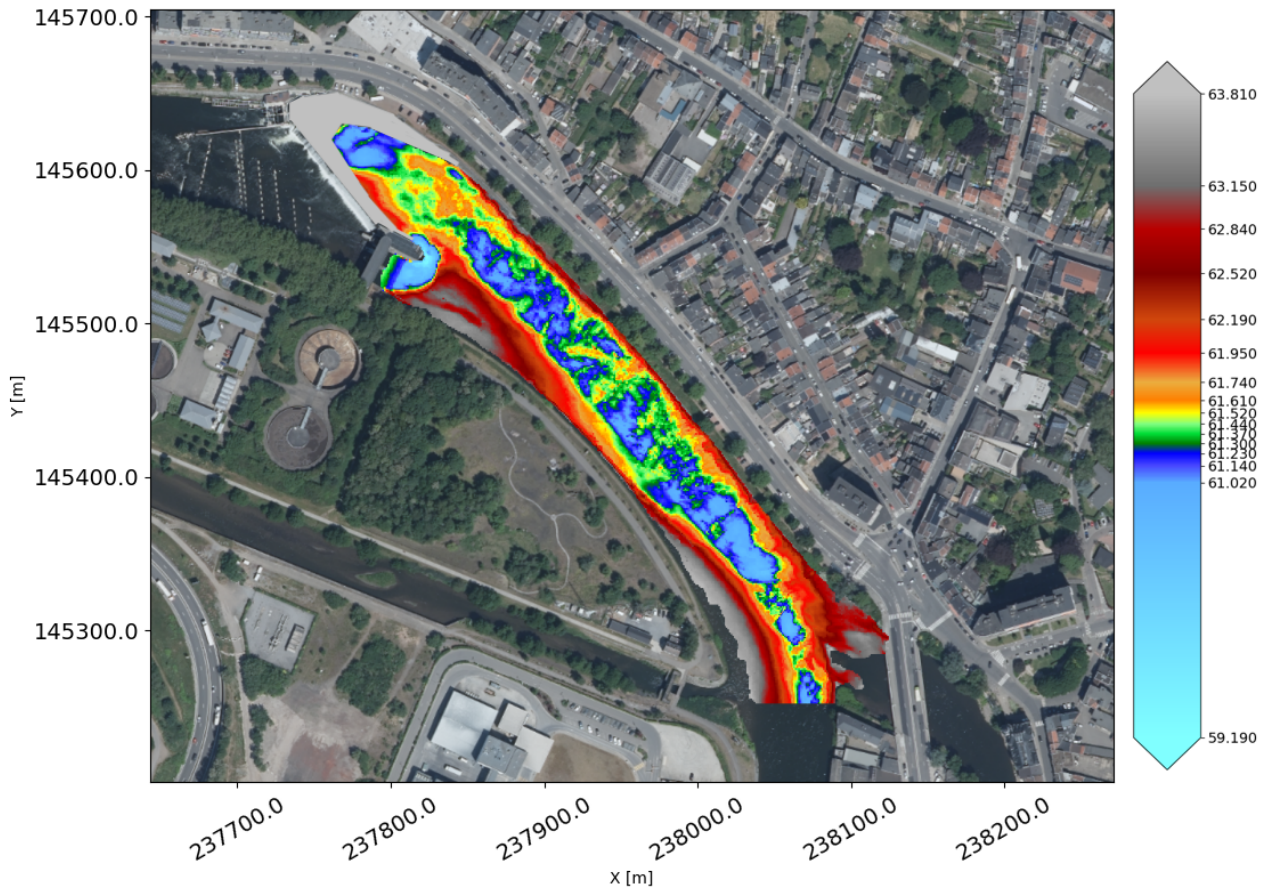


Figure 4.9: Données bathymétriques à compléter [m]

A ce jour, aucune donnée précise n'est disponible pour compléter cette dernière. C'est pourquoi il a fallu approximer la topographie du fond de l'Ourthe au droit du déversoir et de la station hydroélectrique du site des Grosses-Battes. Au mois d'octobre 2023, dans le cadre d'une mission destinée à draguer le fond de l'Ourthe au droit de la station hydroélectrique, la cote de surface libre a volontairement été descendue (à l'aide des vannes levantes en rive gauche) pour permettre et faciliter la manipulation d'engins dans la rivière. Durant le chantier, des photos ont été capturées. Certaines donnant de précieuses informations sur la bathymétrie manquante au modèle. Ainsi, en combinant ces informations et les coordonnées Lambert belge 1972 du lieu, la bathymétrie complète du site a été complétée sur l'interface graphique Wolf. Des cotes ont pu être identifiées sur base des photos disponibles et des cotes précises connues, comme celle de la crête du déversoir. Ensuite, le reste des mailles a pu être modélisé par interpolation linéaire en respectant un maximum les informations perceptibles sur les clichés. Le détail de la procédure suivie pour finaliser la topographie du fond de l'Ourthe du site des Grosses-Battes (FIGURE 4.10) est détaillé à l'ANNEXE A et prends la forme suivante :

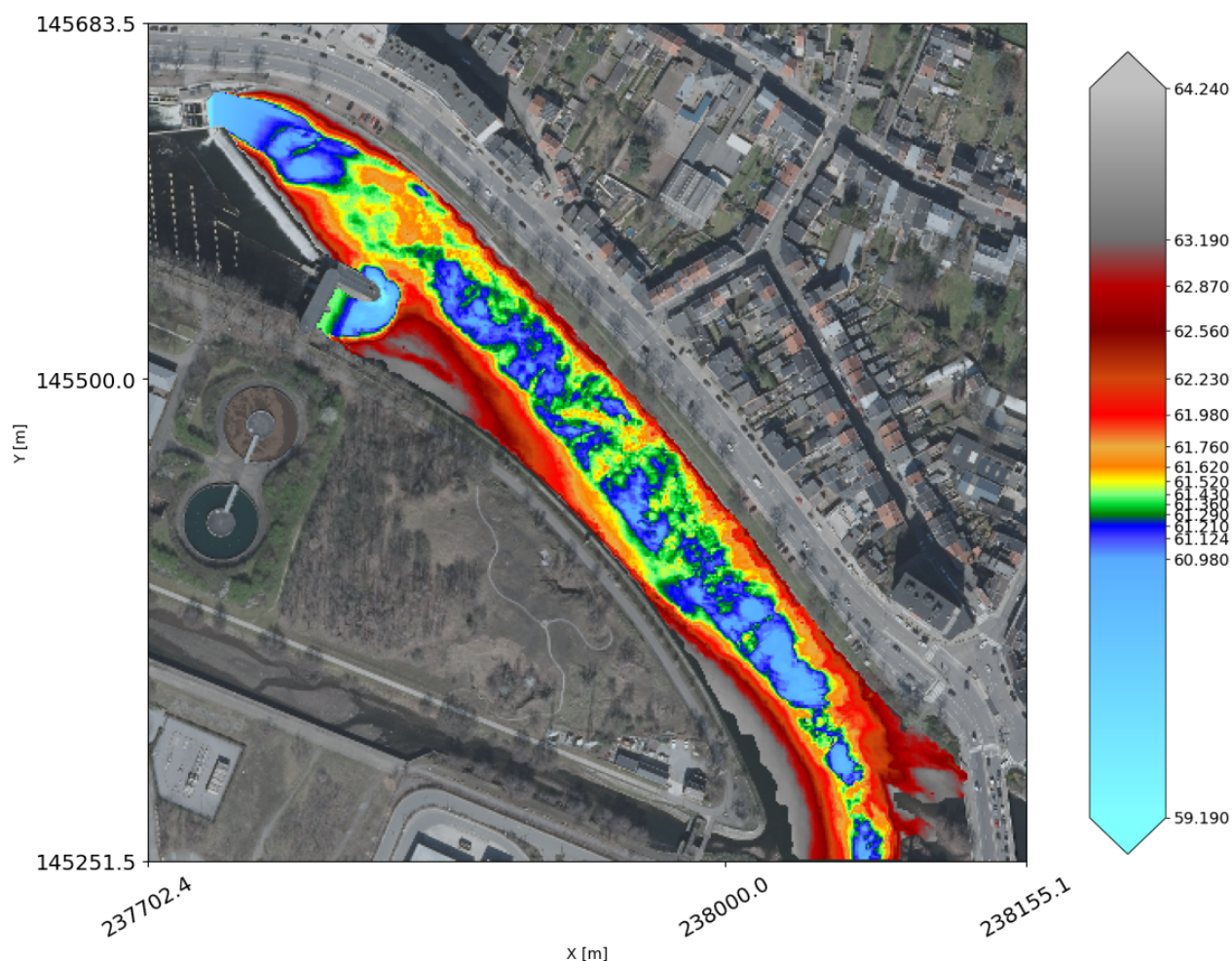


Figure 4.10: Données bathymétriques du site des Grosses-Battes [m]

Le coefficient de frottement distribué a été fixé uniformément à 0,04 [-] en raison des données disponibles sur d'autres sites de la même rivière. Cette valeur est notamment semblable au coefficient de frottement distribué du site de Méry. La raison pour laquelle cette approximation s'est vue attirée est issue du fait que la modélisation de l'écoulement se fait sur un domaine relativement de petite taille (480m de rivière) en regard des pertes de charges en long. En d'autres termes, cette hypothèse réaliste mais simpliste n'impactera pas significativement les résultats.

Les débits d'infiltration/exfiltration ont été implémentés manuellement dans une matrice vide de taille similaire aux autres. Les mailles ont été soigneusement sélectionnées pour correspondre à leur homologue dans les autres matrices. Puis, via script python, la valeur du débit d'infiltration ou exfiltration a été imposée suivant le scénario simulé. Au Grosses-Battes, le site compte sept zones différentes (FIGURES 4.11 & 4.12):

1. Le débit principal de la rivière à l'entrée du domaine (seul débit d'entrée);
2. Les turbine VLH;

3. L'échelle à poissons en rive droite;
4. L'échelle à poissons en rive gauche;
5. L'échancrure au droit de la centrale;
6. L'échancrure centrale;
7. L'échancrure la plus éloignée de la centrale;

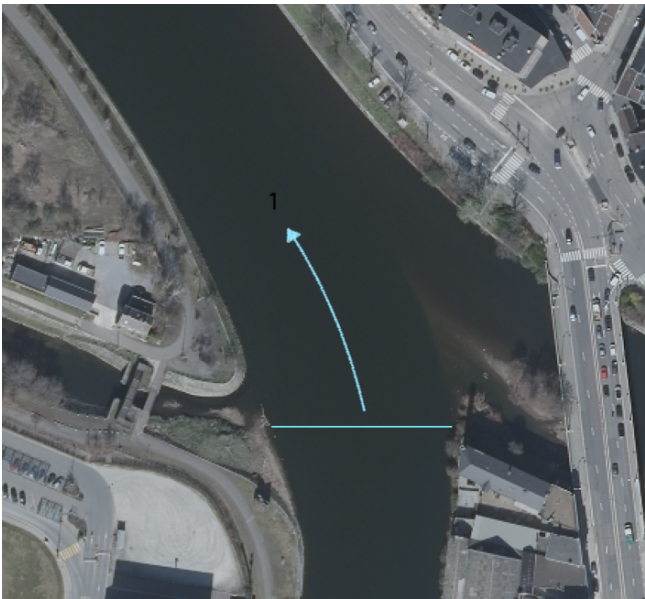


Figure 4.11: Zone d'exfiltration aux Grosses-Battes

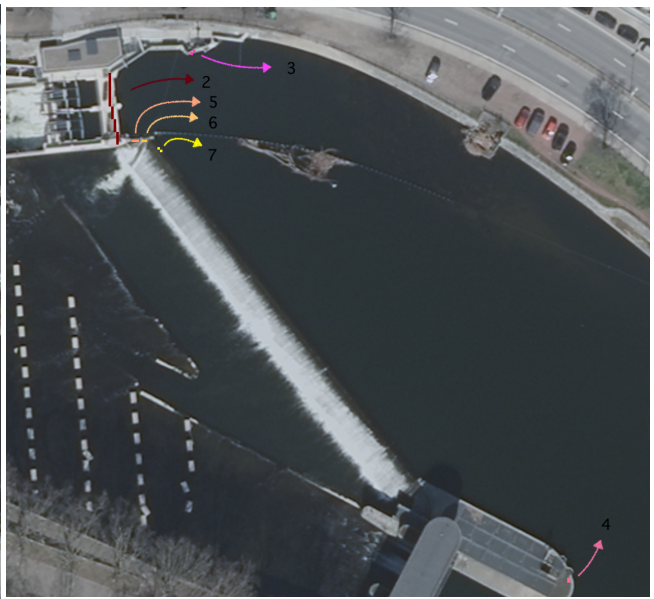


Figure 4.12: Zones d'infiltration aux Grosses-Battes

4.2.2 Bornes d'étude de chaque site en terme de débit d'entrée

L'étude de chaque site se justifie par les compromis à mettre en place pour optimiser la production hydroélectrique et la dévalaison piscicole. En revanche, en dessous d'un certain seuil de débit dans l'Ourthe, un site hydroélectrique peut, malheureusement, devenir infranchissable à la dévalaison. C'est le cas lorsque le débit de la rivière est trop faible pour que l'ensemble des ouvrages du site fonctionne dans la gamme de fonctionnement pour laquelle chacun d'eux a été conçu. En d'autres termes, en dessous d'un débit seuil, aucune amélioration ne pourra être apportée au site. Les turbines seront à l'arrêt les soucis que rencontreront les smolts de saumon pour dévaler seront indépendants du fonctionnement des turbines hydroélectriques. Pour chaque site, le débit minimum qui borde le domaine de cette étude correspond à la somme du débit réservé et du débit minimum pouvant être turbiné par les engins. En dessous de ce débit, les turbines s'arrêtent et l'entièreté du débit résiduel est réservé pour les ouvrages de déversement (échelles à poissons, déversoirs, échancrures, by-pass). Le TABLEAU 4.1 détaille le scénario minimum à prendre en compte dans cette étude.

| Scénario minimum [m ³ /s] | | | |
|--------------------------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|
| | Q _{réserve} | Q _{min,turbines} | Q _{amont} |
| Chanxhe | 7 | 3 | 10 |
| Méry | 1,15 | 4 | 5,15 |
| Grosses-Battes | 15 | 4,4 | 19,4 |

Tableau 4.1: Seuil minimum du débit des trois sites pour cette étude

D'autre part, la borne maximum des débits à prendre en compte sur chaque site correspond au débit de la rivière qui provoque une lame d'eau sur le déversoir égale à 13 cm. A partir de cette lame d'eau, comme la littérature le stipule, le smolt de saumon peut aisément dévaler le site par le déversoir, en plus de toutes les autres voies de passages. Il ne serait donc pas nécessaire de trouver une solution puisque le site serait franchissable quoi qu'il advienne des centrales hydroélectriques. Dans un premier temps, pour trouver le débit d'entrée de la rivière correspondant à une lame d'eau de 13 cm sur le déversoir, il a fallu calculer le débit nécessaire sur le déversoir seul. Sachant que le déversoir est à seuil épais sur les trois sites étudiés, la hauteur de la lame d'eau sur chacun d'eux vaut la hauteur critique. Le débit critique se calcule succinctement comme ci-dessous:

$$\begin{aligned}
0,13 \text{ cm} = h_{cr} &= \left(\frac{Q_{crit}^2}{g \cdot B^2} \right)^{1/3} \Leftrightarrow Q_{crit}^2 = h^3 \cdot g \cdot B^2 \\
&\Leftrightarrow Q_{crit} = \sqrt{h_{crit}^3 \cdot g \cdot B^2} \\
&\Leftrightarrow Q_{crit} = h_{crit} \cdot B \cdot \sqrt{h_{crit} \cdot g}
\end{aligned}$$

Où:

- Q_{crit} [m³/s] est le débit critique atteint au dessus du déversoir à seuil épais;
- h [m] est la hauteur d'eau sur le déversoir;
- g [m/s²] est la constante gravitationnelle;
- B [m] est la largeur du déversoir.

Le TABLEAU 4.2 détaille le scénario maximum à prendre en compte dans cette étude.

| Scénario maximum [m ³ /s] | | | | | |
|--------------------------------------|-------|------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| | B [m] | Q _{déversoir} | Q _{réserve sauf déversoir} | Q _{max,turbines} | Q _{amont} |
| Chanxhe | 103 | 15,12 | 5,5 | 22 | 42,6 |
| Méry | 86 | 12,63 | 1,15 | 13,5 | 27,3 |
| Grosses-Battes | 90 | 13,21 | 7,2 | 44 | 64,4 |

Tableau 4.2: Seuil maximum du débit des trois sites pour cette étude

A titre de d'information de comparaison les FIGURES 4.13, 4.14 et 4.15 montrent les courbes des débits classés de chaque site sur une période de 25 ans (1999-2024) entre le 15 mars et le 15

mai de chaque années (période de dévalaison des smolts de saumon atlantique dans nos rivières. Pour obtenir les débits au site de Chanxhe, il suffit de prendre les données directement issues de la station hydrométrique de Comblain au Pont situé 1500m en amont et où aucun affluent ne se jette dans l'ourthe entre les deux :

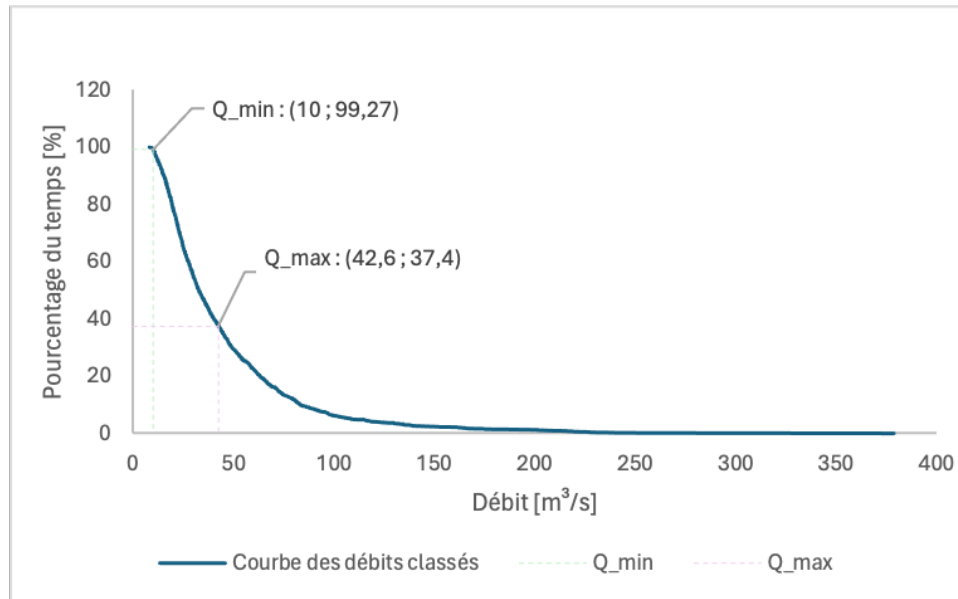


Figure 4.13: Courbe des débits classés au site de Chanxhe pendant la période de dévalaison des smolts entre 1999 et 2024

Il n'y a pas de station hydrométrique à proximité du site de Méry. Pour approximer les débits qui transitent sur le site de Méry sur base des stations hydrométriques disponibles le long de l'Ourthe, les deux stations voisines au site de Méry ont été utilisées. A l'amont, la station la plus proche est celle de Comblain au Pont. Cependant, 17,7km séparent les deux lieux et des affluents viennent alimenter l'Ourthe en débit. A l'aval, c'est 8 km plus bas que la station de Sauheid se trouve. De même, des affluents sont présents sur ce tronçon de telle manière que la station ne mesure pas le débit exacte déjà disponible au site de Méry. Pour approximer les débits au site de Méry sur base des relevés à ces deux stations hydrométriques et des distances qui les séparent, une interpolation linéaire a été opérée.

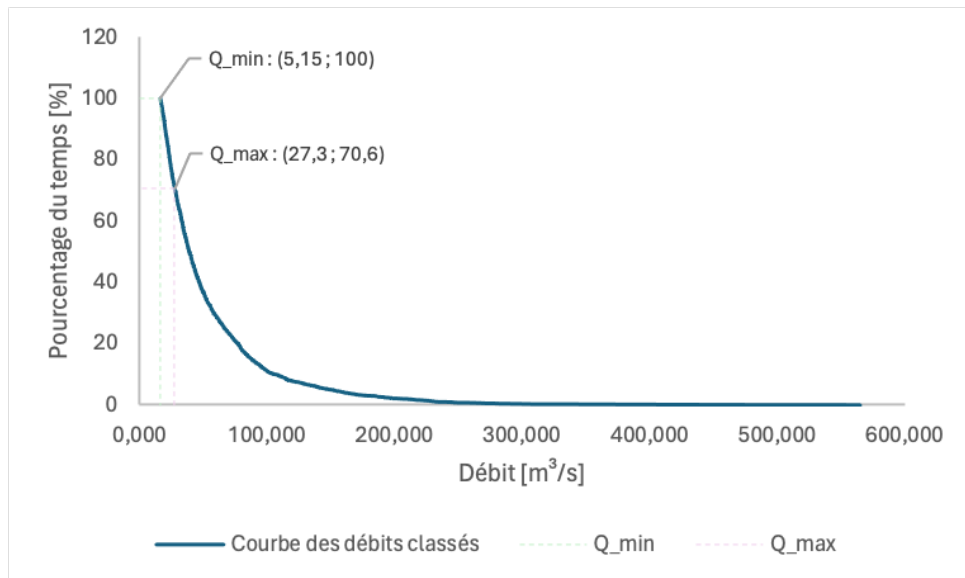


Figure 4.14: Approximation de la courbe des débits classés au site de Méry pendant la période de dévalaison des smolts entre 1999 et 2024

Une station hydrométrique fictive se trouve au droit du site des Grosses-Battes sur le site du Service Public de Wallonie dédié à l'hydrométrie. En effet, aucune station hydrométrique n'y est présente physiquement mais une combinaison des stations voisines permettent de modéliser une station de mesure à cet endroit. Les données peuvent y être directement extraites et traitées.

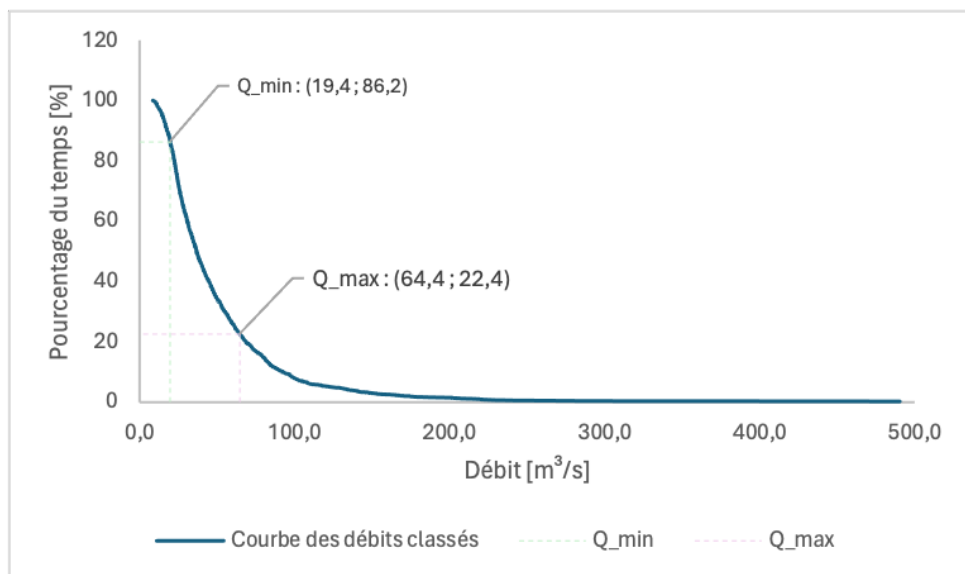


Figure 4.15: Courbe des débits classés au site des Grosses-Battes pendant la période de dévalaison des smolts entre 1999 et 2024

4.2.3 Conditions initiales

Les conditions initiales demeurent semblables pour chaque modélisation, et ce peu importe le site:

1. La hauteur d'eau initialement imposée correspond à un plan d'eau avoisinant la crête du déversoir pour le scénario issu du plus petit débit d'entrée. Puis, en évoluant dans les

modèles numériques par débit croissant, le plan d'eau initial correspond au plan d'eau stabilisé du scénario précédent. Le but étant de lancer la simulation numérique dans des conditions se rapprochant le plus possible de la solution stabilisée afin de gagner en temps de calcul.

2. Initialement, les débits dans les deux directions sont nuls pour chaque cellule du domaine. En effet, estimer ces données ne serait pas rentable compte tenu du temps nécessaire au code de calcul pour converger vers une solution stabilisée, en partant d'un plan d'eau avec des débits nuls.

4.2.4 Conditions limites

Pour chaque site, la condition limite amont est fixée par un débit d'entrée constant par simulation. Aux turbines, un débit de sortie constant est aussi fixé. Tant le débit d'entrée que le débit de sortie aux turbines dépend du scénario modélisé. En revanche, un débit de sortie identique à toutes les simulations est fixé pour les passes à poissons, correspondant au débit réservé de l'ouvrage. Une relation entre la hauteur d'eau et le débit a été définie pour le déversoir et les incisions afin de réguler automatiquement le niveau d'eau dans la zone modélisée en fonction du débit excédentaire libéré par le déversoir et les incisions. Cette relation est traduite par un nombre de Froude. Une incision dans le déversoir est modélisée en tant que seuil mince si elle est fermée. En effet, les incisions se ferment via une plaque de métal ou une planche en bois tel un petit batardeau (FIGURE 4.16).



Figure 4.16: Incision sur le déversoir des Grosses-Battes

En revanche, étant ouverte, une incision possède un seuil épais à l'instar de la majorité du déversoir, mais à une cote inférieure. Sur un seuil épais, l'écoulement est dit critique et le

nombre de Froude est unitaire ($Fr = 1[-]$). Sur les incisions fermées (apparentées comme des seuils minces), il est raisonnable d'imposer également un nombre de Froude unitaire comme condition limite au modèle numérique. Cela correspond à la condition critique attendue sur ces seuils, assurant une continuité logique dans la modélisation de l'écoulement à surface libre. Le reste des conditions limites aval varie en fonction de la configuration de chaque site.

4.2.4.a Chanxhe

La rivière de contournement rejoint l'aval du barrage en écoulement super-critique. C'est pourquoi, en ce bord, aucune condition limite n'est nécessaire. Au code WOLF GPU, un nombre de Froude fixé à 1,5 a été fourni en ce lieu pour simuler la réalité. En effet, l'imposition d'un bords libre n'est pas encore effectif.

Le canal de l'ourthe au droit du barrage de Chanxhe possède un écoulement infracritique. Suite à plusieurs mesures in-situ et modélisations de Reardy et al. (2023), quatres situations d'écoulement ont permis de calculer un nombre de Froude moyen dans ce canal (TABLEAU 4.3):

| | | | | |
|--|-------------|------------|------------|------------|
| Q_{amont} [m ³ /s] | 12,8 | 13,6 | 16,7 | 20,9 |
| v_{canal} [m/s] | 0,016 | 0,017 | 0,02 | 0,024 |
| h_{canal} [m] | 0,65 | 0,65 | 0,7 | 0,7 |
| Froude [-] | 0,000101379 | 0,00011445 | 0,00015264 | 0,00021981 |
| Froude moyen [-] | 0,000147069 | | | |

Tableau 4.3: Froude moyen dans le canal de l'ourthe au site de Chanxhe calculé sur base des simulations de Reardy et al. (2023).

4.2.4.b Méry

Un conduit au droit des turbines Kaplan dans le canal d'entrée en rive gauche a été conçu pour offrir une voie de passage aux espèces piscicoles attirées par les conditions hydrodynamiques qu'offre l'écoulement amont de la turbine Kaplan. Un débit constant y a été imposé. D'après Larinier & Couret (2008) son débit de dimensionnement serait de 0,4 m³/s. Or, en réalité, le débit qui transite à travers ce by-pass varie entre 0,1 et 0,2 m³/s (Renardy et al. 2023). C'est pourquoi, un débit d'infiltration est imposé à 0,15 m³/s pour chaque simulation sur le site de Méry.

4.2.4.c Grosses-Battes

Sur le site des Grosses-Battes, il n'y a pas d'ouvrage particulier nécessitant une condition limite bien précise. La gestion des conditions limites pour le déversoir, les échancrures, les échelles à poissons et les turbines ont déjà été présentées précédemment. Bien que le site possède deux vannes de régulation en rive gauche, aucune modélisation ne nécessite l'ouverture de celles-ci. En effet, les vannes sont ouvertes en période de crue pour limiter la cote amont du barrage. Dans ce cas, la lame d'eau sur le déversoir, sur les échancrures, sur les turbines VLH et celle

qui transite par les vannes permettent une dévalaison sans encombre du site hydroélectrique des Grosses-Battes

4.3 Procédure de travail

Cette section décrit en détail la procédure de travail adoptée pour aborder la problématique de l'amélioration des conditions d'écoulement à l'amont des centrales hydroélectriques afin de favoriser le passage piscicole tout en optimisant la production hydroélectrique. Cette méthodologie est structurée en plusieurs étapes clés, comprenant:

1. L'établissement de critères basés sur la littérature existante;
2. La simulation de l'écoulement des scénarios ayant fait l'objet d'un suivi par radiotélémétrie 2D pour comparer le comportement des smolts vis à vis des conditions d'écoulement obtenues, pour, in fine, confirmer les critères hydrauliques de la littérature ou non;
3. L'établissement d'un score sur l'adéquation de chaque site actuel vis à vis des conditions hydrodynamiques qui favorisent la dévalaison des smolts;
4. Une proposition d'améliorations pour augmenter le score de franchissabilité des sites étudiés.

Chapitre 5



Confirmation des critères hydrodynamiques de la littérature

Ce chapitre est dédié à l'analyse des suivis de smolts via télémétrie radio qui ont été effectués sur les sites de Chanxhe et Méry par Renardy et al. (2023). In fine, l'objectif est de confirmer ou non les critères hydrauliques identifiés dans la littérature et exposé à la section 2.2.1 de ce rapport. Pour rappel, ce sont des conditions hydrauliques qui sont en adéquation avec la migration aval des smolts. Le fait de confirmer ou non ces derniers pourra permettre d'appuyer la littérature sur base d'exemples ou de critiquer celle-ci sur base de contre-exemples et revoir certains chiffres pour la suite de l'étude.

Pour chaque tracé de smolt analysé, les quatre critères de la littérature suivants vont être comparés au trajet du smolt:

- La vitesse de l'écoulement: \vec{u} [m/s];
- Le gradient spatial de vitesse de l'écoulement: $\nabla \vec{u}$ [m/s/m];
- La hauteur d'eau: h [m];
- Le gradient spatial de hauteur d'eau: ∇h [m/m].

Chacun d'entre eux sera d'abord accompagné d'un symbole:

- : Si le critère hydraulique en question est en adéquation avec le comportement du smolt abordé;
- : Si le critère hydraulique en question n'est pas en adéquation avec le comportement du smolt abordé.

Ensuite, un bref commentaire suivra pour développer l'argument.

5.1 Méry

Le suivi des smolts sur le site de Méry s'est articulé suivant six lâchés différents. A chaque fois, six smolts étaient introduit 1200 mètres en amont de la centrale entre 16h et 17h et ce, répartis de la façon suivante (en 2022) :

1. Le 8 avril: le débit de la rivière à l'amont du site était de $27,5 \text{ m}^3/\text{s}$, les deux échancrures externes étaient ouvertes et les deux centrales fermées;
2. Le 14 avril: le débit de la rivière à l'amont du site était de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, les deux échancrures externes étaient ouvertes et les deux centrales fermées;
3. Le 21 avril: le débit de la rivière à l'amont du site était de $27,5 \text{ m}^3/\text{s}$, les deux échancrures externes étaient ouvertes et les deux centrales fermées;
4. Le 28 avril: le débit de la rivière à l'amont du site était de $19,9 \text{ m}^3/\text{s}$, l'échancrure en rive gauche était ouverte et les trois autres fermées;
5. Le 4 mai: le débit de la rivière à l'amont du site était de $18,4 \text{ m}^3/\text{s}$, l'échancrure en rive gauche était ouverte et les trois autres fermées;
6. Le 6 mai: le débit de la rivière à l'amont du site était de $18,4 \text{ m}^3/\text{s}$, l'échancrure en rive gauche était ouverte et les trois autres fermées;

Le TABLEAU 5.1 suivant expose les conditions de débits des six lâchés de poissons :

| Scénarios de suivis de smolts à Méry [m^3/s] | | | | |
|--|----------------------|---------------------|------------------------------|------------------------|
| Configuration | $Q_{\text{rivière}}$ | Q_{Kaplan} | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ |
| 1 | 27,5 | 6,5 | 6,8 | 14,2 |
| 2 | 48 | 7 | 7,5 | 33,5 |
| 3 | 27,5 | 6,5 | 6,8 | 14,2 |
| 4 | 19,9 | 6,1 | 6,4 | 7,4 |
| 5 | 18,4 | 3,3 | 6,6 | 8,5 |
| 6 | 18,4 | 3,3 | 6,6 | 8,5 |

Tableau 5.1: Scénarios de suivis de smolts à Méry

Au total, 36 smolts ont donc été lâchés en guise d'être géolocalisés via radio télémétrie 2D. Par conséquent, la base de données comporte des positions exactes sur le plan du site. Cependant, tous les tracés de suivis de smolts ne sont pas concluants, certains smolts n'ont donné lieu à aucun résultat (défaillance technique). D'autres résultats ne permettent pas une analyse pertinente, notamment lorsque la première détection du smolt a lieu dans le canal d'admission à la turbine Kaplan (FIGURE 5.1) ou encore lorsqu'un smolt se voit localisé succinctement en amont du déversoir puis en aval puis de nouveaux en amont (FIGURE 5.2) et ce, en rive opposée à l'échelle à poissons (seul ouvrage de montaison piscicole).



Figure 5.1: Tracé d'un smolt non-concluant: première détection au droit de la turbine Kaplan

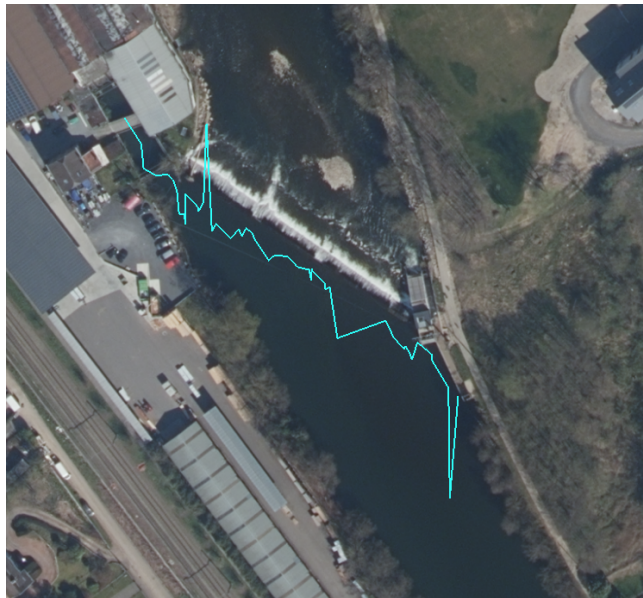


Figure 5.2: Tracé d'un smolt non-concluant: détection en aval du barrage inappropriée

En revanche, d'autres tracés de suivis de smolts demeurent plus concluants. Parmi ceux-ci, tous ont un tracé similaire. C'est pourquoi, seuls deux trajets de smolts vont être présentés. La multiplication des figures n'aurait pas apporté de l'information tant les tracés sont semblables.

Le smolt aux FIGURES 5.3 et 5.4 est issu d'un suivi de smolt de la configuration 1 du TABLEAU 5.1. Il dévale le site en rive droite, se dirige vers la vis d'Archimède. Ensuite, il bifurque le long du déversoir pour rejoindre le canal d'admission à la turbine Kaplan.

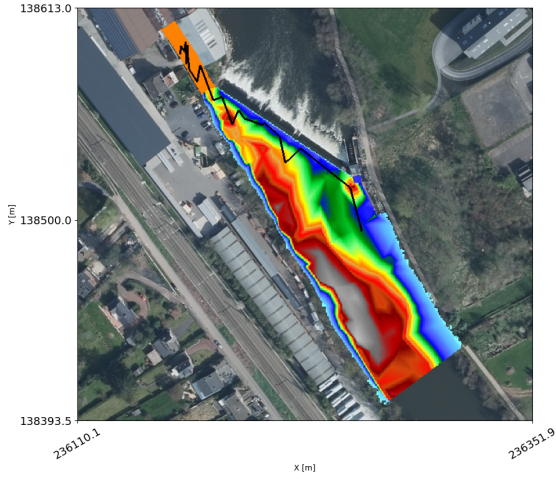


Figure 5.3: Smolt - h_1 [m] - Méry

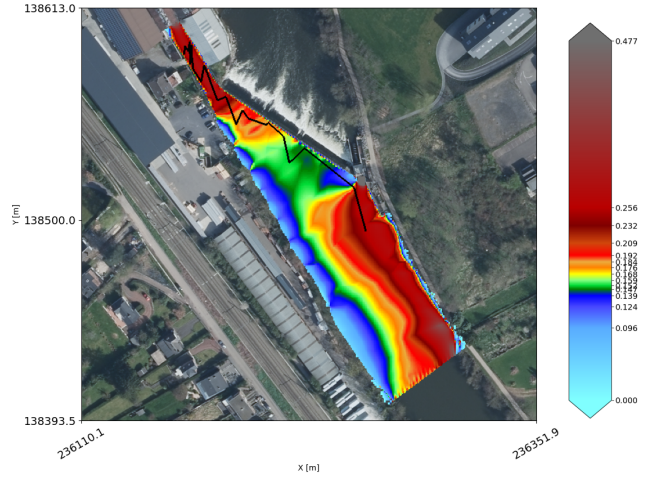


Figure 5.4: Smolt - u_1 [m/s] - Méry

Le smolt arrive au droit de la vis d'Archimède via la rive droite :

- \vec{u} : ✓ L'écoulement satisfait les bornes de vitesse adéquates [0,2-1] m/s;
- $\nabla \vec{u}$: ✓ La vitesse de l'écoulement est constante à environ 0,25 m/s;
- h : ✓ La hauteur d'eau est adéquatement comprise entre 1 m et 2,5 m;
- ∇h : ✓ Le gradient de hauteur est nul.

Ensuite, le smolt change nettement de direction pour longer le déversoir et rejoindre le canal d'admission à la turbine Kaplan :

- \vec{u} : ✗ L'écoulement ne satisfait pas les bornes de vitesse adéquates [0,2;1] m/s, et ce, tout le long du déversoir;
- $\nabla \vec{u}$: ✓ La vitesse de l'écoulement varie mais la limite des 1 m/s/m n'est pas dépassée;
- h : ✓ La hauteur d'eau est adéquatement comprise entre 1 m et 2,5 m tout le long du déversoir;
- ∇h : ✓ Le gradient de hauteur varie fortement au droit de la vis d'Archimède et c'est en ce lieu précis que le smolt bifurque vers une zone où la hauteur demeure constante (le long du déversoir).

La FIGURE 5.5 et la FIGURE 5.6 exposent le tracé d'un smolt correspondant à la configuration numéro 6 du TABLEAU 5.1. Cet autre exemple est complémentaire à chacun des commentaires faits précédemment pour le smolt dont le tracé est présenté aux FIGURES 5.3 et 5.4, mais avec un débit de l'Ourthe et des conditions hydrauliques toutes légèrement différentes en valeurs. Il en est de même pour les autres résultats concluants de ce site qui ne sont pas présentés.

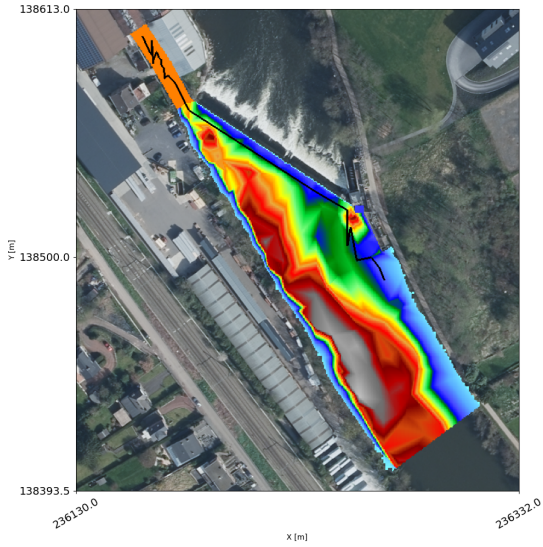


Figure 5.5: Smolt - h_2 [m] - Méry

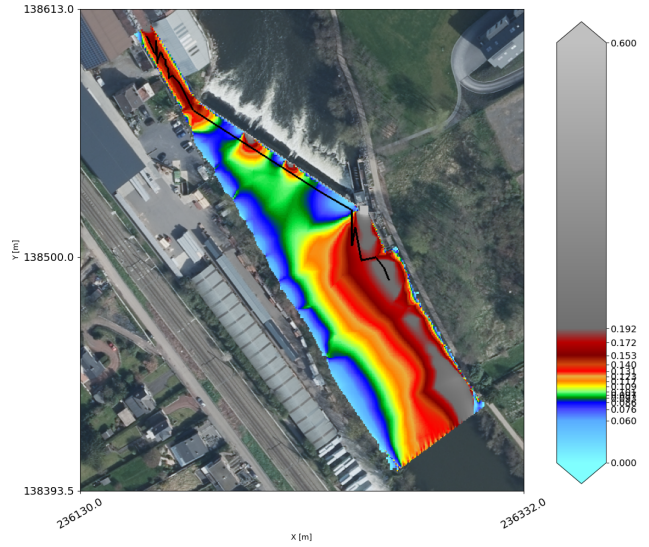


Figure 5.6: Smolt - u_2 [m/s] - Méry

5.2 Chanxhe

A Chanxhe, quatre lâchés différents de smolts ont été opérés au printemps 2023 entre 16h et 17h également, 1330 mètres en amont de la centrale hydroélectrique. A chaque fois, l'échancrure centrale était fermée et les deux échancrures externes étaient ouvertes. Le TABLEAU 5.2 suivant expose les conditions de débits des quatre lâchés de poissons :

| Scénarios de suivis de smolts à Chanxhe [m ³ /s] | | | | | |
|---|----------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| Configuration | $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | $Q_{\text{PAP naturelle}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{canal} |
| 1: 6 smolts le 20 avril | 20,9 | 11,7 | 4,6 | 3,4 | 1,2 |
| 2: 6 smolts le 26 avril | 16,7 | 7,9 | 4,3 | 3,4 | 1,1 |
| 3: 6 smolts le 3 mai | 13,6 | 6 | 3,8 | 2,9 | 1 |
| 4: 7 smolts le 10 mai | 12,8 | 5,6 | 3,4 | 2,9 | 0,9 |

Tableau 5.2: Scénarios de suivis de smolts à Chanxhe

Au total, c'est donc 25 smolts de saumon qui ont été suivis sur le site de Chanxhe. Contrairement à Méry, le suivi s'est fait via télémétrie 1D le long du profil du site. Donc, la position exacte des smolts n'a pas été enregistrée dans le plan. En revanche, l'équipe de Renardy et al. (2023) qui ont effectué ce suivi ont approximé les trajectoires des poissons. C'est sur base des informations radio 1D et approximations de Renardy et al. (2023) que les trajectoires des smolts dévalants le site de Chanxhe vont être analysées.

Tout d'abords, un constat similaire peut être observé à chaque suivi de smolt sur le site de Chanxhe et ce, peu importe le scénario: ils dévalent tous le site en rive droite en s'approchant de la centrale. Les constats quant aux conditions hydrodynamiques sont en adéquation avec les critères de la littérature. En effet:

- \vec{u} : ✓ Le champ de vitesse, bien que moins rapide que le seuil inférieur du critère, se

rapproche le plus des 0,2 m/s. Aucune maille du lit de la rivière principale n'atteint le seuil minimum de 0,2 m/s;

- $\nabla \vec{u}$: ✓ La vitesse de l'écoulement est constante;
- h : ✓ La hauteur d'eau est adéquatement comprise entre 1 m et 2,5 m;
- ∇h : ✓ Le gradient de hauteur est nul.

C'est donc dans la zone avoisinant le barrage en rive droite que les smolts ont réagi de manière distinct. Ces différents cas de figure sont analysés séparément ci-dessous:

Le smolt aux FIGURES 5.7 et 5.8 correspond à une simulation de la configuration numéro 1 du TABLEAU 5.2. Il dévale le site presque au centre du lit de la rivière, légèrement sur la rive droite. Arrivé au droit des vis d'Archimède, le smolt semble perturbé. Il change beaucoup de direction en restant dans la zone avant d'emprunter la vis d'Archimède.

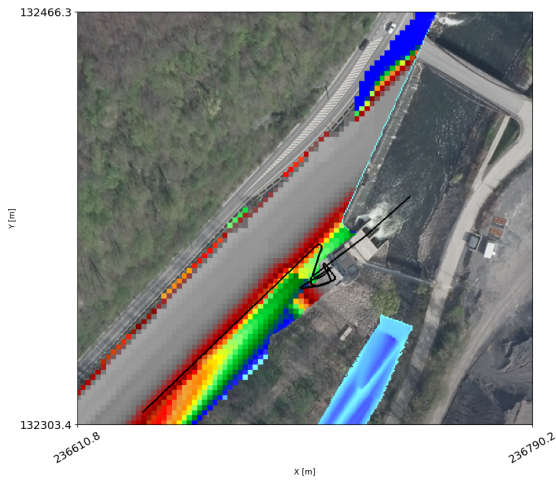


Figure 5.7: Smolt - h_1 [m] - Chauxhe

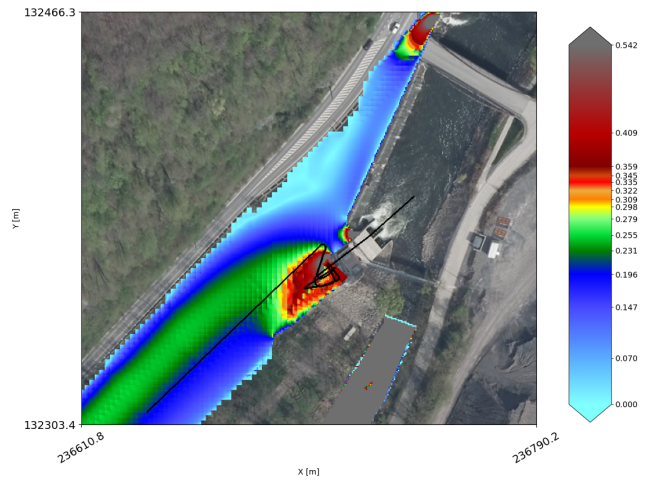


Figure 5.8: Smolt - u_1 [m/s] - Chauxhe

Le smolt change plusieurs fois de direction dans la zone au droit de la vis d'Archimède avant de l'emprunter:

- \vec{u} : ✓ L'écoulement satisfait les bornes de vitesse adéquates [0,2-1] m/s;
- $\nabla \vec{u}$: ✓ La vitesse de l'écoulement varie tout en restant sous le gradient maximum;
- h : ✓ La hauteur d'eau est adéquatement comprise entre 1 m et 2,5 m;
- ∇h : ✓ Le gradient de hauteur est important dans cette zone. Une raison pour laquelle le smolt peut être désorienté avant de dévaler par une vis d'Archimède.

Lors du suivi numéro 3 du TABLEAU 5.2, deux smolts ont emprunté exactement le chemin tracé aux FIGURES 5.9 et 5.10.

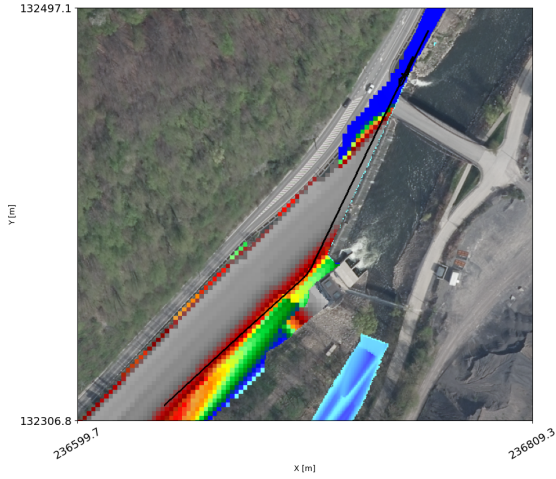


Figure 5.9: Smolt - h_2 [m] - Chanxhe

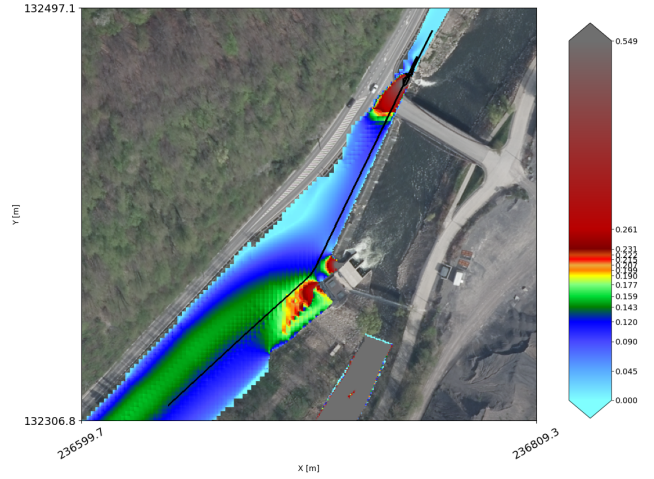


Figure 5.10: Smolt - u_2 [m/s] - Chanxhe

Ces poissons ont bifurqué le long du déversoir, évitant les vis d'Archimède et l'échancrure en rive droite. Cette analyse est la même pour le tracé du smolt aux FIGURES 5.11 et 5.12:

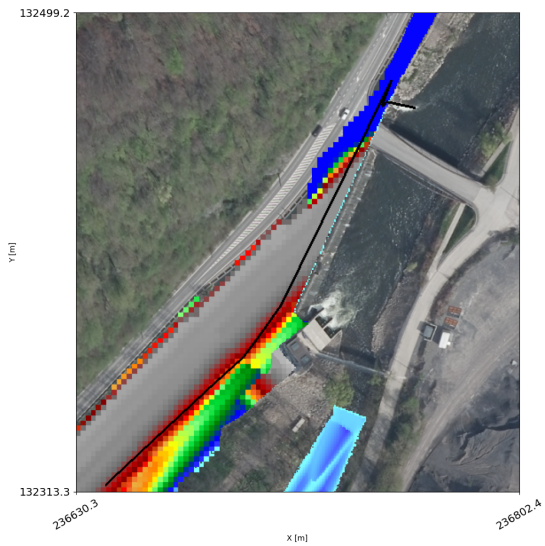


Figure 5.11: Smolt - h_3 [m] - Chanxhe

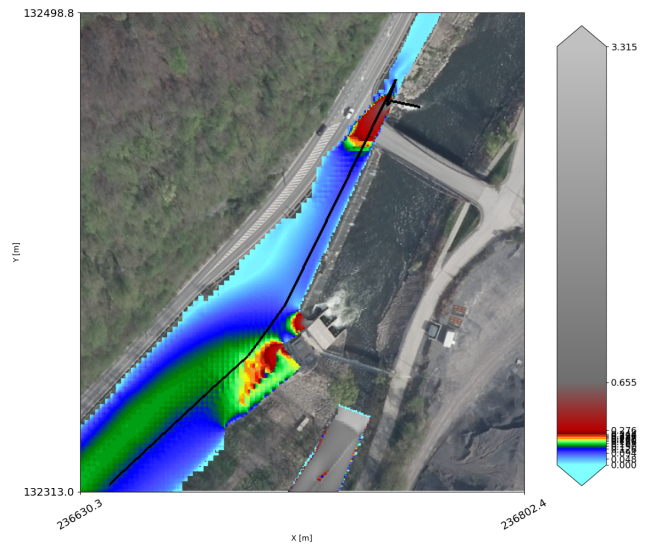


Figure 5.12: Smolt - u_3 [m/s] - Chanxhe

- \vec{u} : ✗ Ils empruntent un trajet où la vitesse de l'écoulement est inférieure à 0,2 m/s;
- $\nabla \vec{u}$: ✓ La vitesse de l'écoulement est constante le long de leur chemin;
- h : ✓ La hauteur d'eau est adéquatement comprise entre 1 m et 2,5 m;
- ∇h : ✓ Le gradient de hauteur est nul le long du déversoir.

De plus, les trois smolts dont il est question ici ont tous été buter à l'entrée du canal avant de revenir au niveau de l'échancrure en rive gauche:

- \vec{u} : ✓ La vitesse change brutalement de valeur. Elle passe d'une valeur comprise dans les bornes du critère [0,2-1] m/s à une vitesse bien en-dessous du seuil minimal ($\vec{u} < 0,05$

m/s). Les poissons reviennent dans une zone adéquate du point de vue de la vitesse d'écoulement;

- $\nabla \vec{u}$: ✓ Les smolts butent contre une zone où le gradient de vitesse est élevé en terme de facteur. En effet, l'écoulement passe d'une vitesse de 0,25 m/s à 0,03 m/s en 1m (facteur 8,3);
- h : ✓ La hauteur d'eau passe d'environ 2,3 m à 0,6 m et les smolts font demi-tour;
- ∇h : ✓ Le gradient de hauteur est élevé: passage de 2,3 m à 0,6 m de profondeur d'eau en à peine 1,5m.

Parmi ces trois smolts, deux finissent par emprunter le canal:

- \vec{u} : ✗ La vitesse d'écoulement est hors bornes ($< 0,2$ m/s);
- $\nabla \vec{u}$: ✓ Il n'y a pas ou très peu de gradient de vitesse;
- h : ✗ La hauteur d'eau est hors bornes (< 1 m);
- ∇h : ✓ Il n'y a pas ou très peu de gradient de hauteur.

Le dernier poisson dévale via l'échancrure en rive gauche:

- \vec{u} : ✓ La vitesse d'écoulement est dans les bornes du critère ($0,2 \text{ m/s} < [0,3-1] \text{ m/s} < 1 \text{ m/s}$);
- $\nabla \vec{u}$: ✓ Il n'y a que très peu de gradient de vitesse;
- h : ✗ La hauteur d'eau est hors bornes ($0,6 < 1 \text{ m}$);
- ∇h : ✓ Il n'y a pas de gradient de hauteur.

Un constat général est fait: le smolt change de direction avec un changement de conditions hydrauliques. Même lorsqu'il est dans une zone non favorable en terme de condition, il reste dedans jusqu'à trouver un changement pour bifurquer.

En conclusion, les critères hydrauliques issus de la littérature peuvent être appuyés par les suivis de smolts réalisés sur les sites de Chanxhe et Méry. En effet, le comparatif du nombre de ✓ vis à vis du nombre de ✗ permet de confirmer ceux-ci. Sur les 32 commentaires concernant le comportement des smolts, 27 ✓ attestent en faveur des critères hydrauliques contre 5 ✗ en leur défaveur. Cela représente une validité des critères hydrauliques issus de la littérature à 84,4 %.

Chapitre 6

Quantification de la franchissabilité des sites dans l'état actuel

Ce chapitre propose de fournir une vue d'ensemble sur la gestion actuelle des sites hydroélectriques en termes de production d'énergie et de protection de la faune piscicole. Cette analyse portera sur les caractéristiques hydrodynamiques de chaque site, afin de quantifier leur franchissabilité et d'identifier les bonnes pratiques ainsi que les éventuelles améliorations à apporter.

En se basant sur les critères hydrauliques favorisant la dévalaison des smolts de saumon, établis à partir de la littérature, les différentes zones de chaque site seront catégorisées comme favorables ou non. Cette classification sera réalisée pour une large gamme de débits, préalablement simulée numériquement. Pour rappel, les critères hydrauliques favorables sont :

- La vitesse de l'écoulement : $0,2 < \vec{u} < 1$ m/s;
- La hauteur d'eau : $1 < h < 2,5$ m;
- Le gradient de vitesse : $\nabla \vec{u} < 1$ m/s/m;
- Le gradient de hauteur d'eau : aucun critère précis, si ce n'est qu'il doit être le petit possible.

La méthode appliquée pour mettre un chiffre sur la franchissabilité d'un site consiste dans un premier temps à déterminer le débit minimum de la rivière à partir duquel le site offre un chemin continu depuis l'amont vers l'aval du site où les conditions hydrodynamiques favorables sont respectées. Pour cela, le résultat d'une simulation va être exposée sur base des cartes suivantes :

- La hauteur d'eau précise sur tout le site;
- L'ensemble des lieux du site où la hauteur d'eau est favorable;
- La norme de la vitesse du courant sur tout le site;
- L'ensemble des lieux du site où la vitesse du courant est favorable;

- L'ensemble des lieux du site où le gradient de la vitesse du courant est favorable;
- Le nombre de critères favorables en chacun des lieux du site.

Ainsi, un chemin continu de critères hydrodynamiques favorables sera formé d'un ensemble de lieux adjacents, qui réunissent tous les critères, de l'amont du site jusqu'à l'aval. A partir de ce débit (précision 1 m³/s) et pour tous les débits supérieurs, le site sera dit 100% franchissable du point de vue hydraulique. Une fois ce débit déterminé, une analyse des débits inférieurs sera faite pour voir comment la situation se dégrade à mesure que le débit de la rivière diminue.

6.1 Chanxhe

6.1.1 Etablissement du score actuel du site sur sa franchissabilité

Dans la situation actuelle, le débit à partir duquel le site de Chanxhe est 100% franchissable est 18 m³/s. Le scénario dont les résultats sont présentés ci-après est détaillé dans le TABLEAU 6.1 le suivant :

| Scénario 18 m ³ /s à Chanxhe [m ³ /s] - OFO ¹ | | | | |
|--|------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| Q _{rivière} | Q _{vis d'Archimède} | Q _{PAP naturelle} | Q _{déversoir} | Q _{canal} |
| 18 | 11 | 5 | 1,5 | 0,5 |

Tableau 6.1: Scénario 18 m³/s à Chanxhe

La hauteur d'eau (FIGURE 6.1) ainsi que les zones où celle-ci est comprise dans les bornes favorables (FIGURE 6.2) prennent la forme suivante :

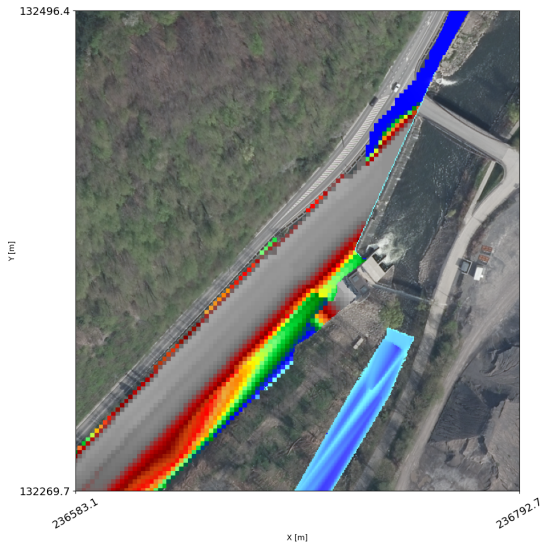


Figure 6.1: Chanxhe / h / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

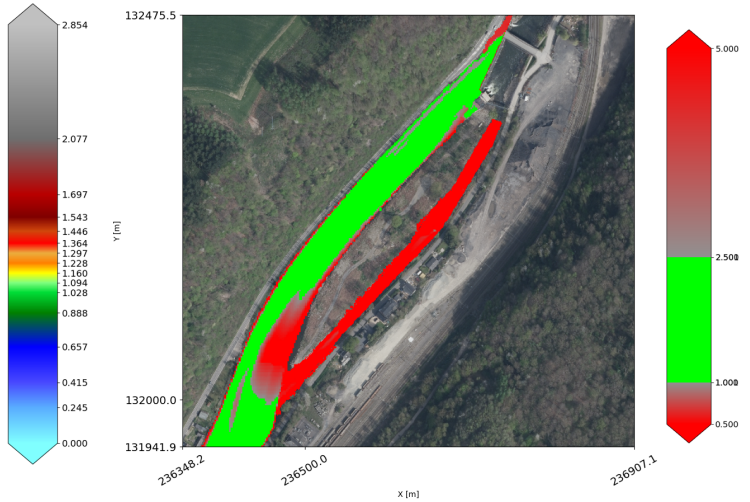


Figure 6.2: Chanxhe / h / validité / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

¹OFO fait référence aux échantures ouvertes (O) et fermées (F). Le code de lettres correspond aux échantures sur le site dans l'ordre de la rive gauche vers la rive droite. Ce code sera réutilisé pour décrire chaque scénario de simulation.

La vitesse de l'écoulement (FIGURE 6.3) et les zones où celle-ci est favorable (FIGURE 6.4) sont disponibles ci-dessous:

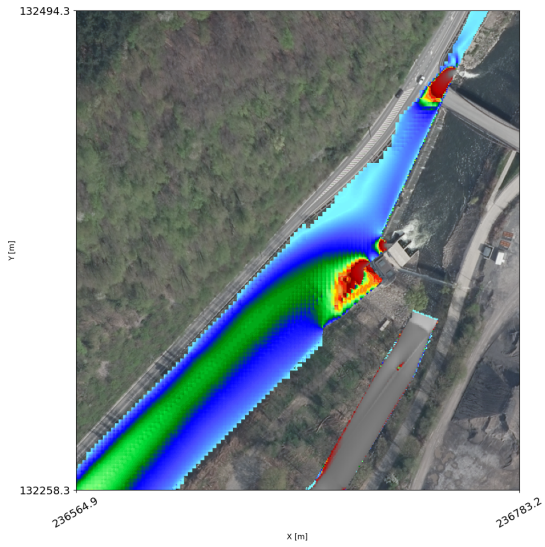


Figure 6.3: Chanxhe / \vec{u} / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

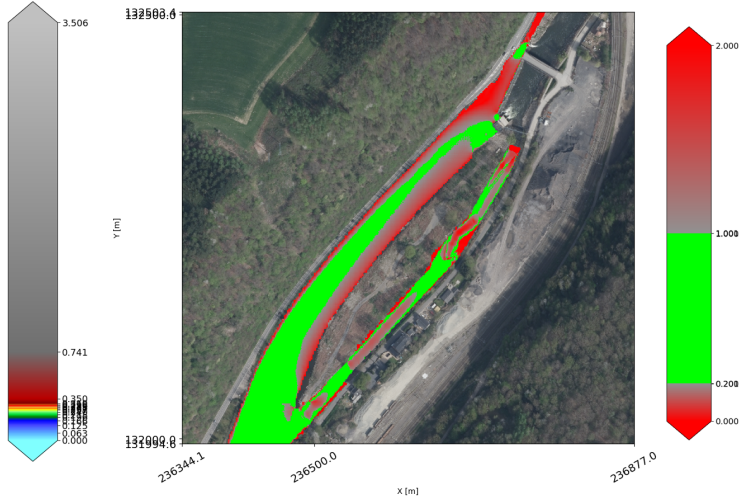


Figure 6.4: Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

Enfin, le gradient de la norme de la vitesse (FIGURE 6.5) et les zones où celle-ci est favorable (FIGURE 6.6) sont disponibles ci-dessous:

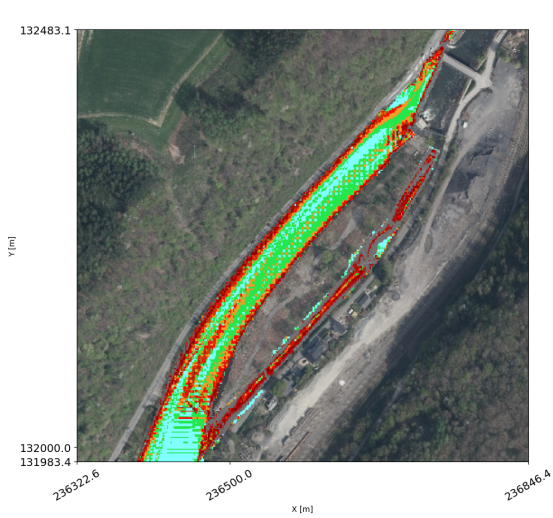


Figure 6.5: Chanxhe / $\nabla \vec{u}$ / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

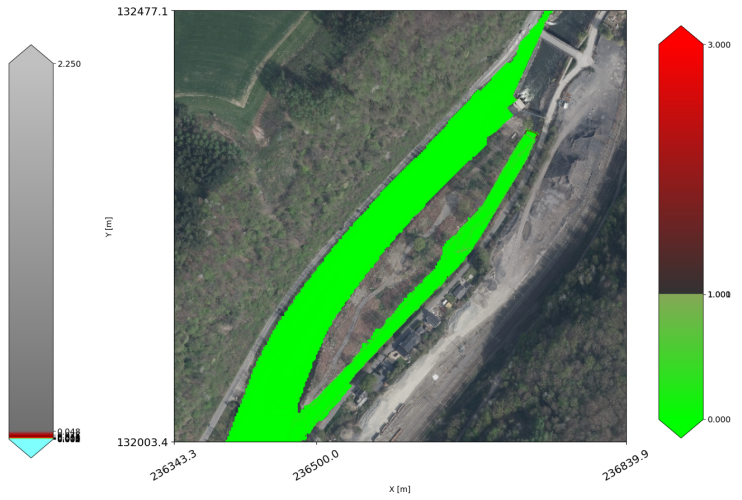


Figure 6.6: Chanxhe / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

Finalement une carte du site qui superpose la validité de chaque critère peut être formée à partir de la FIGURE 6.2, la FIGURE 6.4 et la FIGURE 6.6. Le code couleur suivant est appliqué:

- En rouge, les zones ne possédant qu'un critère valide;
- En orange, l'ensemble des lieux qui rassemble deux critères valides;
- En vert, les lieux qui regroupent les trois critères valides.

C'est ainsi que la FIGURE 6.7 prend forme:

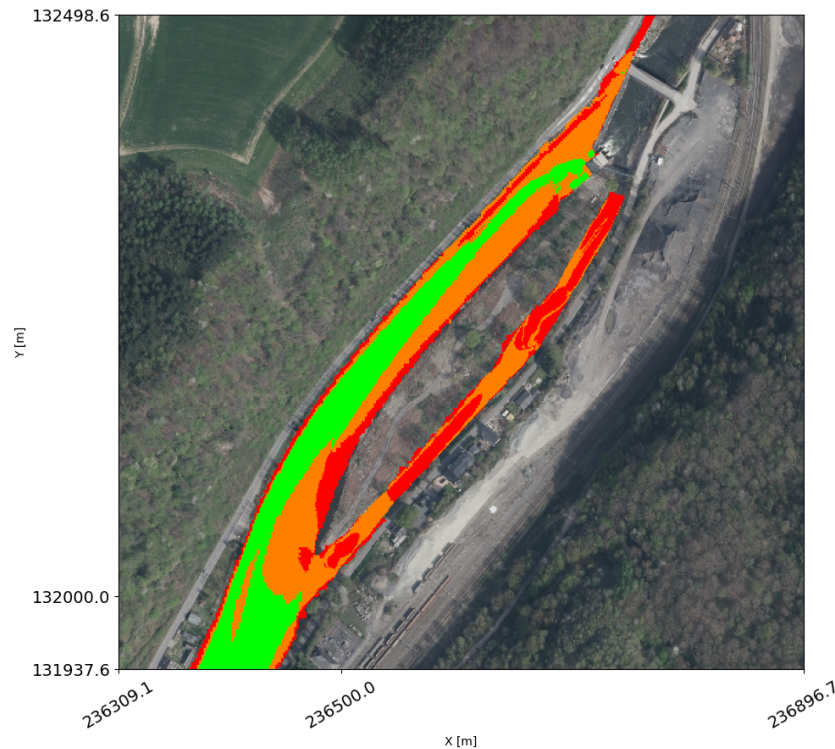


Figure 6.7: Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

Sur la courbe des débits classés du site de Chanxhe (précédemment exposée à la FIGURE 4.13), le débit de $18\text{ m}^3/\text{s}$ correspond à un pourcentage de 83,9%. Ainsi, puisque le site est dit 100% franchissable durant 83,9% du temps, il peut être conclu que le site est franchissable à 83,9%. Au dessus de $18\text{ m}^3/\text{s}$ dans la rivière, il y a toujours un chemin continu où toutes les conditions hydrodynamiques satisfont les critères hydrauliques sur le site.

6.1.2 Dégradation de la franchissabilité du site par débits inférieurs

Pour rappel, le débit qui rendrait le site infranchissable vaut $10\text{ m}^3/\text{s}$. Le débit qui rend le site à 100% franchissable du point de vue condition hydraulique vient d'être exposé et vaut $18\text{ m}^3/\text{s}$. Dans cet intervalle, le site présente des conditions hydrodynamiques qui se dégradent au fur et à mesure que le débit de l'Ourthe diminue. Ce dégradé est développé de la FIGURE 6.8 à la FIGURE 6.21. Les cartes de gradient de vitesse ne seront pas présentées. En effet, le critère est respecté partout sur le site. Montrer une telle carte n'apporterait aucune information pertinente.

- $17,4\text{ m}^3/\text{s}$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.2):

| Scénario $17,4\text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe [m^3/s] - OFO | | | | |
|---|------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | $Q_{\text{PAP naturelle}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{canal} |
| 17,4 | 10 | 5 | 1,9 | 0,5 |

Tableau 6.2: Scénario $17,4\text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe

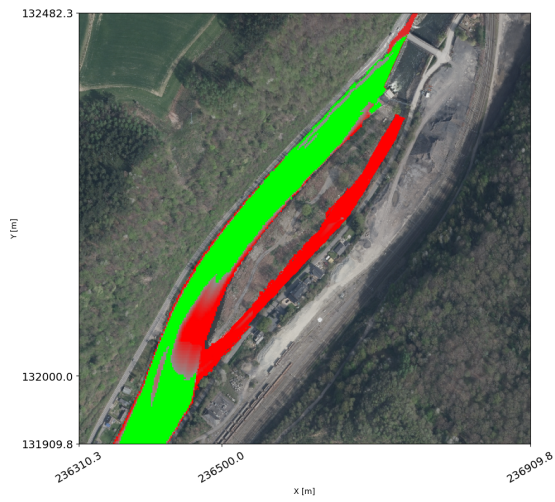


Figure 6.8: Chanxhe / h / validité / $Q=17,4\text{m}^3/\text{s}$

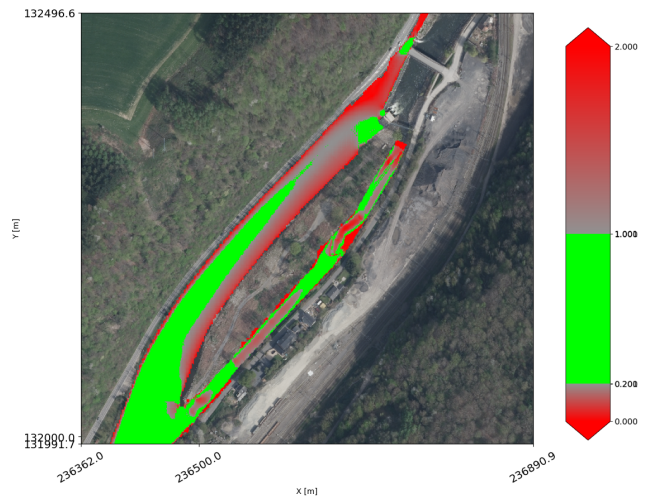


Figure 6.9: Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=17,4\text{m}^3/\text{s}$

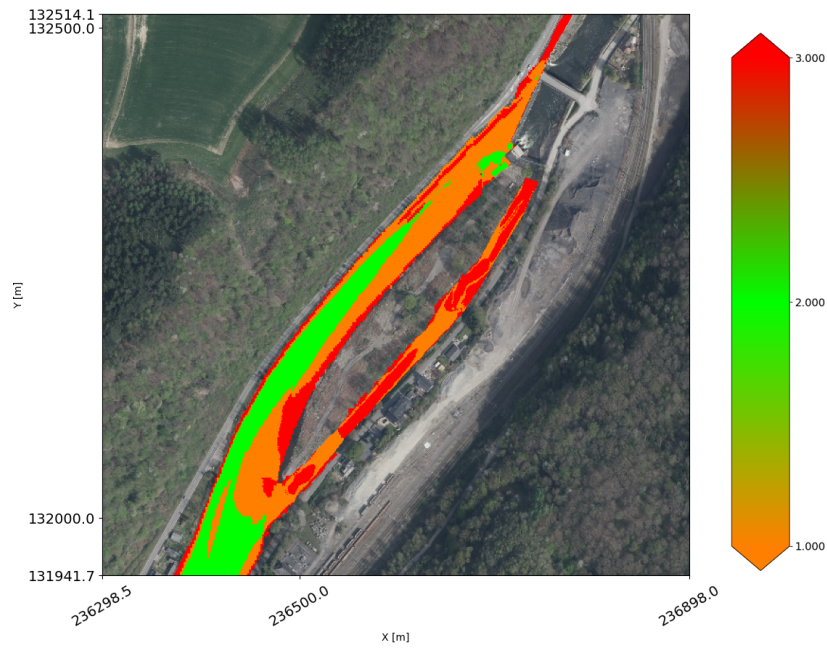


Figure 6.10: Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=17,4\text{m}^3/\text{s}$

- $16,7 \text{ m}^3/\text{s}$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.3):

| Scénario $16,7 \text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe [m^3/s] - OFO | | | | |
|--|------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | $Q_{\text{PAP naturelle}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{canal} |
| 16,7 | 7,9 | 4,3 | 3,4 | 1,1 |

Tableau 6.3: Scénario $16,7 \text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe

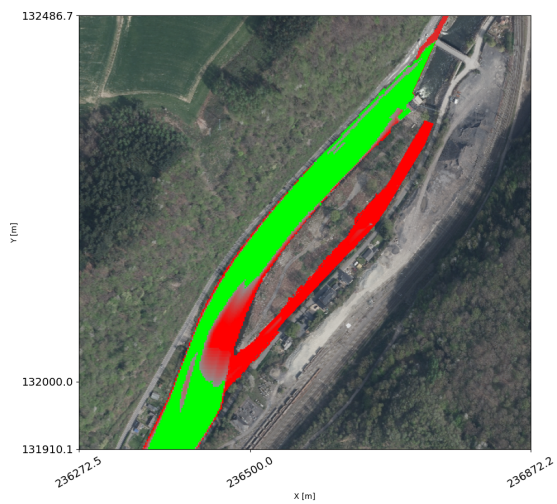


Figure 6.11: Chanxhe / h / validité / $Q=16,7\text{m}^3/\text{s}$

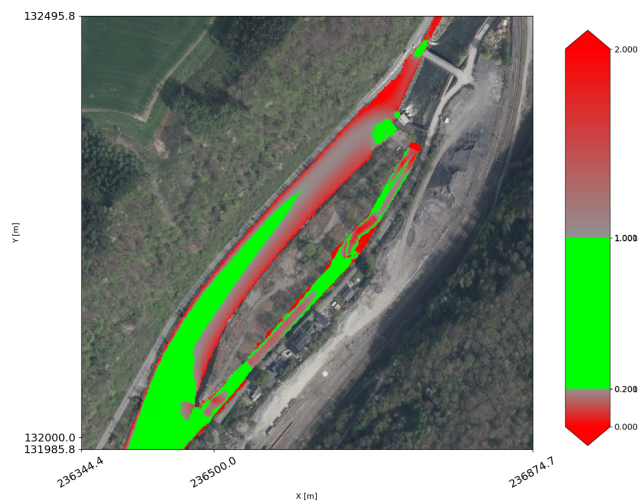


Figure 6.12: Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=16,7\text{m}^3/\text{s}$

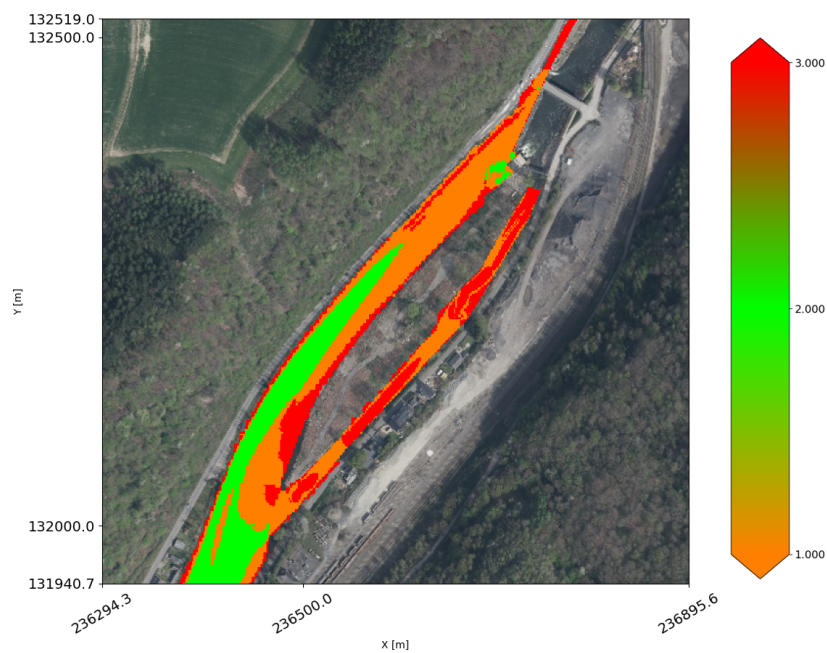


Figure 6.13: Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=16,7\text{m}^3/\text{s}$

- $13,6 \text{ m}^3/\text{s}$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.4):

| Scénario $13,6 \text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe [m^3/s] - OFO | | | | |
|--|------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | $Q_{\text{PAP naturelle}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{canal} |
| 13,6 | 6 | 3,8 | 2,9 | 1 |

Tableau 6.4: Scénario $13,6 \text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe

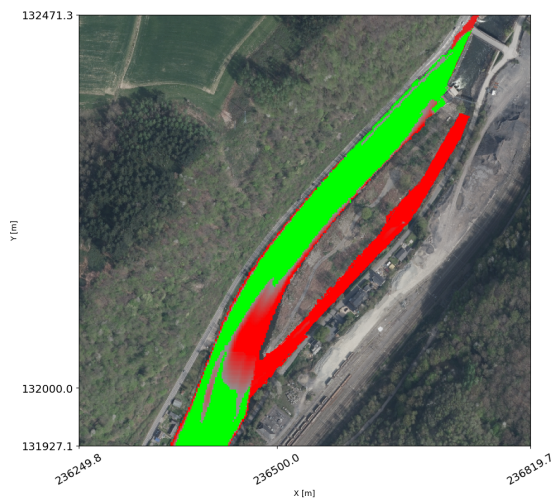


Figure 6.14: Chanxhe / h / validité / $Q=13,6\text{m}^3/\text{s}$

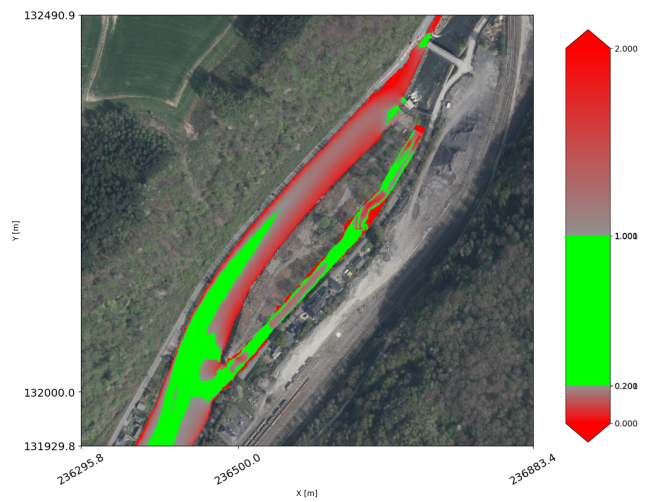


Figure 6.15: Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=13,6\text{m}^3/\text{s}$

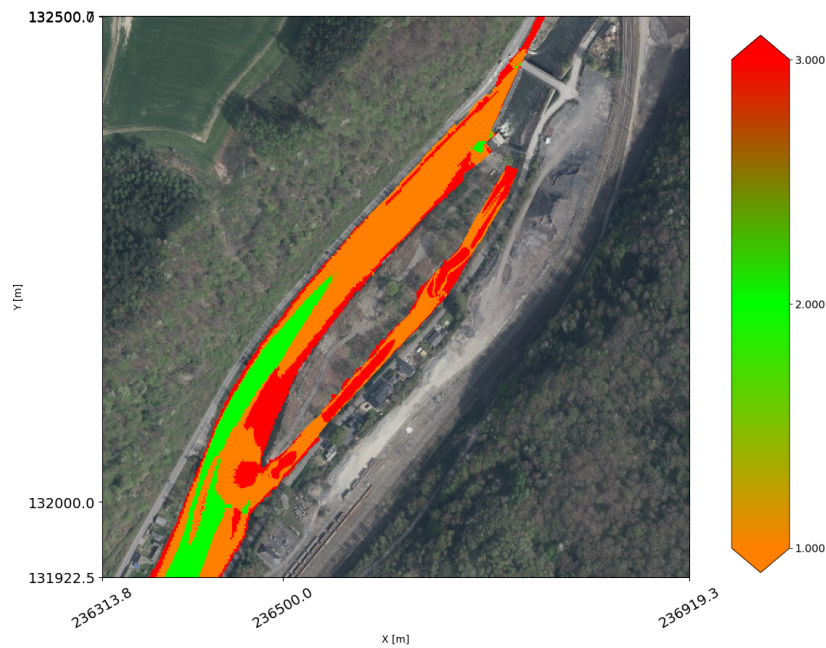


Figure 6.16: Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=13,6\text{m}^3/\text{s}$

- $12,8\text{ m}^3/\text{s}$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.5):

| Scénario $12,8\text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe [m^3/s] - OFO | | | | |
|---|------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | $Q_{\text{PAP naturelle}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{canal} |
| 12,8 | 5,6 | 3,4 | 2,9 | 0,9 |

Tableau 6.5: Scénario $12,8\text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe

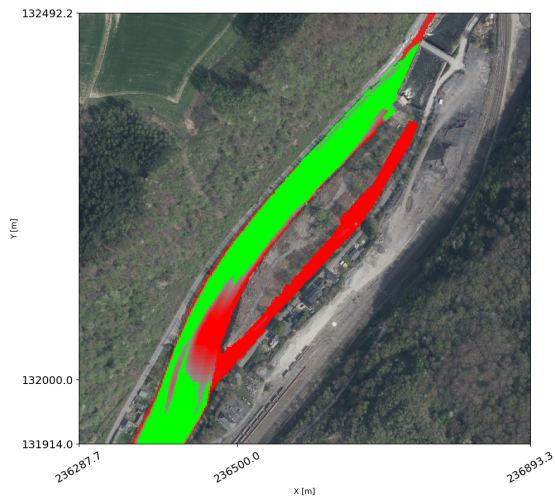


Figure 6.17: Chanxhe / h / validité / $Q=12,8\text{m}^3/\text{s}$

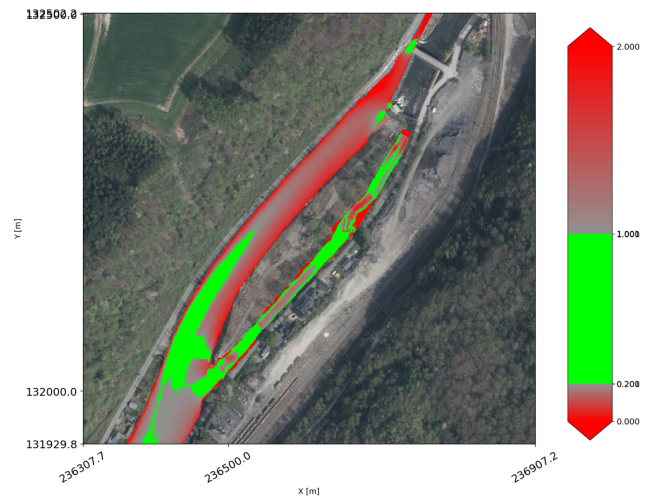


Figure 6.18: Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=12,8\text{m}^3/\text{s}$

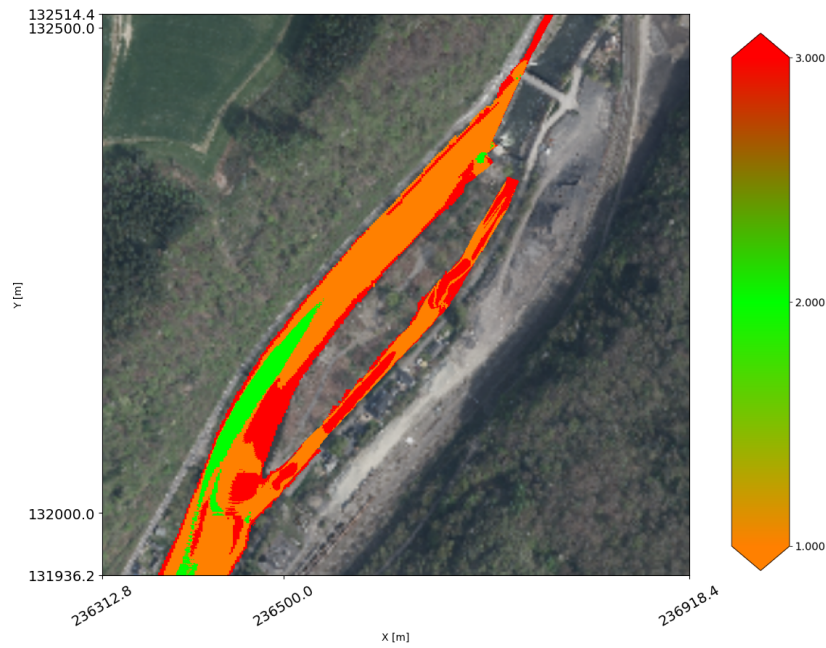


Figure 6.19: Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=12,8\text{m}^3/\text{s}$

- $10\text{ m}^3/\text{s}$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.6):

| Scénario $10\text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe [m^3/s] - OFO | | | | |
|---|------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | $Q_{\text{PAP naturelle}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{canal} |
| 10 | 3 | 5 | 1,5 | 0,5 |

Tableau 6.6: Scénario $10\text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe

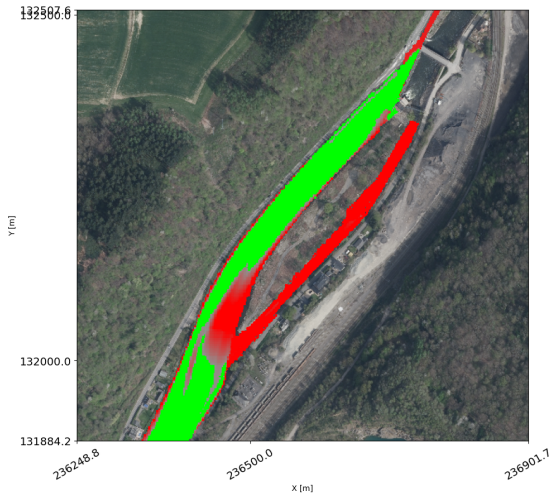


Figure 6.20: Chanxhe / h / validité / $Q=10\text{m}^3/\text{s}$

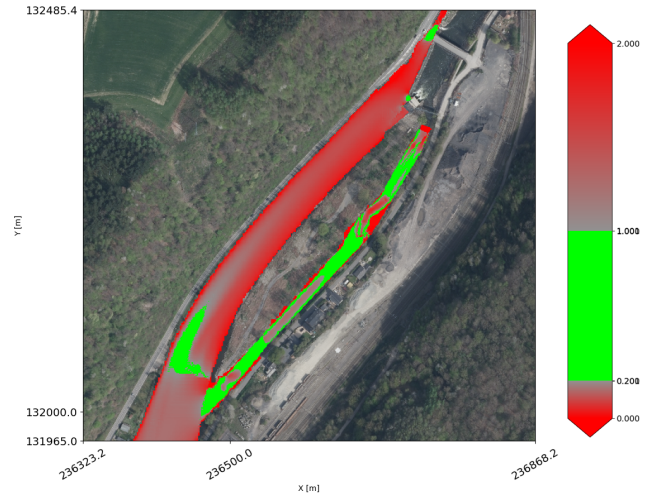


Figure 6.21: Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=10\text{m}^3/\text{s}$

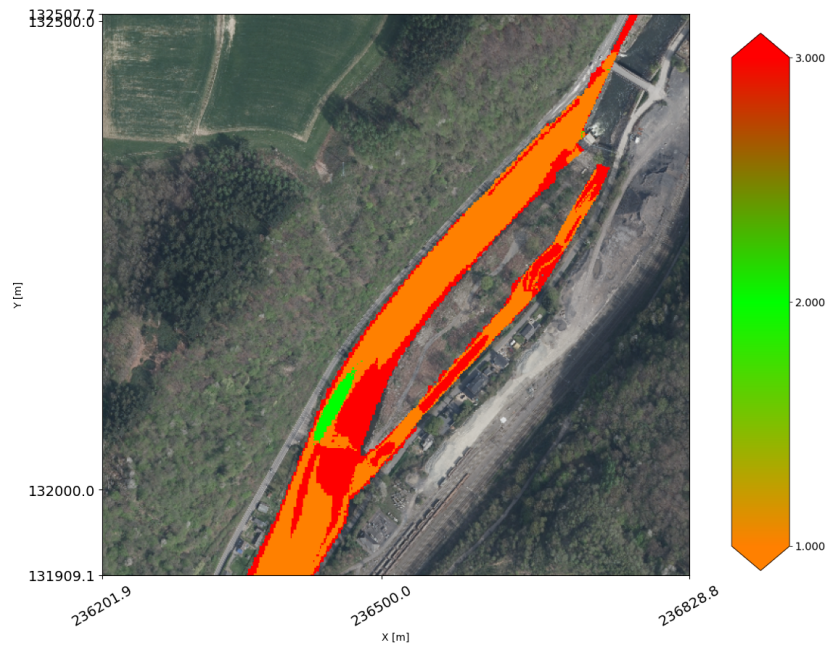


Figure 6.22: Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=10\text{m}^3/\text{s}$

Le constat est très clair, dans la situation actuelle du site, la vitesse de l'écoulement est trop faible pour les débits minimums du cours d'eau. Tant la hauteur d'eau satisfait le critère sur quasiment l'entièreté du site, et ce pour tous les débits étudiés de la rivière, la vitesse de l'écoulement s'affaiblit au fur et à mesure que le débit de la rivière diminue. De ce fait, pour tous les débits de l'Ourthe inférieurs à $18 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le site de Chanxhe, aucun chemin continu qui réuni des vitesses de courant favorables n'est proposé aux smolts.

6.2 Méry

6.2.1 Etablissement du score actuel du site sur sa franchissabilité

Dans la situation actuelle, le débit à partir duquel le site de Méry est 100% franchissable est 60 m³/s. Le scénario dont les résultats sont présentés ci-après est détaillé dans le TABLEAU 6.7 le suivant :

| Scénario 60 m ³ /s à Méry [m ³ /s] - OFFO | | | | | |
|---|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| Q _{rivière} | Q _{vis d'Archimède} | Q _{Kaplan} | Q _{déversoir} | Q _{PAP} | Q _{By-pass} |
| 60 | 7,5 | 6 | 45,35 | 1 | 0,15 |

Tableau 6.7: Scénario 60 m³/s à Méry

La hauteur d'eau (FIGURE 6.23) ainsi que les zones où celle-ci est dans les bornes favorables (FIGURE 6.24) prennent la forme suivante:

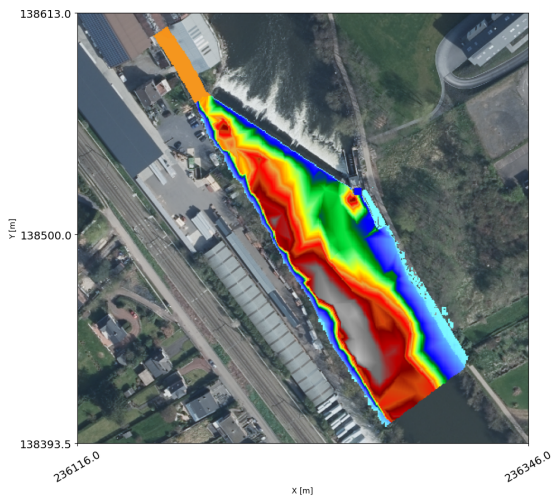


Figure 6.23: Méry / h / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

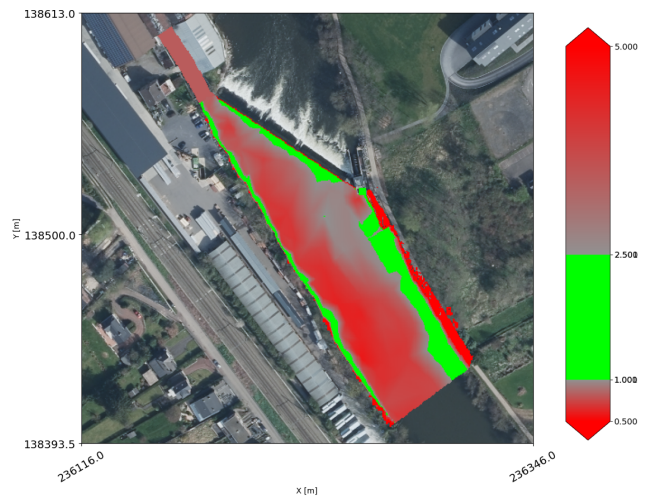


Figure 6.24: Méry / h / validité / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

La vitesse de l'écoulement (FIGURE 6.25) et les zones où celle-ci est favorable (FIGURE 6.26) sont disponibles ci-dessous:

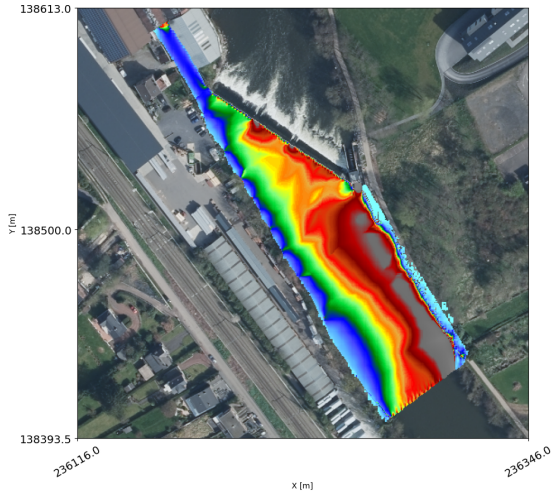


Figure 6.25: Méry / \vec{u} / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

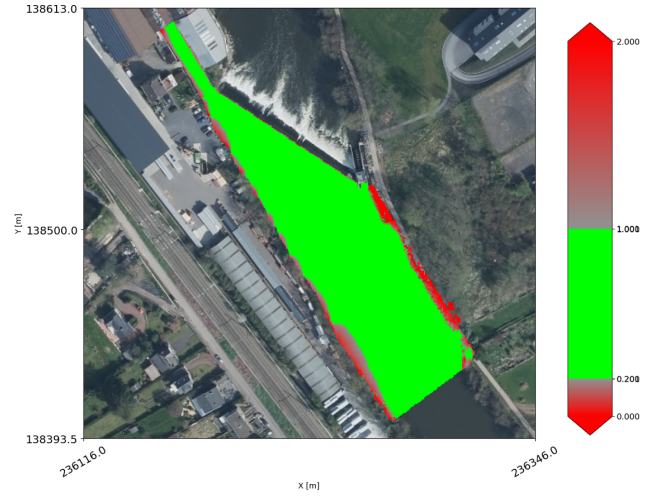


Figure 6.26: Méry / \vec{u} / validité / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

Enfin, le gradient de la norme de la vitesse (FIGURE 6.27) et les zones où celle-ci est favorable (FIGURE 6.28) sont disponibles ci-dessous:

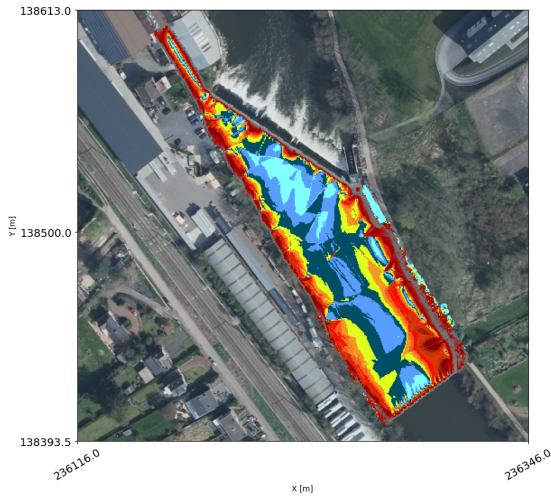


Figure 6.27: Méry / $\nabla \vec{u}$ / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

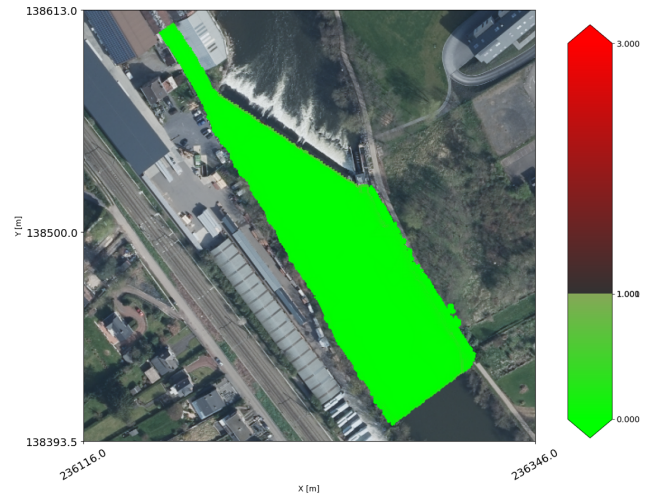


Figure 6.28: Méry / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=18\text{m}^3/\text{s}$

Finalement, la carte du site qui superpose la validité de chaque critère peut être formée à partir de la FIGURE 6.24, la FIGURE 6.26 et la FIGURE 6.28 et prend la forme suivante (FIGURE 6.29):

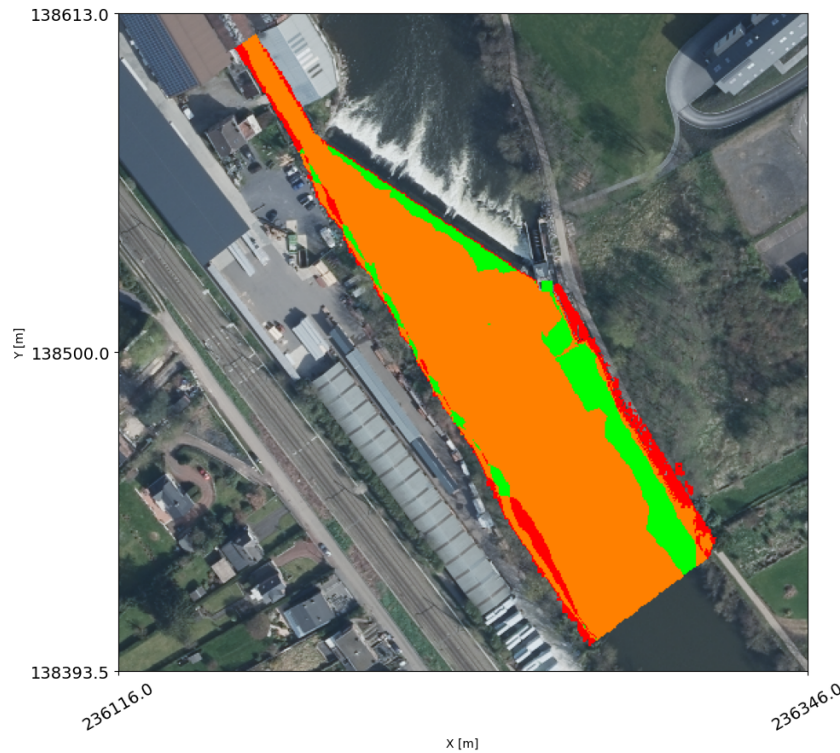


Figure 6.29: Méry - superposition des critères hydrauliques - $Q=60\text{m}^3/\text{s}$

Sur la courbe des débits classés du site de Méry (précédemment exposée à la FIGURE 4.14), le débit de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ correspond à un pourcentage de 29%. Ainsi, puisque le site est dit 100% franchissable durant 29% du temps, il peut être conclu que le site est franchissable à 29%.

6.2.2 Dégradation de la franchissabilité du site par débits inférieurs

Pour rappel, le débit qui rendrait le site infranchissable vaut $5,15 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit qui rend le site à 100% franchissable du point de vue condition hydraulique vient d'être exposé et vaut $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Dans cet intervalle, le site présente des conditions hydrodynamiques qui se dégradent au fur et à mesure que le débit de l'Ourthe diminue. Ce dégradé est développé de la FIGURE 6.30 à la FIGURE 6.47. Les cartes de gradient de vitesse ne seront pas présentées. En effet, comme pour le site de Chanxhe, le critère est respecté partout sur le site et pour tous les scénarios. Montrer une telle carte n'apporterait aucune information pertinente.

- $48 \text{ m}^3/\text{s}$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.8):

| Scénario $48 \text{ m}^3/\text{s}$ à Méry [m^3/s] - OFFO | | | | | |
|--|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | Q_{Kaplan} | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{PAP} | $Q_{\text{By-pass}}$ |
| 48 | 7,5 | 6 | 32,35 | 1 | 0,15 |

Tableau 6.8: Scénario $48 \text{ m}^3/\text{s}$ à Méry

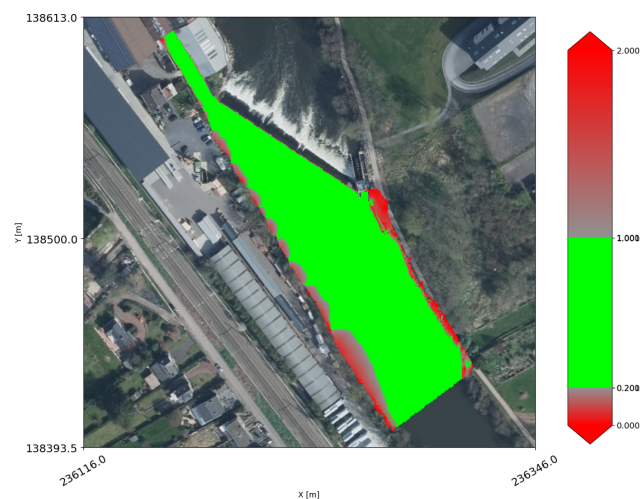
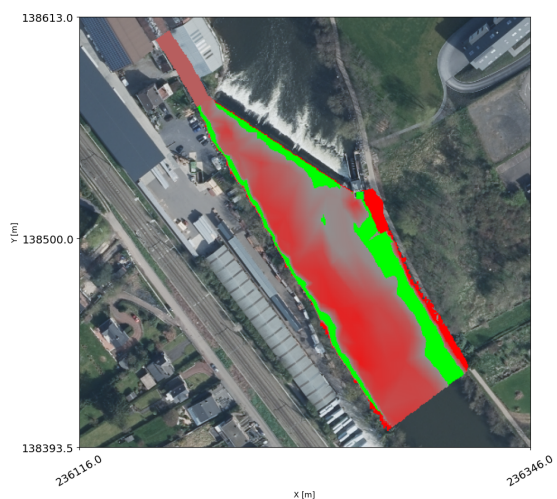


Figure 6.30: Méry / h / validité / $Q=48\text{m}^3/\text{s}$ Figure 6.31: Méry / \vec{u} / validité / $Q=48\text{m}^3/\text{s}$

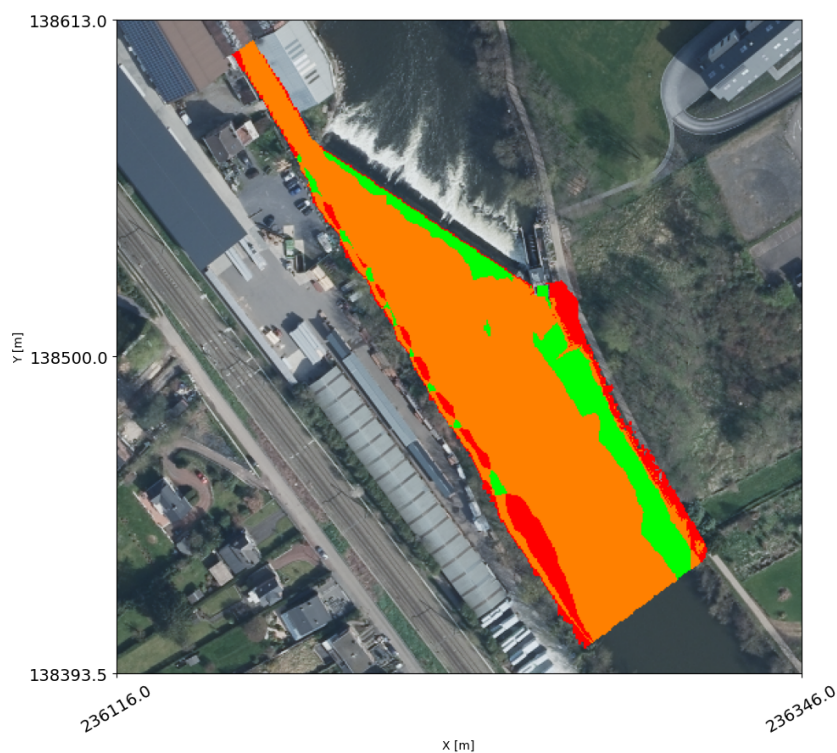


Figure 6.32: Méry - superposition des critères hydrauliques - $Q=48\text{m}^3/\text{s}$

- $38 \text{ m}^3/\text{s}$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.9):

| Scénario $38 \text{ m}^3/\text{s}$ à Méry [m^3/s] - OFFO | | | | | |
|--|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | Q_{Kaplan} | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{PAP} | $Q_{\text{By-pass}}$ |
| 38 | 7,5 | 6 | 23,35 | 1 | 0,15 |

Tableau 6.9: Scénario $38 \text{ m}^3/\text{s}$ à Méry

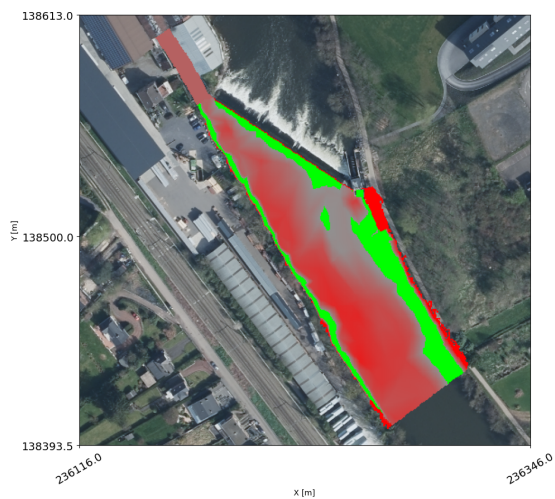


Figure 6.33: Méry / h / validité / $Q=38^3/s$

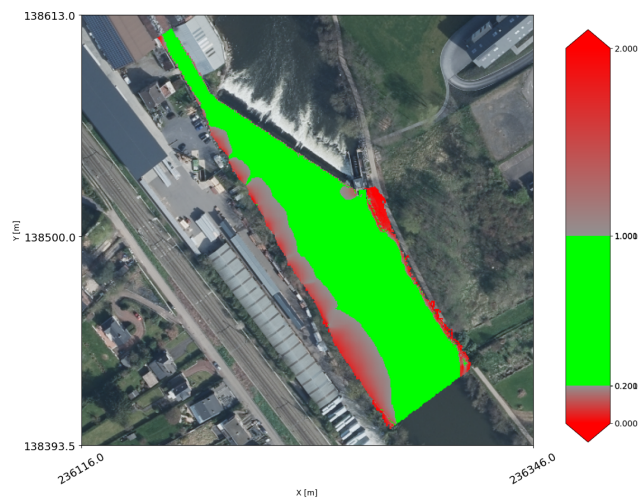


Figure 6.34: Méry / \vec{u} / validité / $Q=38^3/s$

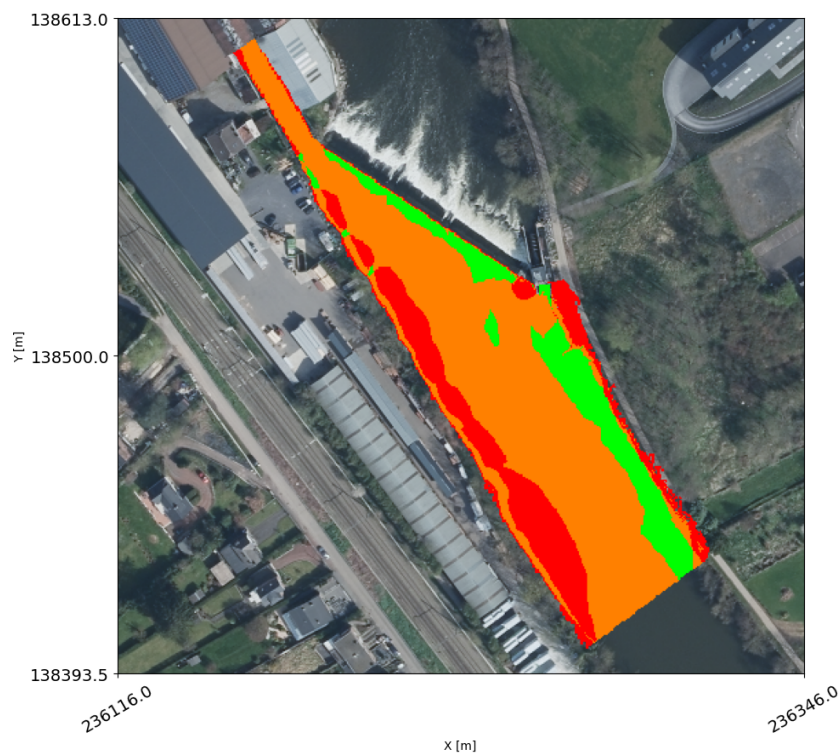


Figure 6.35: Méry - superposition des critères hydrauliques - $Q=38^3/s$

- $27 \text{ m}^3/s$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.10):

| Scénario $27 \text{ m}^3/s$ à Méry [m^3/s] - OFFO | | | | | |
|--|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | Q_{Kaplan} | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{PAP} | $Q_{\text{By-pass}}$ |
| 27 | 7,5 | 6 | 12,35 | 1 | 0,15 |

Tableau 6.10: Scénario $27 \text{ m}^3/s$ à Méry

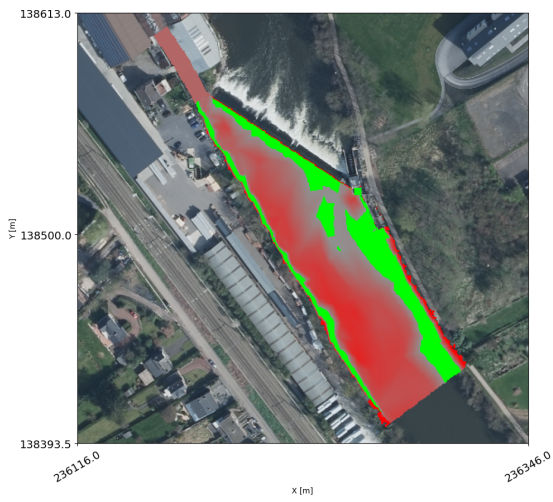


Figure 6.36: Méry / h / validité / $Q=27^3/s$

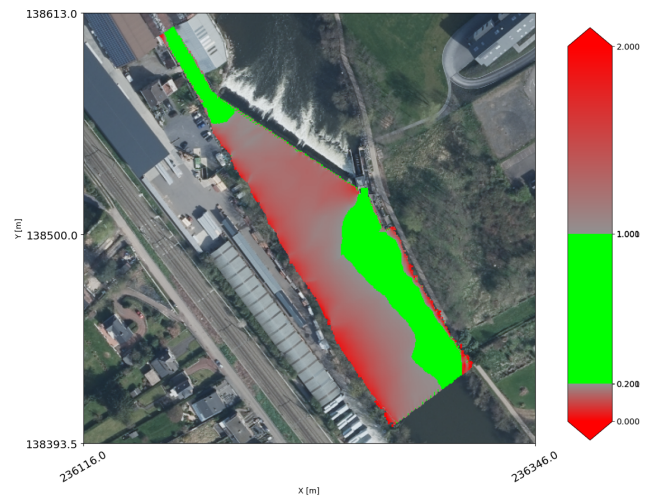


Figure 6.37: Méry / \vec{u} / validité / $Q=27^3/s$

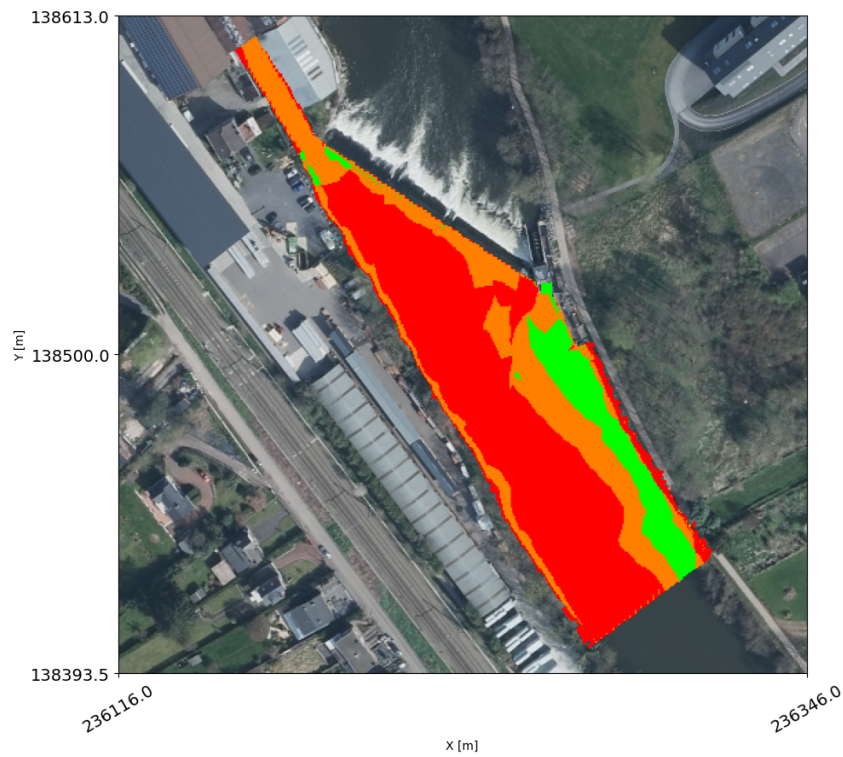


Figure 6.38: Méry - superposition des critères hydrauliques - $Q=27^3/s$

- $19,9 \text{ m}^3/s$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.11):

| Scénario $19,9 \text{ m}^3/s$ à Méry [m^3/s] - FOOO | | | | | |
|--|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | Q_{Kaplan} | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{PAP} | $Q_{\text{By-pass}}$ |
| 19,9 | 6,4 | 6,1 | 6,25 | 1 | 0,15 |

Tableau 6.11: Scénario $19,9 \text{ m}^3/s$ à Méry

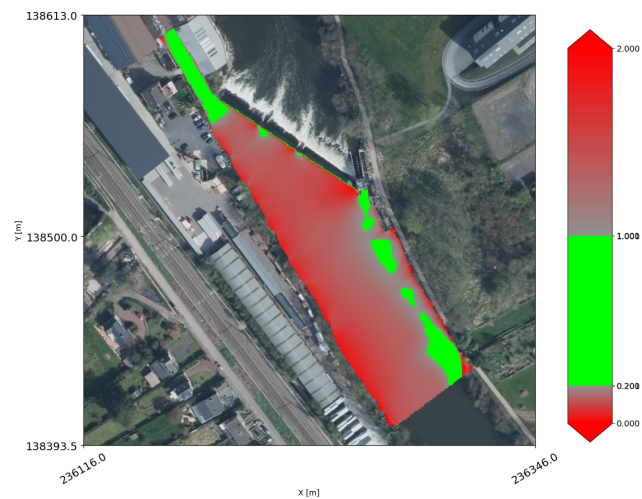
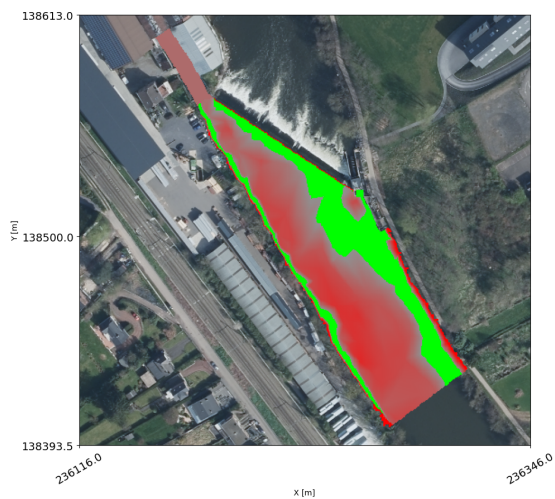


Figure 6.39: Méry / h / validité / $Q=19,9^3/s$ Figure 6.40: Méry / \vec{u} / validité / $Q=19,9^3/s$

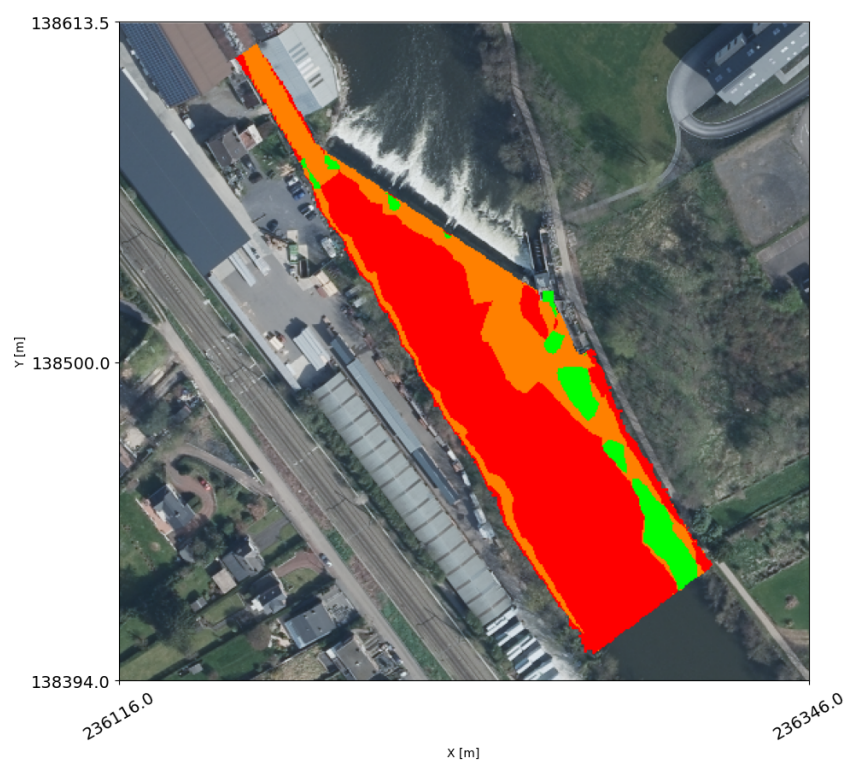


Figure 6.41: Méry / superposition des critères hydrauliques / $Q=19,9^3/s$

- $18,4 \text{ m}^3/s$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.12):

| Scénario $18,4 \text{ m}^3/s$ à Méry [m^3/s] - FOOO | | | | | |
|--|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | Q_{Kaplan} | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{PAP} | $Q_{\text{By-pass}}$ |
| 18,4 | 6,6 | 3,3 | 7,35 | 1 | 0,15 |

Tableau 6.12: Scénario $18,4 \text{ m}^3/s$ à Méry

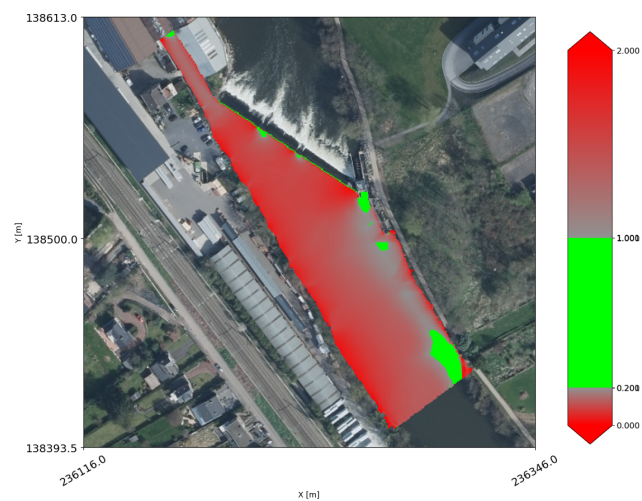
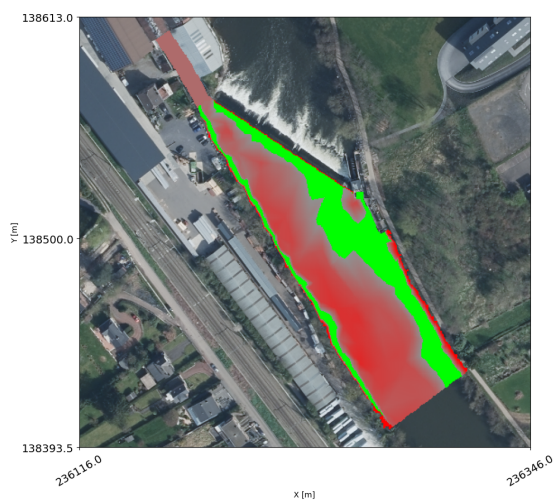


Figure 6.42: Méry / h / validité / $Q=18,4^3/s$ Figure 6.43: Méry / \vec{u} / validité / $Q=18,4^3/s$



Figure 6.44: Méry / superposition des critères hydrauliques / $Q=18,4 \text{ m}^3/s$

- $5,15 \text{ m}^3/s$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.13):

| Scénario $5,15 \text{ m}^3/s$ à Méry [m^3/s] - OFFO | | | | | |
|--|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | Q_{Kaplan} | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{PAP} | $Q_{\text{By-pass}}$ |
| 5,15 | 4 | 0 | 0 | 1 | 0,15 |

Tableau 6.13: Scénario $5,15 \text{ m}^3/s$ à Méry

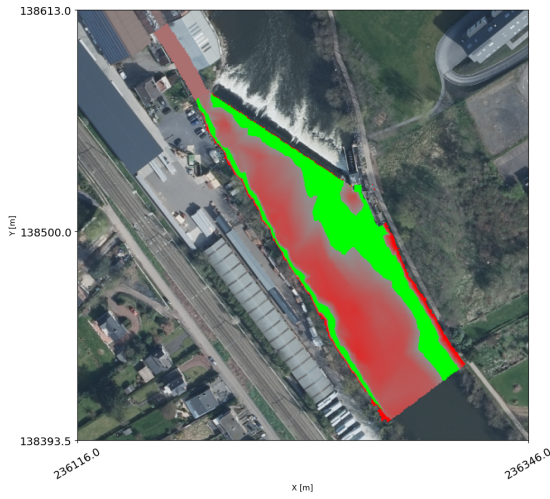


Figure 6.45: Méry / h / validité / $Q=5,15 \text{ m}^3/\text{s}$ Figure 6.46: Méry / \vec{u} / validité / $Q=5,15 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 6.47: Méry / superposition des critères hydrauliques / $Q=5,15 \text{ m}^3/\text{s}$

Sur le site de Méry, jusqu'à un débit de $27 \text{ m}^3/\text{s}$ dans la rivière, la rive droite possède quasiment un chemin continu de zone réunissant tous les critères hydrauliques favorables. En effet, un changement de hauteur net au droit de l'échancrure en rive droite rend la zone hors des bornes adéquates de hauteur d'eau. Cela constitue une piste exploitable pour permettre au site de proposer un chemin continu de zones adéquates du point de vue hydraulique aux smolts jusqu'à des débits bien inférieurs à $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour des débits encore inférieurs, la rive droite offre toujours les meilleures conditions hydrauliques. La hauteur reste dans les bornes du critère tandis que la vitesse du courant est en-dessous du seuil minimal pour des débits inférieurs à $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.3 Grosses-Battes

6.3.1 Etablissement du score actuel du site sur sa franchissabilité

Dans la situation actuelle, il n'y a aucun débit de l'Ourthe qui puisse mener le site des Grosses-Battes à proposer une configuration 100% franchissable aux smolts de saumon. En effet, le déversoir du barrage semble trop haut puisque, pour tout débit, la hauteur d'eau est trop importante. Le débit de la rivière minimum qui regroupe au moins un chemin continu de vitesse et de gradient de vitesse adéquats a néanmoins été déterminé et correspond à $34 \text{ m}^3/\text{s}$. Le scénario dont les résultats sont présentés ci-après est détaillé dans le TABLEAU 6.14 suivant :

| Scénario $34 \text{ m}^3/\text{s}$ à Grosses-Battes $[\text{m}^3/\text{s}]$ - OOO | | | | | |
|---|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | Q_{VLH} | $Q_{\text{échancrures sur VLH}}$ | $Q_{\text{PAP rive droite}}$ | $Q_{\text{PAP rive gauche}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ |
| 34 | 19 | 2 | 1,2 | 2,2 | 9,6 |

Tableau 6.14: Scénario $34 \text{ m}^3/\text{s}$ aux Grosses-Battes

Dans cette configuration, la hauteur d'eau (FIGURE 6.48) ainsi que les zones où celle-ci est dans les bornes favorables (FIGURE 6.49) prennent la forme suivantes:

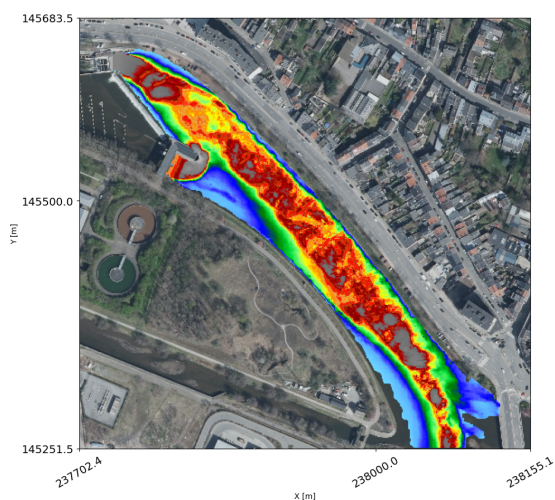


Figure 6.48: GB / h / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$

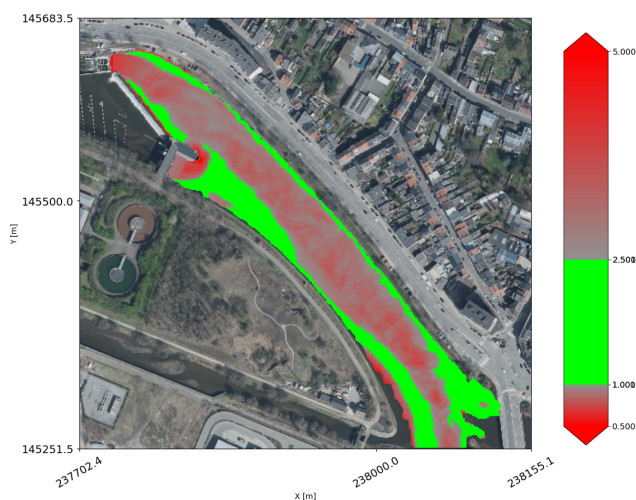


Figure 6.49: GB / h / validité / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$

La vitesse de l'écoulement (FIGURE 6.50) et les zones où celle-ci est favorable (FIGURE 6.51) sont disponibles ci-dessous:

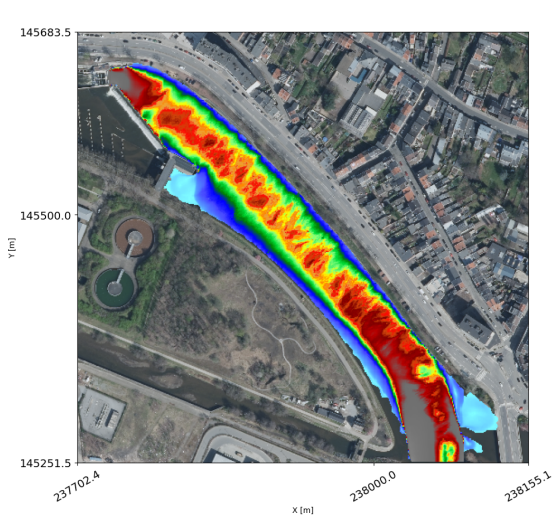


Figure 6.50: Grosses-Battes / \vec{u} / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$

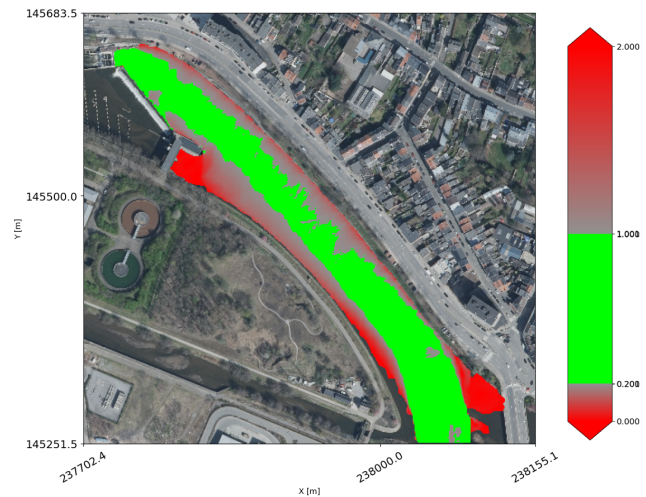


Figure 6.51: Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$

Enfin, le gradient de la norme de la vitesse (FIGURE 6.52) et les zones où celle-ci est favorable (FIGURE 6.53) sont disponibles ci-dessous:

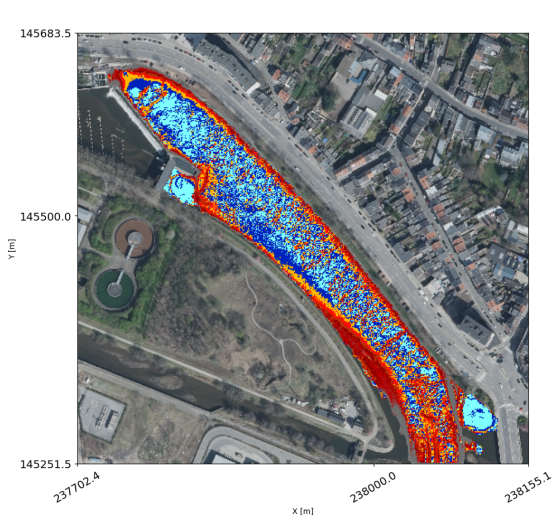


Figure 6.52: Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 6.53: Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$

Finalement, la carte du site qui superpose la validité de chaque critère peut être formée à partir de la FIGURE 6.49, la FIGURE 6.51 et la FIGURE 6.53 et prend la forme suivante (FIGURE 6.54):

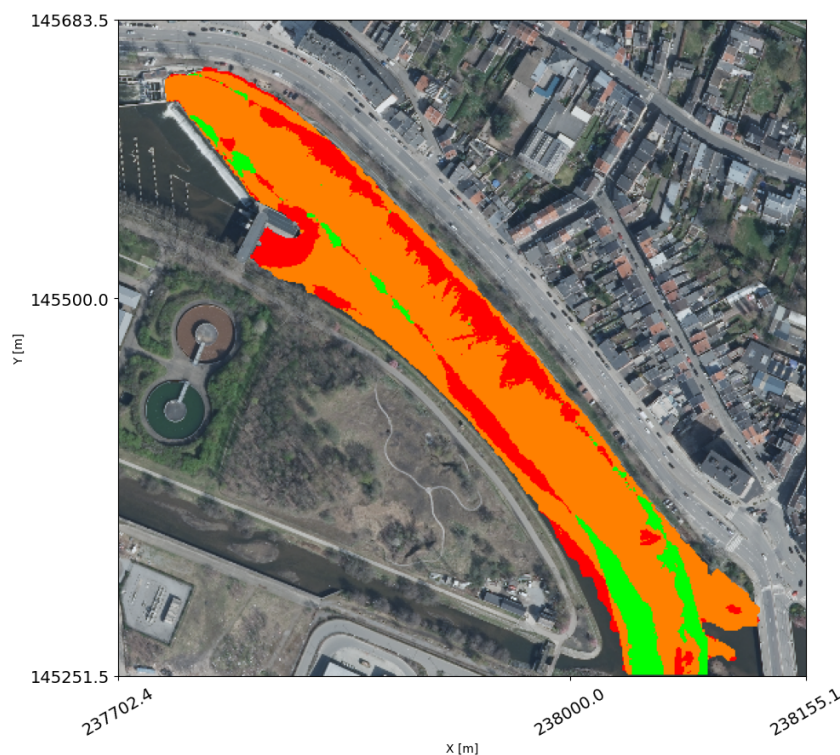


Figure 6.54: Grosses-Battes / superposition des critères hydrauliques / $Q=34 \text{ m}^3/\text{s}$

6.3.2 Dégradation de la franchissabilité du site par débits inférieurs

Pour rappel, le débit qui rendrait le site infranchissable vaut $19,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit qui permet au site d'offrir un chemin continu de vitesse et gradient de vitesse adéquat vient d'être exposé et vaut $34 \text{ m}^3/\text{s}$. Dans cet intervalle, le site présente des conditions hydrodynamiques qui se dégradent au fur et à mesure que le débit de l'Ourthe diminue. Ce dégradé est développé de la FIGURE 6.55 à la FIGURE 6.66. Les cartes de gradient de vitesse ne seront pas présentées. En effet, le critère est respecté partout sur le site et pour tous les scénarios.

- $33 \text{ m}^3/\text{s}$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.15):

| Scénario $33 \text{ m}^3/\text{s}$ à Grosses-Battes [m^3/s] - OOO | | | | | |
|---|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | Q_{VLH} | $Q_{\text{échancrures sur VLH}}$ | $Q_{\text{PAP rive droite}}$ | $Q_{\text{PAP rive gauche}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ |
| 33 | 18 | 2 | 1,2 | 2,2 | 9,6 |

Tableau 6.15: Scénario $33 \text{ m}^3/\text{s}$ aux Grosses-Battes



Figure 6.55: Grosses-Battes / h / validité / Figure 6.56: Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=33\text{m}^3/\text{s}$

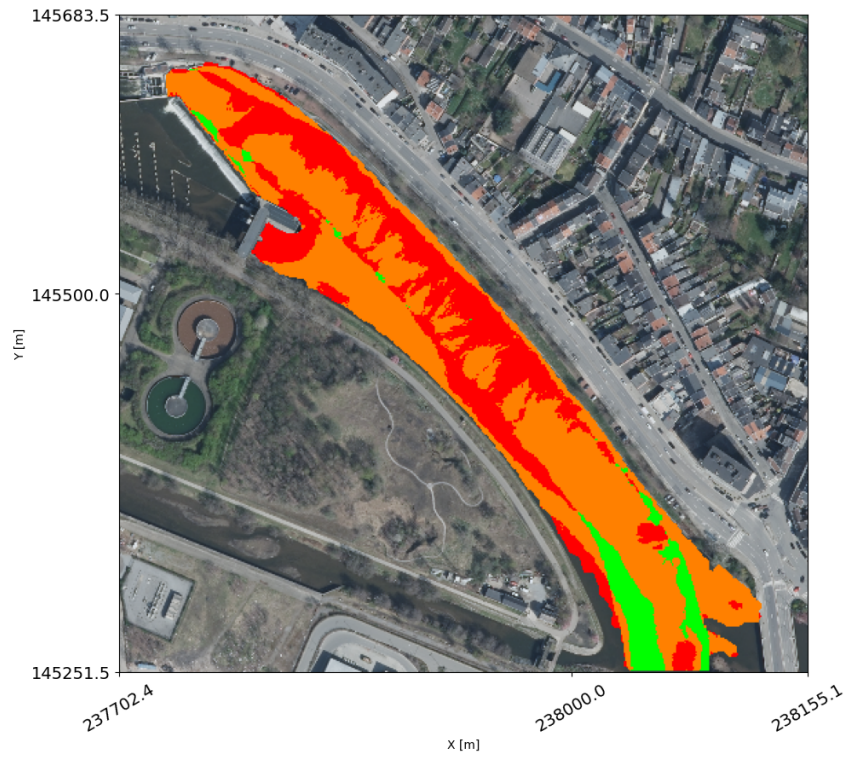


Figure 6.57: Grosses-Battes / superposition des critères hydrauliques / validité / $Q=33\text{m}^3/\text{s}$

- $25\text{ m}^3/\text{s}$ dans l'Ourthe (TABLEAU 6.16):

| Scénario $25\text{ m}^3/\text{s}$ à Grosses-Battes [m^3/s] - OOO | | | | | |
|--|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | Q_{VLH} | $Q_{\text{échancrures sur VLH}}$ | $Q_{\text{PAP rive droite}}$ | $Q_{\text{PAP rive gauche}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ |
| 25 | 10 | 2 | 1,2 | 2,2 | 9,6 |

Tableau 6.16: Scénario $25\text{ m}^3/\text{s}$ aux Grosses-Battes

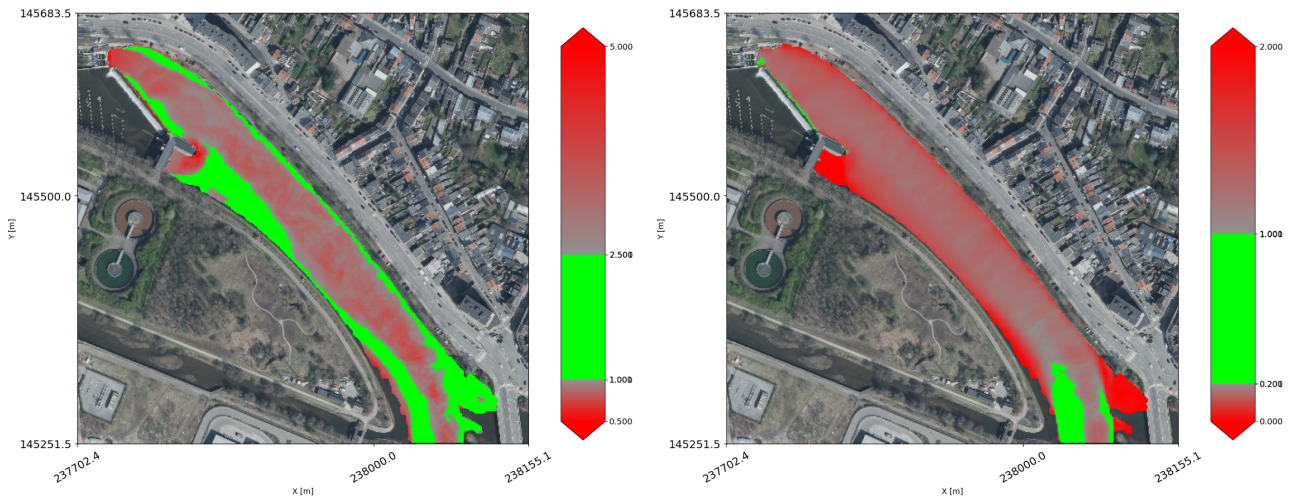


Figure 6.58: Grosses-Battes / h / validité / Figure 6.59: Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=25^3/s$

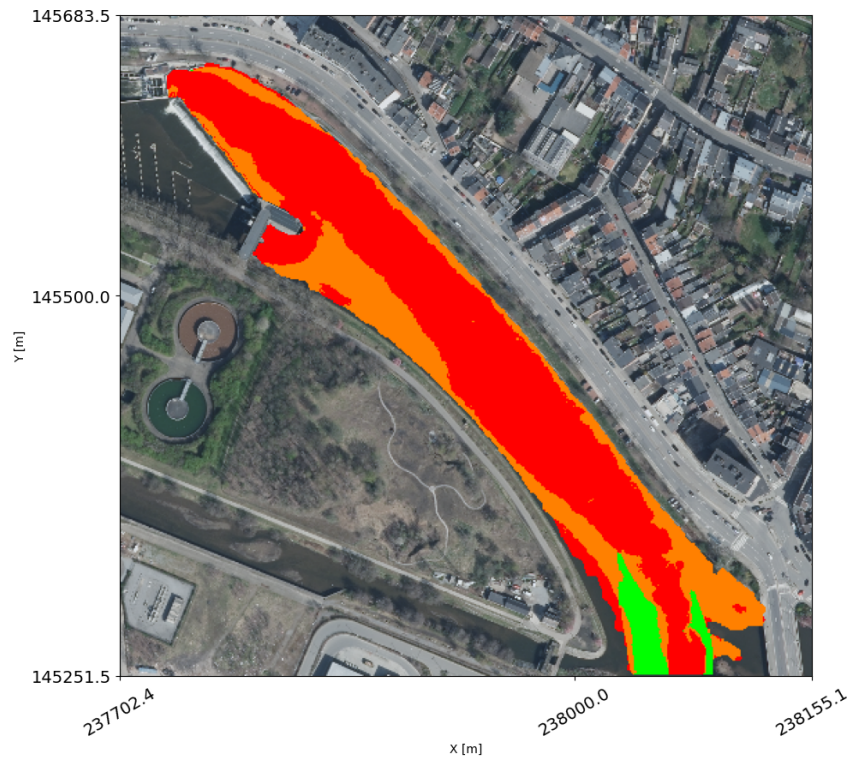


Figure 6.60: Grosses-Battes / superposition des critères hydrauliques / validité / $Q=25^3/s$

- 22 m³/s dans l'Ourthe (TABLEAU 6.17):

| Scénario 22 m ³ /s à Grosses-Battes [m ³ /s] - OOO | | | | | |
|--|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Q _{rivière} | Q _{VLH} | Q _{échancrures sur VLH} | Q _{PAP rive droite} | Q _{PAP rive gauche} | Q _{déversoir} |
| 22 | 7 | 2 | 1,2 | 2,2 | 9,6 |

Tableau 6.17: Scénario 22 m³/s aux Grosses-Battes

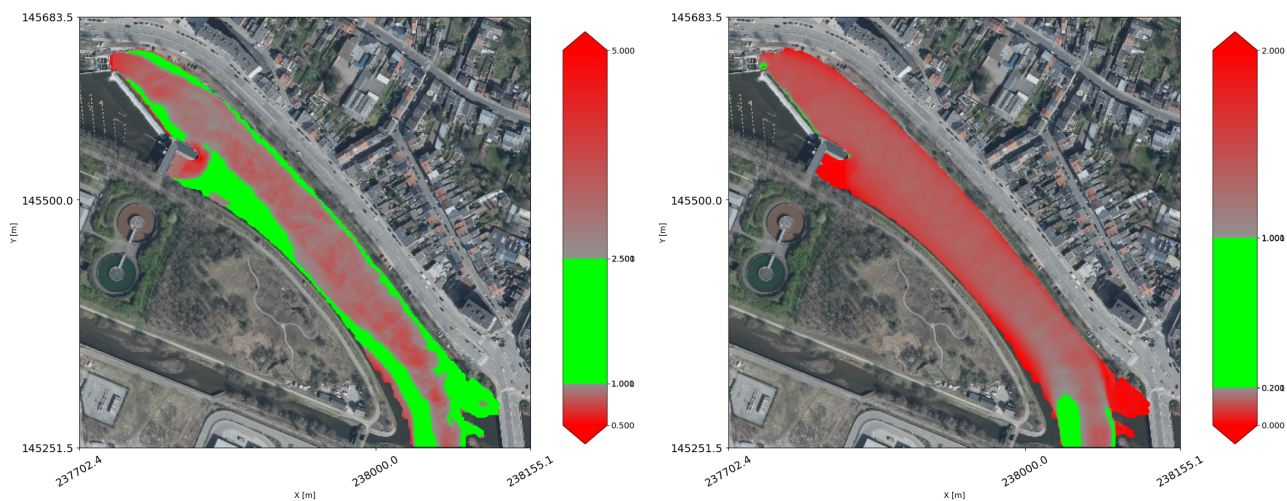


Figure 6.61: Grosses-Battes / h / validité / Figure 6.62: Grosses-Battes / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=22^3/s$

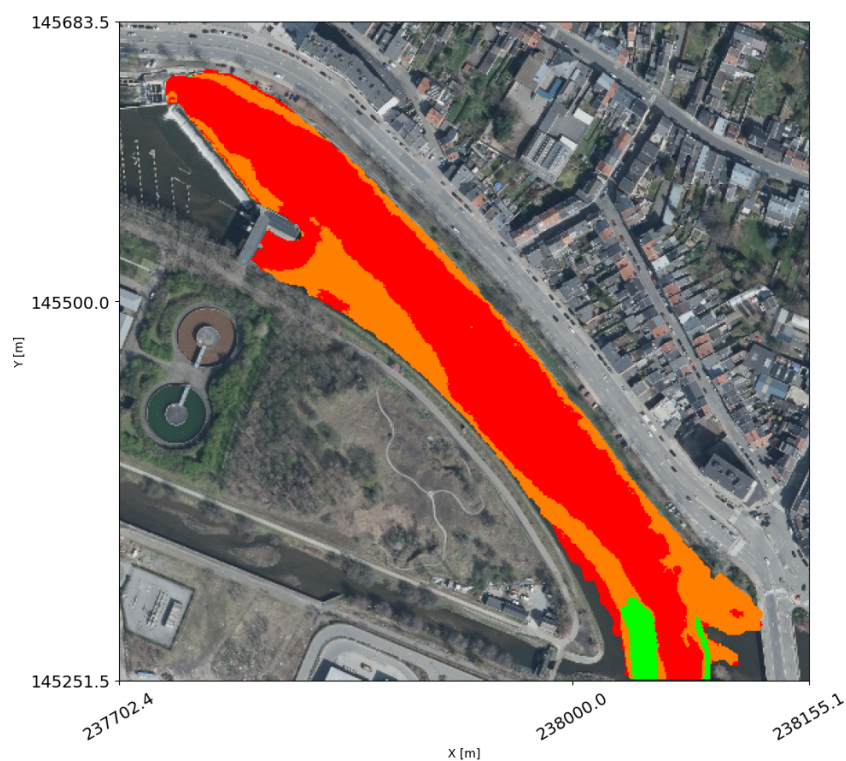


Figure 6.63: Grosses-Battes / superposition des critères hydrauliques / validité / $Q=22^3/s$

- 19,4 m³/s dans l'Ourthe (TABLEAU 6.18):

| Scénario 19,4 m ³ /s à Grosses-Battes [m ³ /s] - OOO | | | | | |
|--|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | Q_{VLH} | $Q_{\text{échancrures sur VLH}}$ | $Q_{\text{PAP rive droite}}$ | $Q_{\text{PAP rive gauche}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ |
| 19,4 | 4,4 | 2 | 1,2 | 2,2 | 9,6 |

Tableau 6.18: Scénario 19,4 m³/s aux Grosses-Battes

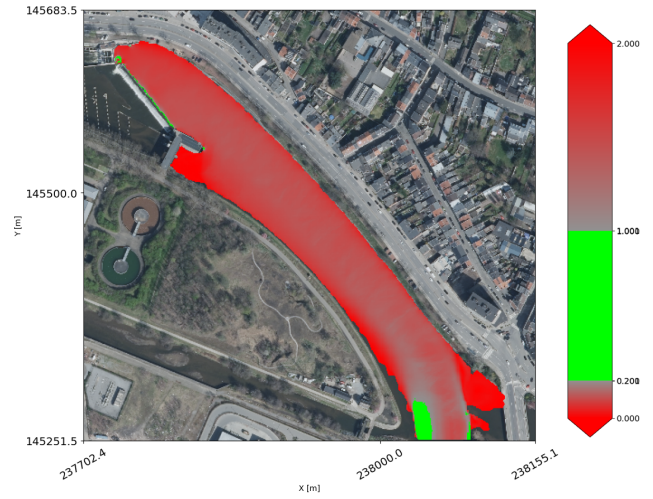
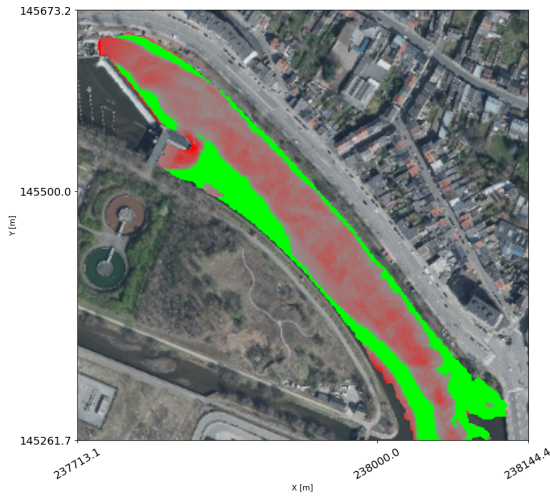


Figure 6.64: Grosses-Battes / h / validité / Figure 6.65: Grosses-Battes / $|\nabla \vec{u}|$ / validité / $Q=19^3/s$



Figure 6.66: Grosses-Battes / superposition des critères hydrauliques / validité / $Q=19^3/s$

Il peut être constaté que la hauteur d'eau est constamment trop importante sur le site des Grosses-Battes pour obtenir un chemin continu d'hauteur d'eau adéquate. En d'autres termes, le déversoir du barrage est trop haut par rapport à la gamme de débit qu'offre l'Ourthe en moyenne aux Grosses-Battes. Il faut arriver à un débit de $34 \text{ m}^3/s$ pour obtenir un chemin continu de l'amont du site vers l'aval qui propose une vitesse du courant adéquate. Ce débit ne correspond qu'à 53,9% sur la courbe des débits classés. L'écoulement a tellement été ralenti que les poissons nagent la plupart du temps dans un bief de cours d'eau qui, par sa vitesse trop lente, les rend désorientés.

Chapitre 7

Modifications à apporter aux sites pour favoriser le franchissement piscicole et optimiser la production hydroélectrique

En explorant les différentes stratégies de gestion et d'ingénierie à mettre en œuvre, ce chapitre met en valeurs l'équilibre recherché entre efficacité énergétique et optimisation des conditions d'écoulement favorisant la dévalaison des smolts de saumon. Cette démarche permettra de mieux comprendre les interactions complexes entre production hydroélectrique et biodiversité, et de proposer des solutions innovantes et durables pour l'avenir.

7.1 Chanxhe

Pour rappel, le facteur limitant le chemin continu réunissant tous les critères hydrauliques favorables pour des débits minimums de la rivière est la vitesse de l'écoulement. La continuité se rompt à partir d'un débit de $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$ et se dégrade de plus en plus pour les débits inférieurs. Pour palier à cette rupture et permettre d'augmenter la franchissabilité du site de Chanxhe tout en gardant la production hydroélectrique constante voire en l'augmentant, une modification légère de la bathymétrie au droit de la centrale et une meilleure gestion du débit réservé à été pensée.

La bathymétrie au droit de la centrale présente actuellement une surface non favorable à la mise en place d'un chemin continu de vitesse adéquate. Initialement, en ce lieu, la topographie remontait graduellement du milieu du lit de la rivière pour rejoindre la berge. Puis, l'installation de la centrale et d'un radier à l'entrée de celle-ci est venue perturber le lit naturel. Donc, actuellement depuis la mise en place de la centrale, un enfoncement nette de la bathymétrie permet aux vis d'Archimède de recueillir leur débit d'eau nécessaire. La FIGURE 7.1 expose la configuration actuelle. La topographie du fond change radicalement de 1 mètre. Cette configuration a pour cause de faire varier brutalement la vitesse de l'écoulement lors de la variation nette de la bathymétrie.

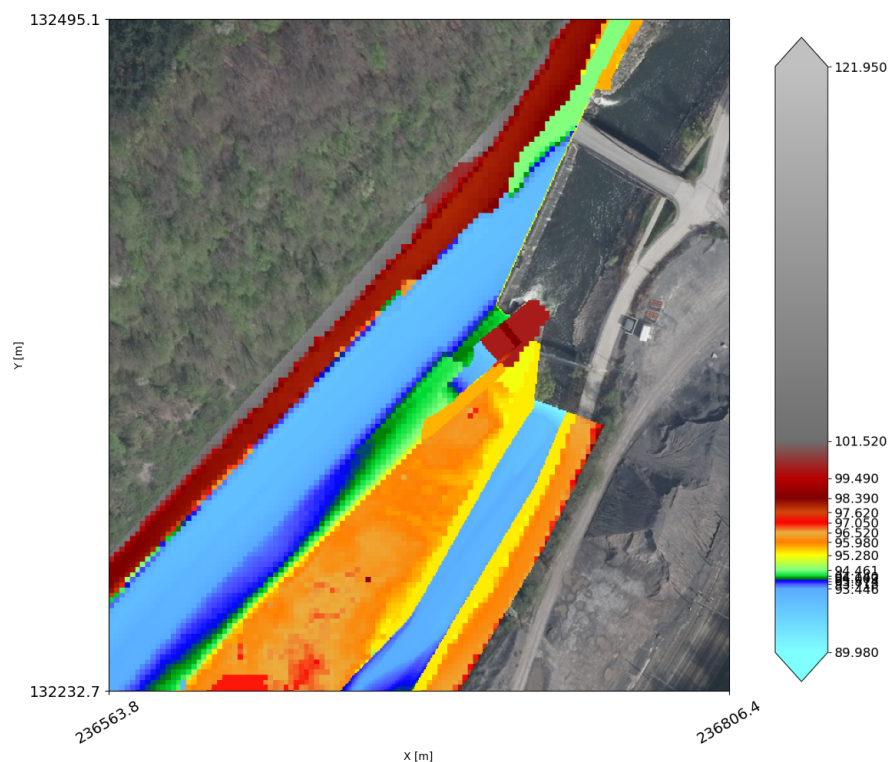


Figure 7.1: Bathymétrie actuelle du site Chanxhe

La solution proposée sur l'aménagement de la bathymétrie en ce lieu est de draguer le fond de manière à obtenir une vitesse qui ne varie plus autant à l'amont de la centrale. Ces terres seraient directement déplacées sur site en rive gauche de manière à créer un flux en direction de la centrale, comme présenté à la FIGURE 7.2:

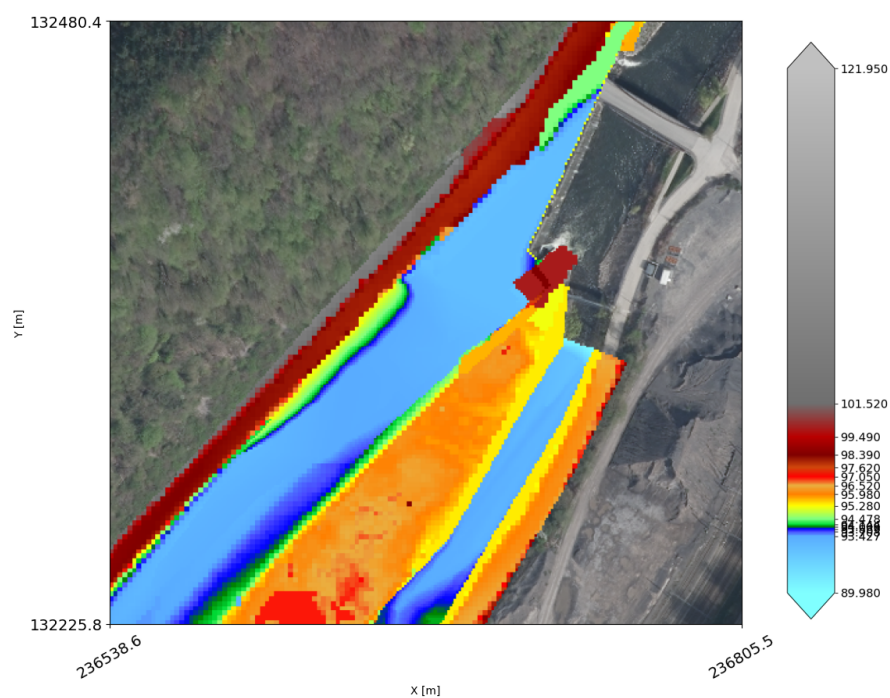


Figure 7.2: Amélioration de la bathymétrie du site de Chanxhe

Cette configuration de la bathymétrie rend l'écoulement propice à proposer un chemin continu de critères hydrauliques favorables sur une gamme de débits plus large (en l'occurrence pour des débits minimums).

De plus, le débit initialement réservé au smolts pour dévaler le barrage a été réétudié. En effet, il s'avère que les débits réservés dans le canal de l'Ourthe et dans l'échancrure à coté du canal amènent des conditions hydrauliques néfastes pour les smolts pour des débits minimums. Pour rappel, $1 \text{ m}^3/\text{s}$ est réservé dans le canal contre $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ dans l'échancrure. En supprimant ces deux paramètres et en fermant l'échancrure en rive gauche, les conditions hydrodynamiques du site offrent un chemin continu favorable à la dévalaison des smolts pour des débits minimums en rive droite, vers les vis d'Archimède et l'échancrure juste à coté.

Le site est actuellement franchissable à 100% pour des débits de l'Ourthe de $18 \text{ m}^3/\text{s}$ et plus. Suite aux améliorations proposées ci-dessus, le débit peut descendre jusqu'à $16 \text{ m}^3/\text{s}$. Le scénario dont les résultats sont présentés ci-après est détaillé dans le TABLEAU 7.1 suivant :

| Scénario $16 \text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe [m^3/s] - FFO | | | | |
|--|------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | $Q_{\text{PAP naturelle}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{canal} |
| 16 | 10 | 5 | 1 | 0 |

Tableau 7.1: Améliorations / Scénario $16 \text{ m}^3/\text{s}$ à Chanxhe

La hauteur d'eau (FIGURE 7.3) ainsi que les zones où celle-ci est dans les bornes favorables (FIGURE 7.4) prennent la forme suivantes:

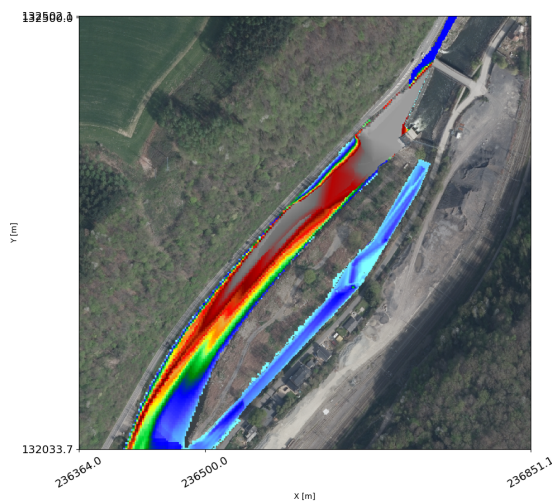


Figure 7.3: Chanxhe / h / $Q=16 \text{ m}^3/\text{s}$

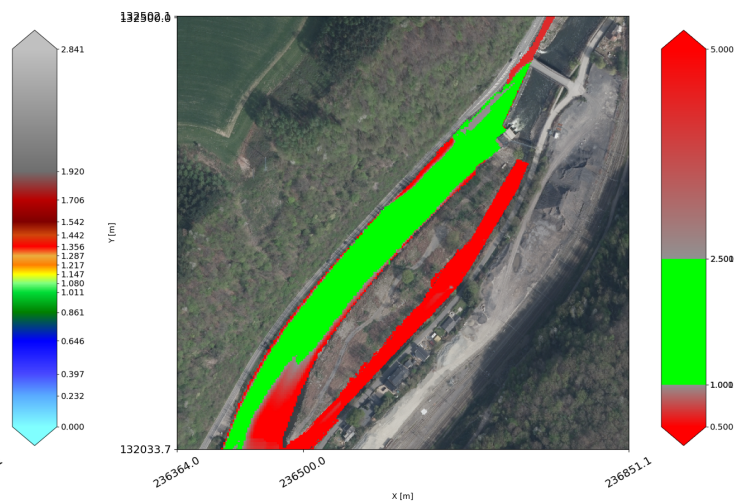


Figure 7.4: Chanxhe / h / validité / $Q=16 \text{ m}^3/\text{s}$

La vitesse de l'écoulement (FIGURE 7.5) et les zones où celle-ci est favorable (FIGURE 7.6) sont disponibles ci-dessous:

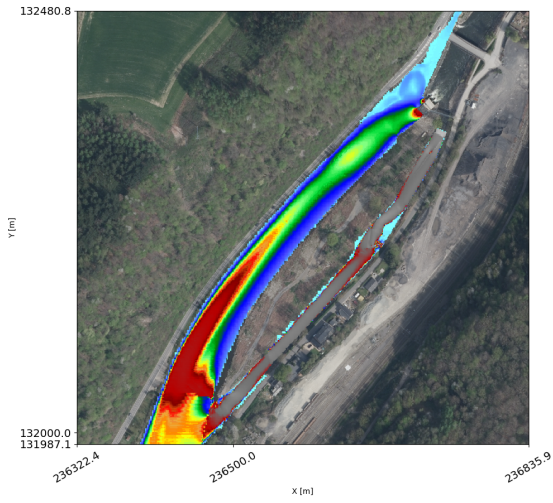


Figure 7.5: Chanxhe / \vec{u} / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$

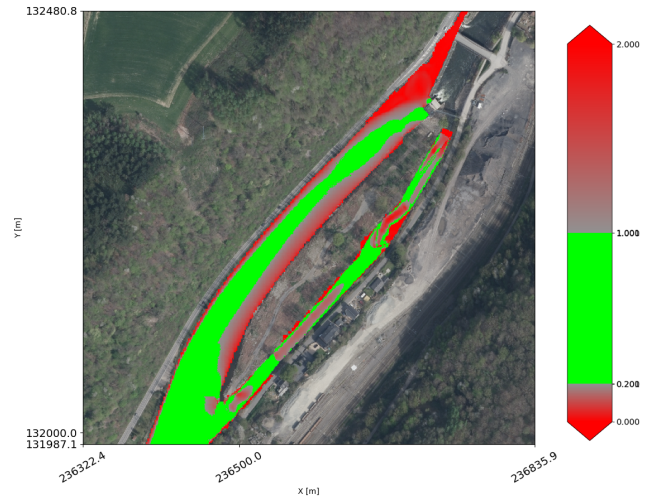


Figure 7.6: Chanxhe / \vec{u} / validité / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$

Enfin, le gradient de la norme de la vitesse (FIGURE 7.7) et les zones où celle-ci est favorable (FIGURE 7.8) sont disponibles ci-dessous:

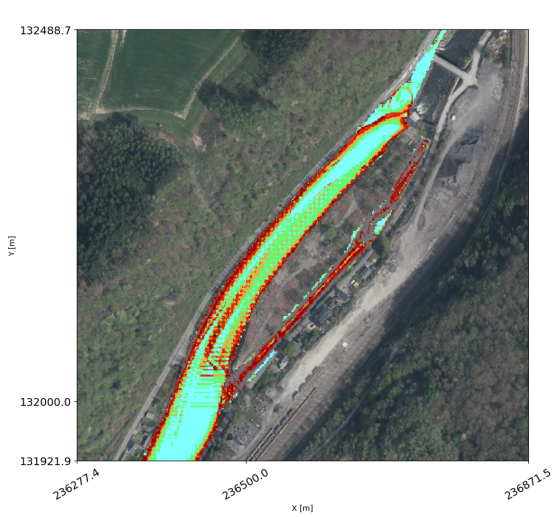


Figure 7.7: Chanxhe / $\nabla\vec{u}$ / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$

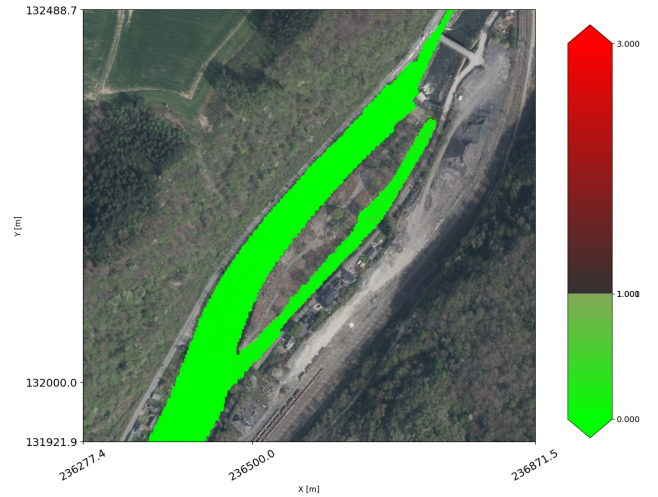


Figure 7.8: Chanxhe / $\nabla\vec{u}$ / validité / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$

Finalement, la carte du site qui superpose la validité de chaque critère peut être formée à partir de la FIGURE 7.4, la FIGURE 7.6 et la FIGURE 7.8 et prend la forme suivante (FIGURE 7.9):



Figure 7.9: Chanxhe / superposition des critères hydrauliques / $Q=16\text{m}^3/\text{s}$

Sur la courbe des débits classés du site de Chanxhe (précédemment exposée à la FIGURE 4.13), le débit de $16\text{ m}^3/\text{s}$ correspond à un pourcentage de 89,1%. Au dessus de $16\text{ m}^3/\text{s}$ dans la rivière, dans cette nouvelle configuration, il y a toujours un chemin continu où toutes les conditions hydrodynamiques satisfont les critères hydrauliques sur le site. Ainsi, le site passe d'un score de 83,9% à 89,1% sur la franchissabilité avec $1,5\text{ m}^3/\text{s}$ de débit réservé gagné pour le turbinage sur les $7\text{ m}^3/\text{s}$ actuellement imposés.

En résumé, une amélioration de la bathymétrie au droit de la centrale ainsi qu'une meilleure gestion du débit réservé à la dévalaison des smolts permettent d'augmenter la franchissabilité du site et la production hydroélectrique. En effet, le débit actuellement réservé au canal et à l'échancrure juste à côté pourrait être turbiné afin de produire d'avantage d'énergie verte et la bathymétrie serait optimisée au droit de la centrale pour favoriser les conditions d'écoulement vers les vis d'Archimède et l'échancrure en rive droite.

7.2 Mery

Sur le site de Méry la plus grande piste exploitable semble être une amélioration de la bathymétrie. En effet, le débit réservé non turbinable n'est restreint qu'à $1\text{ m}^3/\text{s}$ pour la passe à poisson et $0,15\text{m}^3/\text{s}$ dans le by-pass à côté de la turbine Kaplan en service. Ces débits réservés non turbinables ne sont pas remis en cause par cette étude. En revanche, la bathymétrie peut être améliorée pour permettre d'offrir un chemin continu de zones favorables du point de vue des conditions hydrauliques pour des débits inférieurs à $60\text{m}^3/\text{s}$. Car dans l'état actuel, le site est dit franchissable à 29% à cause du manque de conditions hydrauliques favorables pour des débits inférieurs à $60\text{ m}^3/\text{s}$. La bathymétrie initiale est présentée à la FIGURE 7.10. L'état de la rive droite a été étudié pour permettre aux smolts de trouver une voie de passage plus

uniforme afin de leur proposer de dévaler en rive droite et d'éviter de se diriger vers la turbine Kaplan. La FIGURE 7.11 montre les améliorations de la topographie du fond de l'ourthe qui ont été pensées, à savoir l'uniformisation de la rive droite et le nivellement de l'enfoncement au droit de la vis d'Archimède (lieu où les smolts ont tendance à bifurquer) :

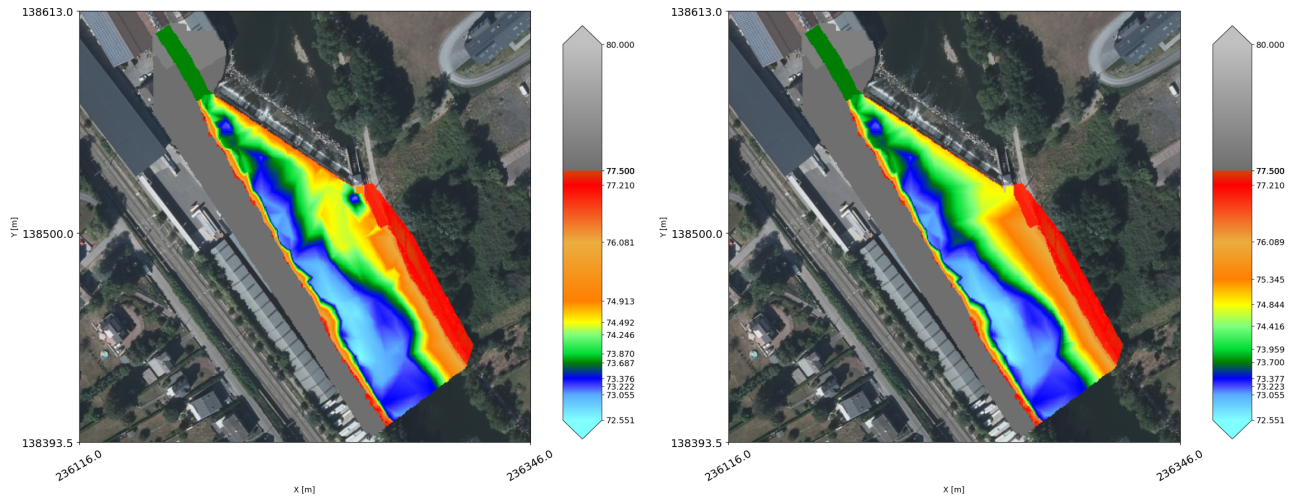


Figure 7.10: Bathymétrie actuelle du site de Figure 7.11: Amélioration de la bathymétrie du Méry site de Méry

Bien que les débits réservés du site soient optimisés pour la production hydroélectrique et qu'aucun avantage n'est apporté concernant la production d'énergie verte sur ce site, cette révision de la bathymétrie permet au site de devenir à 100% franchissable pour des débits de $19 \text{ m}^3/\text{s}$ et supérieurs. La nette amélioration des conditions d'écoulement permet au site d'améliorer son score de franchissabilité de 29% à 92,4%. En effet, il y a au moins un débit de $19 \text{ m}^3/\text{s}$ pour 92,4% du temps sur le site comme le stipule la courbe des débits classés du site de Méry à la FIGURE 4.14.

Le scénario dont les résultats sont présentés ci-après est détaillé dans le TABLEAU 7.2 suivant :

| Scénario $19 \text{ m}^3/\text{s}$ à Méry [m^3/s] - OFFO | | | | | |
|--|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | $Q_{\text{vis d'Archimède}}$ | Q_{Kaplan} | $Q_{\text{déversoir}}$ | Q_{PAP} | $Q_{\text{By-pass}}$ |
| 19 | 7,5 | 6 | 4,35 | 1 | 0,15 |

Tableau 7.2: Améliorations / Scénario $19 \text{ m}^3/\text{s}$ à Méry

La hauteur d'eau (FIGURE 7.12) ainsi que les zones où celle-ci est dans les bornes favorables (FIGURE 7.13) prennent la forme suivante :

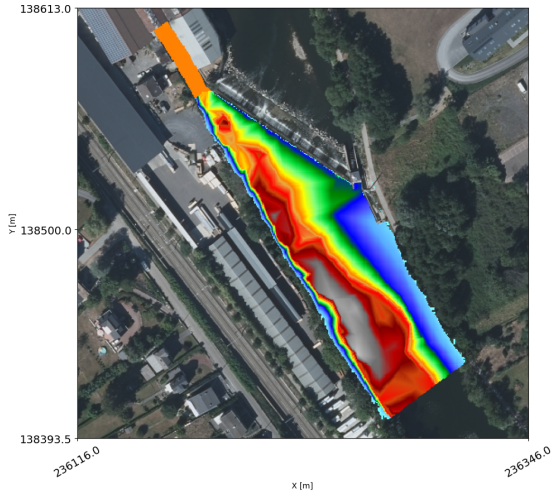


Figure 7.12: Méry / h / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$

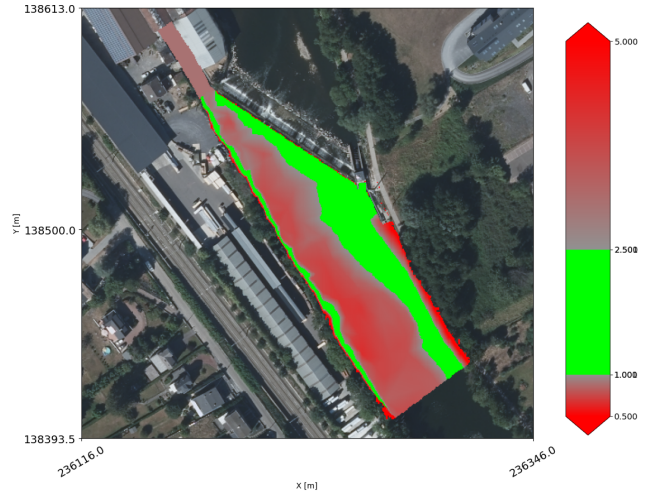


Figure 7.13: Méry / h / validité / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$

La vitesse de l'écoulement (FIGURE 7.14) et les zones où celle-ci est favorable (FIGURE 7.15) sont disponibles ci-dessous:

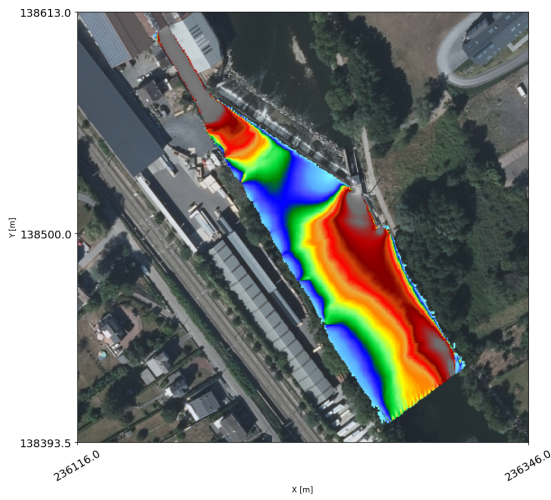


Figure 7.14: Méry / \vec{u} / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$

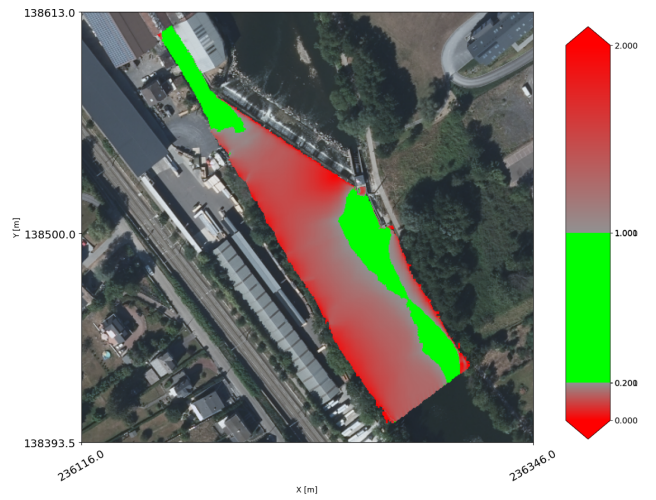


Figure 7.15: Méry / \vec{u} / validité / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$

Enfin, le gradient de la norme de la vitesse (FIGURE 7.16) et les zones où celle-ci est favorable (FIGURE 7.17) sont disponibles ci-dessous:

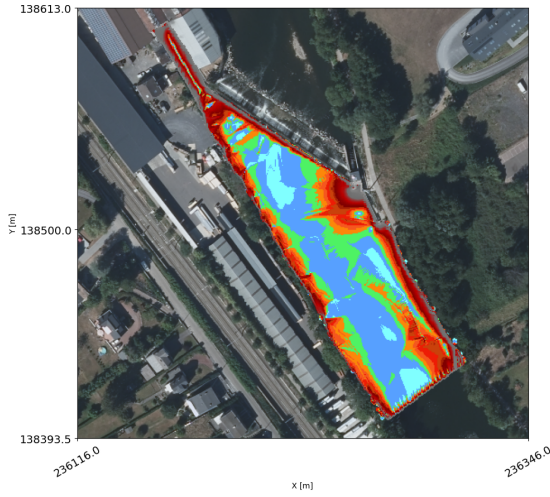


Figure 7.16: Méry / $\nabla \vec{u}$ / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$

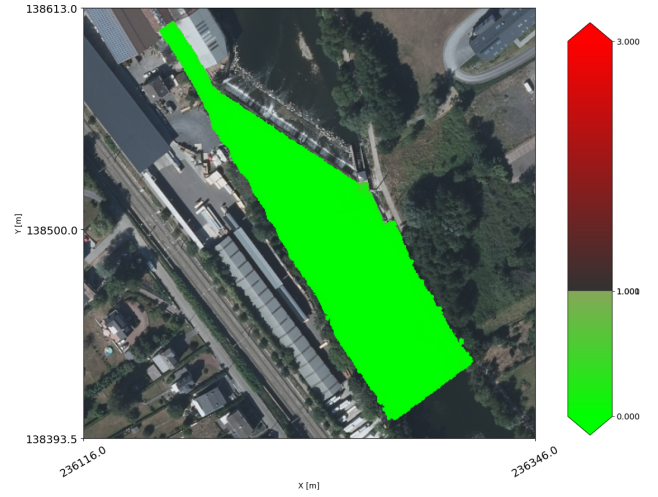


Figure 7.17: Méry / $\nabla \vec{u}$ / validité / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$

Finalement, la carte du site qui superpose la validité de chaque critère peut être formée à partir de la FIGURE 7.13, la FIGURE 7.15 et la FIGURE 7.17 et prend la forme suivante (FIGURE 7.18):

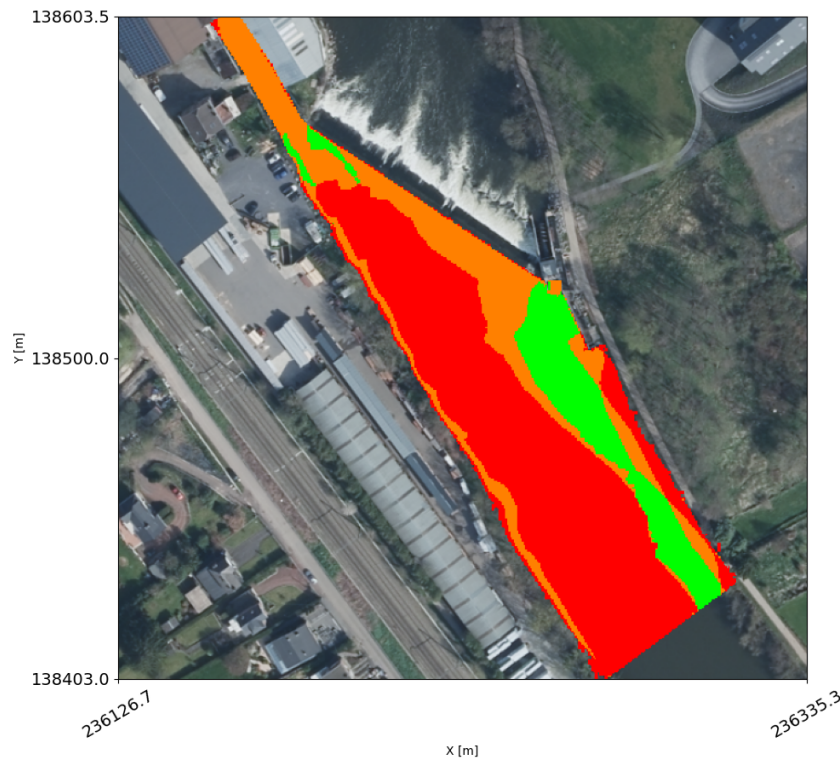


Figure 7.18: Méry / superposition des critères hydrauliques / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$

7.3 Grosses-Battes

Aux Grosses-Battes, il serait impossible de mener le site à des conditions hydrauliques qui le rendrait 100% franchissable sans remblayer tout le site ou abaisser le barrage. Ces solutions peu envisageables sortent du cadre de cette étude. C'est pourquoi cette section s'attarde sur la

création de zones regroupant les conditions hydrodynamiques favorables et sur l'optimisation des débits réservés à la dévalaison des smolts pour maximiser la production hydroélectrique.

Il s'avère qu'une meilleure distribution du débit réservé suffit pour drastiquement améliorer les conditions hydrauliques sur l'aval du site et permettre de turbiner plus de débit. Pour rappel, actuellement, le site est configuré avec un débit réservé de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la dévalaison des poissons migrateurs dont $7,7 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le déversoir. Ce débit n'est pas justifié par cette étude tant aucun lien de causalité ne lie cette configuration à des conditions hydrodynamiques favorables pour la dévalaison des smolts. En revanche, lorsque ce débit déversé est réduit à néant au profit des turbines de la centrale, une zone conséquente qui regroupe un gamme de vitesse d'écoulement favorable apparaît au droit de la centrale pour des débits moindres que dans la situation actuelle. De ce fait, les deux problématiques sont améliorées par cette même rectification du débit réservé. De plus, les turbines VLH, les échancrures sur chacune d'elles et les échancrures sur le déversoir juste à coté de la centrale offrent toutes des voies de passages saines et différentes pour la dévalaison des smolts.

Puisqu'il serait impossible de procurer aux smolts des zones où la hauteur d'eau est en dessous du seuil maximum du critère favorable, c'est la vitesse de l'écoulement qui est ciblée pour convenir aux poissons migrateurs. Le gradient de hauteur d'eau est constamment validé comme dans toutes les simulations d'écoulement des trois sites de cette étude.

Les débits réservés proposés sont les suivants :

- Sur le déversoir : aucun débit réservé;
- Sur les deux échancrures au droit de la centrale, sur la partie du déversoir parallèle à l'axe de l'écoulement : aucun débit réservé et les fermer pour cause d'inutilité;
- Sur l'échancrure de la partie du déversoir en diagonale de l'axe de l'écoulement : aucun débit réservé et la laisser ouverte pour amener une autre voie de passage que la centrale quand le débit le permet;
- Sur les échancrures au-dessus de chaque VLH : $1 \text{ m}^3/\text{s}$ sur chaque turbine (inchangé);

Le débit minimum pour lequel un chemin continu de vitesse favorable serait proposé aux smolts passe de $34 \text{ m}^3/\text{s}$ à $33 \text{ m}^3/\text{s}$ comme le montre la FIGURE 7.20 (le gradient de vitesse est encore et toujours respecté). Le scénario du résultat à la FIGURE 7.20 ci-après est détaillé dans le TABLEAU 7.3 suivant :

| Scénario $33 \text{ m}^3/\text{s}$ à Grosses-Battes [m^3/s] - OFF | | | | | |
|---|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | Q_{VLH} | $Q_{\text{échancrures sur VLH}}$ | $Q_{\text{PAP rive droite}}$ | $Q_{\text{PAP rive gauche}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ |
| 33 | 27,6 | 2 | 1,2 | 2,2 | 0 |

Tableau 7.3: Améliorations / Scénario $33 \text{ m}^3/\text{s}$ aux Grosses-Battes

La FIGURE 7.19 permet de la comparaison avant et après améliorations :

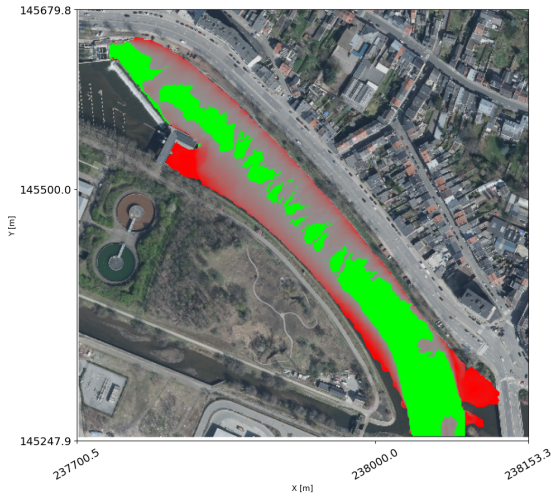
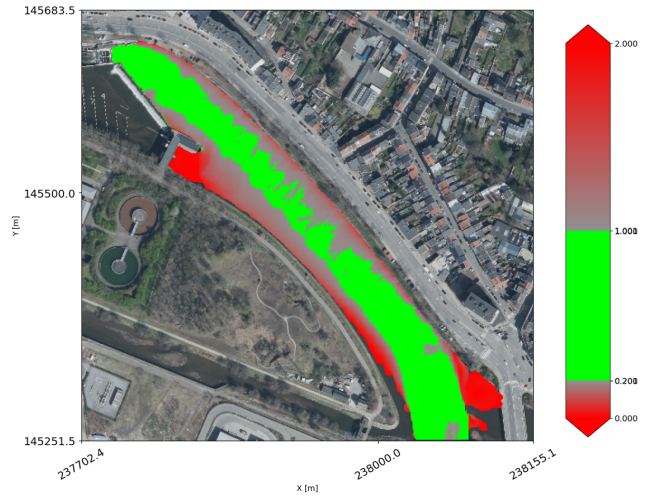


Figure 7.19: Grosses-Battes / \vec{u} / validité / Figure 7.20: Grosses-Battes / \vec{u} / validité /
 $Q=33\text{m}^3/\text{s}$ / actuellement $Q=33\text{m}^3/\text{s}$ / amélioré



Bien que les améliorations de la gestion des débits réservés permettent d'obtenir une vitesse adéquate sur tout le site pour un débit inférieur de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, ce gain est secondaire. Les réels impacts positifs que cette nouvelle répartition des débits apportent sont une zone de vitesse favorable au droit de la centrale et ce, même pour des débit jusqu'à $19,4 \text{ m}^3/\text{s}$ et un gain de débit à turbiner. Le débit réservé passe de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ initialement à $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$ dans cette configuration améliorée. C'est donc $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$ de plus qui pourront être turbinés par débits minimums de l'Ourthe. Le scénario du résultat à la FIGURE 7.22 ci-après est détaillé dans le TABLEAU 7.4 suivant :

| Scénario $19 \text{ m}^3/\text{s}$ à Grosses-Battes $[\text{m}^3/\text{s}]$ - OFF | | | | | |
|---|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| $Q_{\text{rivière}}$ | Q_{VLH} | $Q_{\text{échancrures sur VLH}}$ | $Q_{\text{PAP rive droite}}$ | $Q_{\text{PAP rive gauche}}$ | $Q_{\text{déversoir}}$ |
| 19 | 13,6 | 2 | 1,2 | 2,2 | 0 |

Tableau 7.4: Améliorations / Scénario $19 \text{ m}^3/\text{s}$ aux Grosses-Battes

Le comparatif du site avant et après améliorations pour un débit de $19,4 \text{ m}^3/\text{s}$ en terme de vitesse d'écoulement peut se faire entre la FIGURE 7.21 et la FIGURE 7.22 :

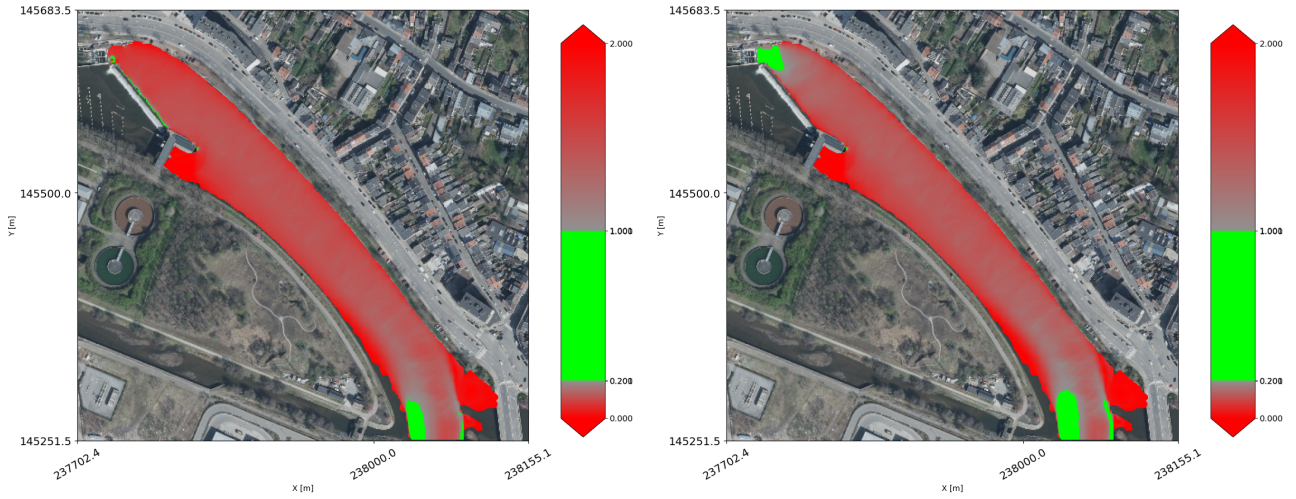


Figure 7.21: Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ / actuellement

Figure 7.22: Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=19\text{m}^3/\text{s}$ / amélioré

En outre, le fait que les débits réservés soient mieux répartis, non seulement les conditions d'écoulement deviennent plus favorables pour que les smolts dévalent sur le site en rive droite et la production hydroélectrique est augmentée mais aussi le débit minimum en dessous duquel le site devient infranchissable est fortement réduit. Actuellement, comme justifié au chapitre 4, le site devient infranchissable par les turbines en dessous de $19,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Donc, actuellement, 14% du temps (comme le montre la courbe des débit classé du site des Grosses-Battes à la FIGURE 4.15), les turbines sont à l'arrêt pour cause de débit trop faible dans l'Ourthe ($<19,4 \text{ m}^3/\text{s}$). Or, suite à la nouvelle gestion des débits réservés que propose cette étude, les turbines seraient en fonctionnement continu jusqu'à atteindre un débit inférieur à $9,8 \text{ m}^3/\text{s}$ en amont du site. Le site ne devient infranchissable que 0,5% du temps.

Enfin, au fur et à mesure que les débits augmentent, la zone de vitesse favorable s'agrandit. L'évolution entre la FIGURE 7.22 et la FIGURE 7.20 est disponible ci-joint à la FIGURE 7.23 et à la FIGURE 7.24 pour deux débits intermédiaires de l'Ourthe :

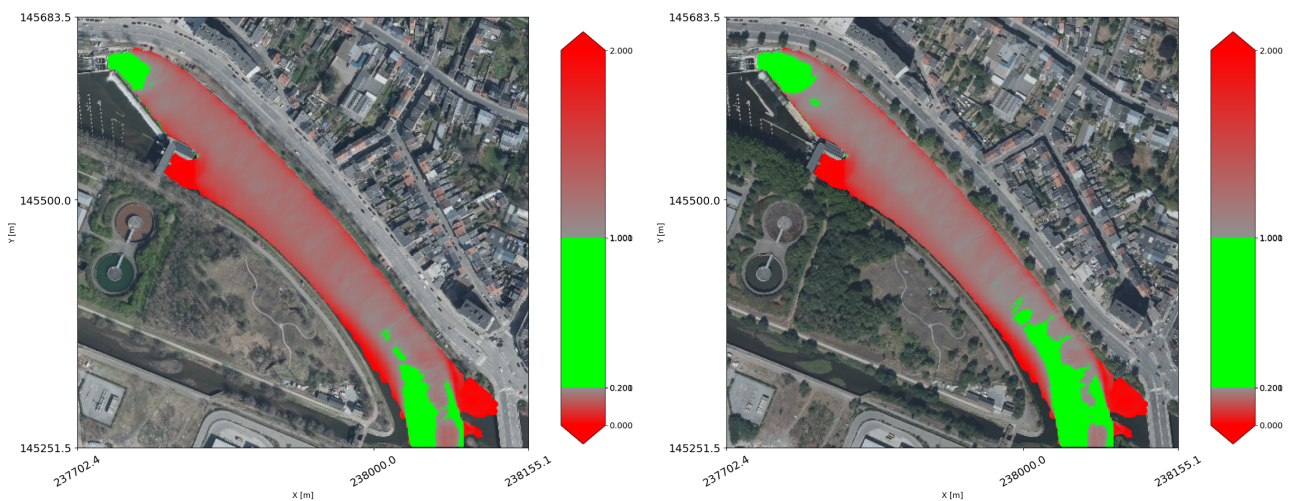


Figure 7.23: Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=25\text{m}^3/\text{s}$ / amélioré

Figure 7.24: Grosses-Battes / \vec{u} / validité / $Q=28\text{m}^3/\text{s}$ / amélioré

Les scénarios des résultats de ces deux figures sont respectivement présentés dans le TABLEAU 7.5 et le TABLEAU 7.6 suivant:

| Scénario 25 m ³ /s à Grosses-Battes [m ³ /s] - OFF | | | | | |
|--|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Q _{rivière} | Q _{VLH} | Q _{échancrures sur VLH} | Q _{PAP rive droite} | Q _{PAP rive gauche} | Q _{déversoir} |
| 25 | 19,6 | 2 | 1,2 | 2,2 | 0 |

Tableau 7.5: Améliorations / Scénario 25 m³/s aux Grosses-Battes

| Scénario 28 m ³ /s à Grosses-Battes [m ³ /s] - OFF | | | | | |
|--|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Q _{rivière} | Q _{VLH} | Q _{échancrures sur VLH} | Q _{PAP rive droite} | Q _{PAP rive gauche} | Q _{déversoir} |
| 28 | 22,6 | 2 | 1,2 | 2,2 | 0 |

Tableau 7.6: Améliorations / Scénario 28 m³/s aux Grosses-Battes

Chapitre 8

Discussion

8.1 Comparaison des sites entre eux

Les trois sites, bien que très différents dans la manière dont ils sont agencés et dans les différents ouvrages implantés, il y a des similitudes quant aux améliorations pouvant être apportées aux sites pour favoriser les conditions d'écoulement favorables à la dévalaison des smolts de saumon et maximiser la production hydroélectrique.

Premièrement, la cote des ouvrages de dévalaison comme les déversoirs, les échancrures et les turbines doit être déterminée en fonction de la bathymétrie du site. Cette étude démontre l'importance de ne pas trop ralentir l'écoulement avec des ouvrages trop hauts. Avoir une crête de déversoir plus haute permet d'augmenter la hauteur de chute des turbines, mais l'écoulement peut être tellement ralenti que les poissons ne trouvent pas des conditions hydrodynamiques favorables. Ils sont désorientés, finissent par emprunter une voie de passage néfaste pour leur survie (par exemple, en passant dans une turbine Kaplan) ou pour leur timing de dévalaison (par exemple, en passant dans un canal de dérivation à faible débit). Donc, les exploitants des turbines sont tenus de respecter des débits réservés pour la dévalaison des smolts important, trop peu justifiés et, qui plus est, inefficaces. En outre, inutile de multiplier les voies de passage pour la dévalaison des smolts. Une voie de passage bien configurée semble plus efficace que plusieurs voies de passages mal organisées. Suite à une mission de dragage où la bathymétrie est uniformisée à des endroits propices pour proposer une voie de passage continue de zones où les conditions hydrauliques sont favorables à la dévalaison des smolts, la franchissabilité d'un site semble pouvoir être fortement améliorée.

Deuxièmement, la gestion des débits réservés n'est pas optimisée sur chaque site. A travers le chapitre 7, cette étude a objectivé une proposition différente de la répartition des débits réservés pour deux des trois sites étudiés. Le manque à gagner le plus gros est actuellement aux grosses-battes où, en voulant proposer aux smolts de saumon une voie de passage sur tout le long du déversoir avec un débit réservé spécialement dédié, aucune zone de conditions hydrodynamiques favorable n'est proposée aux smolts. Alors qu'en se focalisant sur une voie de passage, des conditions hydrodynamiques favorables sont créées et le site peut se permettre de gagner du débit turbinable pour la production hydroélectrique. A Méry le débit réservé non

turbinaire est déjà minimisé. A Chanxhe, une meilleure gestion des débits réservés accompagnée d'une amélioration de la bathymétrie apporte un gain de production ainsi que des meilleures conditions hydrauliques. Le TABLEAU 8.1 expose un comparatif des différentes améliorations apportées à chaque site et le TABLEAU 8.2 divulgue la plus-value ajoutée à chaque site suite à ces améliorations, tant au niveau de la franchissabilité que de la production hydroélectrique.

| Améliorations | | | |
|----------------|----------------------------------|--|--|
| | Bathymétrie | Echancrures | Q _{réserve} |
| Chanxhe | Dragage à l'amont de la centrale | Fermer celle au centre et en rive gauche | Suppression du débit réservé dans le canal et sur l'échancrure rive gauche |
| Méry | Dragage en rive droite | Fermeture des deux échancrures au centre du déversoir | Inchangé |
| Grosses-Battes | Inchangé | Fermeture des deux échancrures au droit de la centrale | Suppression du débit réservé sur le déversoir et les sur échancrures fermées |

Tableau 8.1: Comparatif des améliorations apportées sur chaque sites

| Plus-value | | | |
|----------------|-----------------------|---|------------------------------------|
| | Franchissabilité | | Production hydroélectrique |
| | Avant | Après | |
| Chanxhe | 83,9% franchissable | 89,1% franchissable | Gain de 21,4% sur le débit réservé |
| Méry | 29% franchissable | 92,4% franchissable | Inchangée |
| Grosses-Battes | Aucune zone favorable | Zone de vitesse favorable au droit de la centrale pour tout débit | Gain de 64% sur le débit réservé |

Tableau 8.2: Comparatif de la plus-value apportée sur chaque sites

Pour répondre à la double problématique de ce projet, les trois sites présentent des plus-values bien distinctes. A Chanxhe, la franchissabilité du site et la production hydroélectrique peuvent toutes les deux légèrement évoluer. A Méry, la production d'énergie est optimisée mais un grand gain sur la franchissabilité peut être apporté au site. A l'inverse, le site des Grosses-Battes possède un gros potentiel d'augmentation de production d'hydroélectricité et une franchissabilité plus compliquée à faire évoluer sur la globalité du site.

8.2 Robustesse du modèle utilisé

Cette section à pour but de critiquer le modèle utilisé lors de cette étude. Ainsi, les tracés des smolts du chapitre 5 vont être superposés à la carte mettant en valeur les zones avec le plus de critères rencontrés. L'efficacité de celles-ci pourra éventuellement être remise en doute.

Sur la FIGURE 8.1 suivante, on peut voir un smolt qui dévale le site de Chanxhe par l'échancrure en rive gauche. Dans cette configuration, le poisson n'avait aucun chemin continu de zone totalement favorable du point de vu des conditions hydrauliques. Seuls deux des trois critères hydrauliques étaient respectés, vu la couleur orange en fond sur son chemin. Il est constamment resté dans une zone orange à part quand il a testé le canal avant de rejeter cette voie de passage. Il peut être constaté que son demi-tour s'est fait en pénétrant dans la zone rouge.

La FIGURE 8.2 montre le tracé d'un smolt qui dévale le site par une vis d'Archimède. Aussi, tout le trajet du poisson se fait dans une zone verte (hormis à l'entrée de la centrale où un radier est implanté trop bas par rapport à la crête du déversoir pour satisfaire le seuil maximum de hauteur d'eau). Ceci montre à quel point les conditions hydrauliques influencent le trajet du smolt. Le poisson dévalant dans une zone verte continue bute à deux reprises contre une zone orange et rebroussement immédiatement chemin pour rester en zone verte. Aussi, Ce constat montre que lorsque le smolt est face à un chemin continu de zones à conditions hydrauliques adéquates, il emprunte ce chemin. De plus, le fait de mettre en oeuvre des conditions hydrauliques favorables de manière continue vers la rive droite protège les smolts d'être amenés tout près du canal et de s'y perdre.

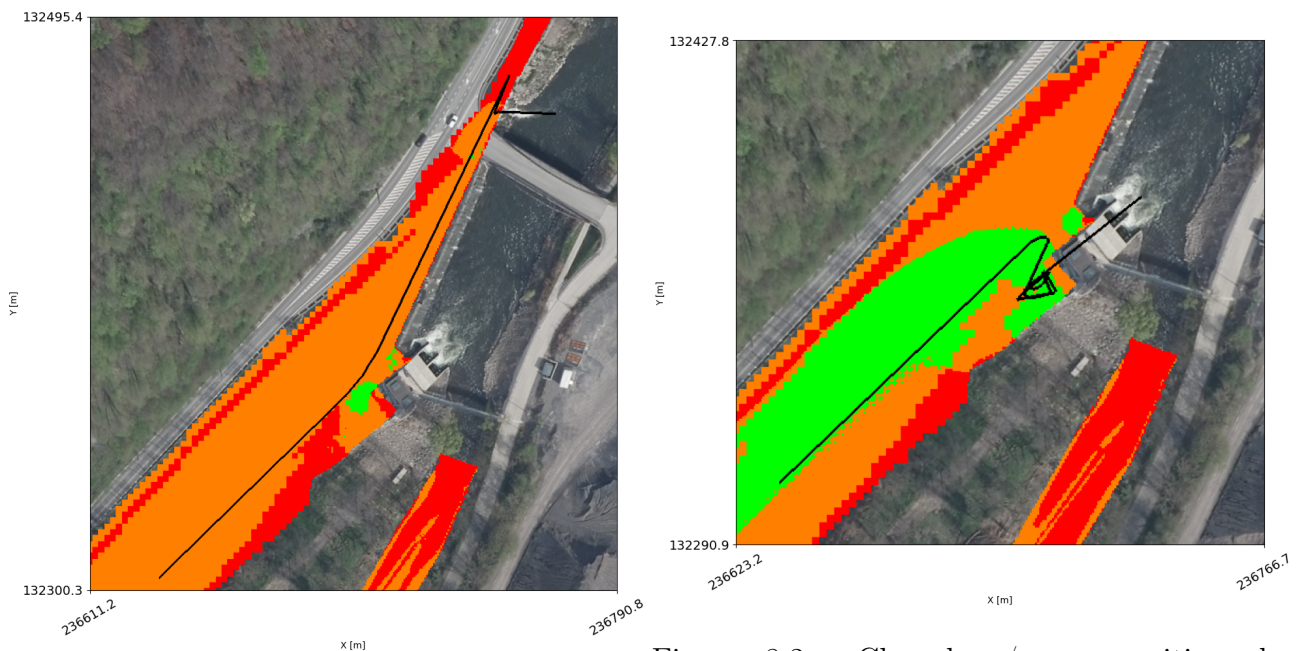


Figure 8.1: Chanxhe / superposition des critères hydrauliques et d'un tracé de smolt / $Q=12\text{m}^3/\text{s}$

Figure 8.2: Chanxhe / superposition des critères hydrauliques et d'un tracé de smolt / $Q=20\text{m}^3/\text{s}$

Les FIGURES 8.3 et 8.4 ci-dessous montrent le même comportement pour deux configurations

différentes. Les deux smolts dévalent tous les deux via la rive droite avant de buter contre la zone au droit de la vis et de l'échancrure rive droite pour rejoindre le canal d'admission à la turbine Kaplan. Le fait qu'ils arrivent via la rive droite met de nouveaux en avant l'importance des conditions hydrauliques favorables à la dévalaison des smolts de saumon. En effet, c'est à chaque fois la zone réunissant le plus de conditions hydrauliques adéquates. Pour chacun des smolts, la rencontre d'une zone non favorable le fait dévier directement (ou en deux temps) le long du déversoir vers la turbine Kaplan. C'est pourquoi, des solutions ont été proposées pour optimiser une dévalaison des smolts en rive droite puis en empruntant la vis d'Archimède ou l'échancrure qui la borde. Et, c'est en créant une zone réunissant toutes les conditions hydrauliques favorables (zone verte sur la carte) en ce lieu qu'une optimisation a été proposée.

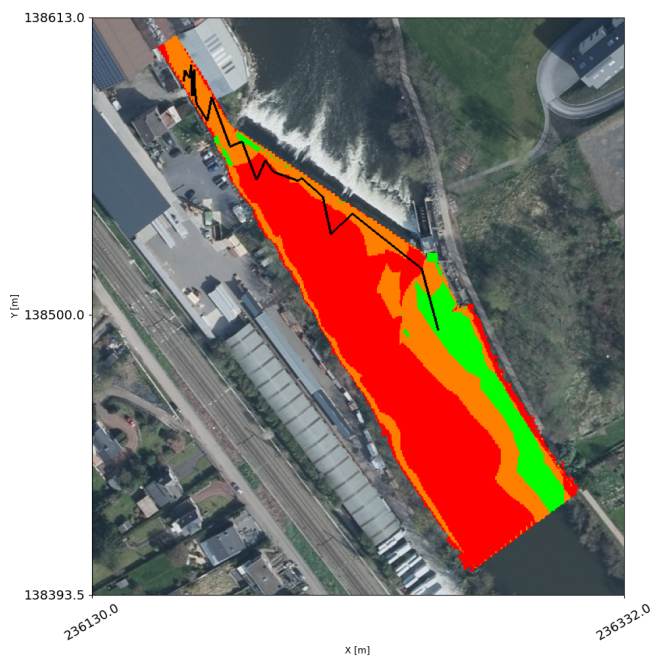


Figure 8.3: Méry / superposition des critères hydrauliques et d'un tracé de smolt / $Q=27,5\text{m}^3/\text{s}$

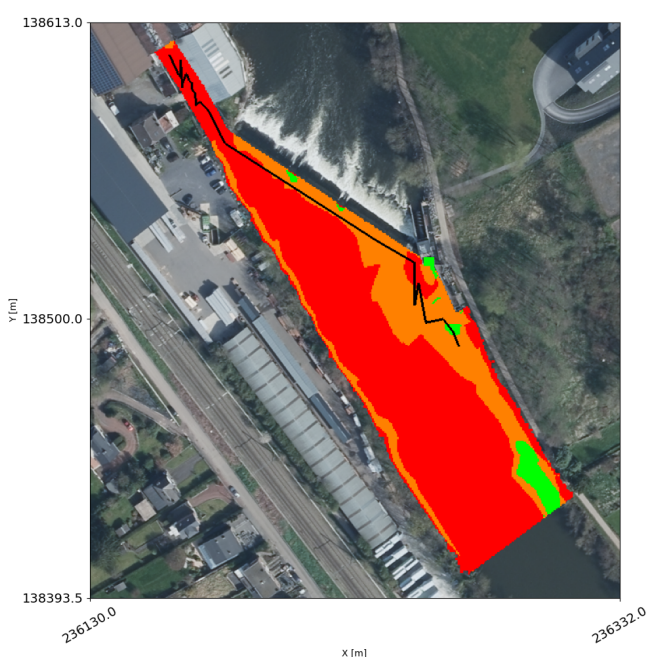


Figure 8.4: Méry / superposition des critères hydrauliques et d'un tracé de smolt / $Q=18,4\text{m}^3/\text{s}$

Bien que seulement quatre tracés de smolts aient été présentés pour attester de la robustesse du modèle ou non, la plupart des smolts ont eu les mêmes comportements que ceux présentés. C'est donc objectivement que l'approche qui a été utilisée pour qualifier et quantifier la franchissabilité d'un site peut-être utilisée avec sérénité.

Chapitre 9

Conclusion

9.1 Rappel des objectifs

L'objectif principal de ce rapport était d'optimiser la gestion des sites hydroélectriques de Chanxhe, Méry, et Grosses-Battes afin d'améliorer la dévalaison des smolts de saumon tout en maximisant la production hydroélectrique. Les objectifs spécifiques comprenaient :

1. Analyser les conditions hydrauliques actuelles des sites;
2. Identifier les obstacles à la dévalaison des smolts;
3. Proposer des modifications pour améliorer la dévalaison piscicole et la production hydroélectrique.

9.2 Synthèse de l'étude réalisée et rappel des résultats

Tout d'abord, le rapport de ce mémoire présente le contexte de l'étude, la problématique de la dévalaison des smolts de saumon et l'importance de concilier la production hydroélectrique avec la préservation de la biodiversité.

Ensuite, une revue de la littérature complète sur le sujet a été détaillée afin de mieux comprendre le contexte dans lequel a été mené ce projet. Plus précisément, les différents paramètres clés de cette étude ont été présentés, tels que :

- L'influence anthropique sur la dévalaison des poissons migrateurs;
- Les différents facteurs impactant la dévalaison des smolts;
- La production hydroélectrique.

Puis, les sites spécialement étudiés dans ce projet ont été présentés afin de connaître leur configuration, les paramètres d'utilisation des sites. De cette manière, le lecteur comprend aisément le contexte fluviale autour duquel l'étude se déroule. Aussi, pour les sites de Chanxhe et Méry, une synthèse des études qui y ont été réalisées est présentée.

Par la suite, la méthodologie adoptée pour l'analyse hydraulique et écologique est décrite en détail. Les techniques de modélisation, les outils de simulation utilisés, et les méthodes de collecte des données sur le terrain sont exposés.

Après, un chapitre entier a été dédié à la critique des critères hydrauliques établis sur base de la revue de la littérature. C'est sur base de tracés correspondant à des suivis de smolts via radio télémétrie que, via une analyse quantitative, les critères hydrauliques de la littératures ont pu être confirmés de manière objective.

Postérieurement, un chapitre présente les résultats des analyses des conditions hydrauliques actuelles des trois sites. Les principales zones favorables pour le passage des smolts et les obstacles identifiés sont détaillés, montrant les défis posés par la configuration actuelle de chaque site. Un chiffre sur la franchissabilité de chaque site a été objectivé. Actuellement, durant la période de dévalaison des smolts de saumon (de mi-mars à mi-mai) :

- Le site de Chanxhe est franchissable à 83,9%;
- Le site de Méry est franchissable à 29%;
- Le site des Grosses-Battes ne proposent aucune zone réunissant toutes les conditions hydrauliques favorables.

Subséquemment, des améliorations sont proposées pour améliorer la double problématique dont il est sujet tout au long de ce projet.

- Une modification légère de la bathymétrie dans une zone stratégique peut considérablement faire évoluer les conditions hydrauliques d'un site. A Méry et à Chanxhe, une proposition de dragage est établie. Ni excavation, ni remblais ne serait à prévoir. Les terres seraient directement déplacées sur site.
- Une utilisation des échancrures plus efficace est proposée à chaque site. Le fait de réduire le nombre d'échancrure de façon stratégique améliore les conditions hydrauliques pour des faibles débits dans la rivière. Pour chaque site, la proposition d'amélioration prévoit la fermeture de deux échancrures.
- Le débit réservé non turbinable a été revu à la baisse pour les sites de Chanxhe et des Grosses-Battes (le site de Méry étant déjà optimisé à ce niveau). En effet, il a été objectivé que la suppression de certains débits réservés permettrait à la fois de créer des zones de conditions hydrauliques plus favorables et d'augmenter la production hydroélectrique (lors des débits de rivière minimums).

Les ajustements détaillés dans le TABLEAU 8.1 ont conduit à une augmentation notable des deux objectifs. La plus-value proposée est la suivante :

- Chanxhe : La franchissabilité du site passe à 89,1% et un gain sur le débit réservé 21,4% est à prévoir;

- Méry : La franchissabilité du site passe à 92,4% et aucun gain sur le débit réservé n'est à prévoir;
- Grosse-Battes : Une zone de vitesse favorable au droit de la centrale pour tout débit et un gain de 64% sur le débit réservé.

9.3 Enseignements tirés des résultats

Les résultats obtenus démontrent la faisabilité et l'efficacité des solutions proposées:

1. Amélioration des conditions hydrauliques : les modifications proposées ont conduit à des améliorations significatives des conditions de dévalaison des smolts. Les chemins hydrauliques créés par les ajustements bathymétriques et de gestion des débits ont permis une augmentation notable de la franchissabilité;
2. Optimisation énergétique : en réallouant les débits réservés non turbinables et en ajustant les configurations des sites, il a été possible d'augmenter la production hydroélectrique sans compromettre les conditions écologiques. Cela a démontré que la coexistence entre production énergétique et conservation de la biodiversité est possible;
3. Validation du modèles : les comparaisons entre les sites et les scénarios ont validé la robustesse des modèles hydrauliques utilisés. Ces modèles ont prouvé leur capacité à prédire avec précision les impacts des modifications proposées, offrant des solutions pratiques et adaptables à d'autres contextes similaires;
4. Approche intégrée : l'intégration des analyses hydrauliques avec les considérations écologiques a permis de développer une approche holistique. Cette approche a prouvé que les objectifs environnementaux et énergétiques peuvent être atteints simultanément grâce à des stratégies de gestion bien conçues.

9.4 Perspectives futures

Les différentes perspectives futures que propose cette étude sont les suivantes:

1. Mise en place des améliorations : la prochaine étape consiste à mettre en oeuvre les modifications bathymétriques, la fermeture des échancrures inadéquates et les ajustements de gestion des débits sur le terrain. Puis, de refaire un suivi de smolts de saumon via radio télémétrie. Cela permettra d'observer les impacts réels des solutions proposées et d'apporter des ajustements si nécessaire;
2. Elargissement des conditions hydrauliques : le modèle utilisé dans le cadre de cette étude se base sur quatre critères hydrauliques, à savoir la vitesse du courant, la hauteur d'eau, le gradient de vitesse et le gradient de hauteur d'eau. Tant la littérature est relativement riche en ce qui concerne des critères de valeurs seuil pour la vitesse du courant et la

hauteur d'eau favorable pour la dévalaison des smolts, le nombre de sources scientifiques sur le gradient de vitesse est faible (deux sources trouvées seulement) et aucune source scientifique n'a objectivé une valeur seuil pour le gradient de vitesse. Objectiver des critères pour les deux gradients de manière plus fiable permettrait de mieux quantifier les zones d'écoulement où ces paramètres seraient néfastes pour la dévalaison des smolts. En outre, la prise en compte de la turbulence dans l'analyse du comportement des smolts envers les différentes conditions d'écoulement renforcerait la pertinence de l'étude.

3. Un suivi de smolts en radio télémétrie 3D pourrait donner encore plus de pistes sur le comportement des poissons vis à vis des conditions hydrauliques et des infrastructures mises en places sur les sites. En effet, de tels suivis pourraient apporter des informations cruciales sur le comportement des smolts à leur rencontre avec un déversoir. Ainsi, cela pourrait peut-être renforcer l'inutilité de consacrer un débit réservé sur un déversoir pour la dévalaison des smolts de saumon.
4. Collaboration interdisciplinaire : la collaboration entre ingénieurs hydrauliciens, écologistes, gestionnaires de ressources et autres parties prenantes est crucial pour le succès à long terme de ces initiatives. Une approche interdisciplinaire permettra de maximiser les synergies entre les objectifs écologiques et énergétiques. Ce projet s'est concentré uniquement sur l'impact des conditions hydrauliques sur la migration aval des smolts. L'interaction de cet impact hydraulique mêlée à d'autres domaines permettrait de trouver des liens de causalité plus aisément. Par exemple, des biologistes pourraient uniquement se concentrer sur la physiologie des smolts de saumon, les hydrauliciens sur l'aspect écoulement à surface libre, les électromécaniciens sur la manière d'optimiser les turbines. Ceci permettrait une optimisation des tâches et éviterait des erreurs de compréhension/interprétation (par exemple, un biologiste peut penser qu'un poisson soit sensible à un débit alors qu'un hydraulicien ne saurait que réfuter).

Bibliographie

- [1] Allan, D., Erickson, D., & Fay, J. (1997). The influence of catchment land use on stream integrity across multiple spatial scales. *Freshwater Biology*, 37(1), 149–161. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.d01-546.x>
- [2] Archambeau, P. (2024) Welcome to WOLF's documentation! WOLF. [wolf.hece.uliege.be](https://wolf.hece.uliege.be/index.html#welcome-to-wolf-s-documentation) Disponible sur : <https://wolf.hece.uliege.be/index.html#welcome-to-wolf-s-documentation> (Consulté le: 10/05/2024).
- [3] Arnekleiv, J. V., Kraabøl, M., & Museth, J. (2007). Efforts to aid downstream migrating brown trout (*Salmo trutta* L.) kelts and smolts passing a hydroelectric dam and a spillway. *Hydrobiologia*, 582(1), 5–15. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0547-8>
- [4] Baudoin, J.-M., Burgun, V., Chanseau, M., Larinier, M., Ovidio, M., Sremski, W., Steinbach, P., & Voegtle, B. (2014). Informations sur la Continuité Ecologique - ICE -Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. Onema. https://explore.lib.uliege.be/permalink/32ULG_INST/1iujq0/alma9919885133702321
- [5] Ben Jebria, N., Carmigniani, R. A., Drouineau, H., de Oliveira, E., Tétard, S., & Capra, H. (2023). Coupling 3D hydraulic simulation and fish telemetry data to characterize the behavior of migrating smolts approaching a bypass. *Journal of Ecohydraulics*, 8(2), 144–157. <https://doi.org/10.1080/24705357.2021.1978345>
- [6] Bjornn, T. C., & Reiser, D. W. (1991). "Habitat requirements of salmonids in streams." In W. R. Meehan (Ed.), *Influences of forest and rangeland management on salmonid fishes and their habitats* (pp. 83-138). <https://www.noaa.gov/sites/default/files/legacy/document/2020/Oct/07354626600.pdf>
- [7] Brekke, H. (2012). A discussion on turbine design for safe operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 15(2), 22003-. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/15/2/022003>
- [8] Brett. 1952. Temperature Tolerance in Young Pacific Salmon, Genus *Oncorhynchus*. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 9(6): 265-323. <https://doi.org/10.1139/f52-016>

- [9] Calles, O., & Greenberg, L. (2009). Connectivity is a two-way street—the need for a holistic approach to fish passage problems in regulated rivers. *River Research and Applications*, 25(10), 1268–1286. <https://doi.org/10.1002/rra.1228>
- [10] Castro-Santos, T. (2004). Quantifying the combined effects of attempt rate and swimming capacity on passage through velocity barriers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61(9), 1602–1615. <https://doi.org/10.1139/f04-094>
- [11] Castro-Santos, T. (2006). Modeling the Effect of Varying Swim Speeds on Fish Passage through Velocity Barriers. *Transactions of the American Fisheries Society*, 135(5), 1230–1237. <https://doi.org/10.1577/T05-262.1>
- [12] Demarco, C. F., Afonso, T. F., Ribeiro, P. D., Caballero, C. B., Andreazza, R., & Siqueira, T. M. (2020). Attributes and Magnitude of the Socio-Environmental Impacts in Environmental Impact Study and Environmental Impact Report (EIS/EIR) of two small Hydroelectric Power Plants. *Ciência e Natura*, 42, e22-. <https://doi.org/10.5902/2179460X40368>
- [13] Doost, A., & Lubitz, W. D. (2020). Archimedes screw turbines: A sustainable development solution for green and renewable energy generation-a review of potential and design procedures. *Sustainability*, 12(18), 7352-. <https://doi.org/10.3390/SU12187352>
- [14] Enders, E. C., Gessel, M. H., Anderson, J. J., & Williams, J. G. (2012). Effects of Decelerating and Accelerating Flows on Juvenile Salmonid Behavior. *Transactions of the American Fisheries Society* (1900), 141(2), 357–364. <https://doi.org/10.1080/00028487.2012.664604>
- [15] Erinofardi, E., Koirala, R., Shiwakoti, N., & Date, A. (2022). "Sustainable Power Generation Using Archimedean Screw Turbine: Influence of Blade Number on Flow and Performance." *Sustainability*, 14(23), 15948. <https://doi.org/10.3390/su142315948>.
- [16] Ferguson, J. W., Healey, M., Dugan, P., & Barlow, C. (2011). Potential Effects of Dams on Migratory Fish in the Mekong River: Lessons from Salmon in the Fraser and Columbia Rivers. *Environmental Management* (New York), 47(1), 141–159. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9563-6>
- [17] Franklin, A. E., Haro, A., Castro-Santos, T., & Noreika, J. (2012). Evaluation of Nature-Like and Technical Fishways for the Passage of Alewives at Two Coastal Streams in New England. *Transactions of the American Fisheries Society*, 141(3), 624–637. <https://doi.org/10.1080/00028487.2012.683469>
- [18] Gelwick, F. (2000). *River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*: Edited by R.J. Naiman and R.E. Bilby, Springer–Verlag, New York, 1998, 705 pp. ISBN 0-387-98323-6 (hardcover) [Review of *River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*: Edited by R.J. Naiman and R.E. Bilby,

- Springer-Verlag, New York, 1998, 705 pp. ISBN 0-387-98323-6 (hardcover)]. *Ecological Engineering*, 16(2), 313–314. Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(99\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(99)00047-6)
- [19] Gustafson, R. G., WAPLES, R. S., MYERS, J. M., WEITKAMP, L. A., BRYANT, G. J., JOHNSON, O. W., & HARD, J. J. (2007). Pacific Salmon Extinctions: Quantifying Lost and Remaining Diversity. *Conservation Biology*, 21(4), 1009–1020. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00693.x>
- [20] Havn, T. B., Thorstad, E. B., Teichert, M. A. K., Sæther, S. A., Heermann, L., Hedger, R. D., Tambets, M., Diserud, O. H., Borchert, J., & Økland, F. (2018). Hydropower-related mortality and behaviour of Atlantic salmon smolts in the River Sieg, a German tributary to the Rhine. *Hydrobiologia*, 805(1), 273–290. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3311-3>
- [21] Haro, A., Odeh, M., Noreika, J., & Castro-Santos, T. (1998). Effect of Water Acceleration on Downstream Migratory Behavior and Passage of Atlantic Salmon Smolts and Juvenile American Shad at Surface Bypasses. *Transactions of the American Fisheries Society*, 127(1), 118–127. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1998\)127<0118:EOWAOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1998)127<0118:EOWAOD>2.0.CO;2)
- [22] Jonsson, B., & Jonsson, N. (2011). *Ecology of Atlantic salmon and brown trout: habitat as a template for life histories* (Vol. 33). Springer Science & Business Media. <https://books.google.be/books?id=e6A0AAAtvxh8C&lpg=PR3&ots=60rd0gid8f&dq=Jonsson>
- [23] Katopodis, C. & Williams, John. (2011). The development of fish passage research in a historical context. *Ecological Engineering - ECOL ENG.* 48. DOI:10.1016/j.ecoleng.2011.07.004
- [24] KEMP, P. S., & O'HANLEY, J. R. (2010). Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis. *Fisheries Management and Ecology*, 17(4), 297–322. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2010.00751.x>
- [25] Kumar, A., Schei, T., Ahenkorah, A., Caceres Rodriguez, R., Devernay, J.-M., Freitas, M., Hall, D., Killingtveit, Å., & Liu, Z. (2011). Hydropower. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, & C. von Stechow (Eds.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (pp. 437-496). Cambridge University Press. https://explore.lib.uliege.be/permalink/32ULG_INST/9537n7/cdi_cambridge_corebooks_9781139151153_xml_CB09781139151153A025
- [26] Lacroix, G. L., McCurdy, P., & Knox, D. (2004). Migration of Atlantic Salmon Postsmolts in Relation to Habitat Use in a Coastal System. *Transactions of the American Fisheries Society*, 133(6), 1455–1471. <https://doi.org/10.1577/T03-032.1>

- [27] Lacroix, G. L., Knox, D., & McCurdy, P. (2004). Effects of Implanted Dummy Acoustic Transmitters on Juvenile Atlantic Salmon. *Transactions of the American Fisheries Society* (1900), 133(1), 211–220. <https://doi.org/10.1577/T03-071>
- [28] Laughinghouse IV, H., Pra, D., Silva-Stenico, M., Rieger, A., Frescura, V., Fiore, M., & Tedesco, S. (2012). *Science of the Total Environment. The Science of the Total Environment*, 180–188. https://explore.lib.uliege.be/permalink/32ULG_INST/9537n7/cdi_fao_agris_BE2014114100
- [29] Luminus. (2024) Solution. Live4fish Disponible sur : <https://www.life4fish.be/fr/solutions>(Consulté le:20/02/2024).
- [30] Marine institute, (2022), Salmon Life Cycle, Foras na mara marine institute, <https://www.marine.ie/site-area/areas-activity/fisheries-ecosystems/salmon-life-cycle?language=en>
- [31] McCormick, Stephen & Hansen, Lars & Quinn, Thomas & Saunders, Richard. (1998). Movement, migration, and smolting of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 55. 10.1139/d98-011. DOI:10.1139/d98-011
- [32] Larinier, Michel. (2001). Environmental issues, dams and fish migration. *Dams, Fish and Fisheries: Opportunities, Challenges and Conflict Resolution*. https://www.researchgate.net/publication/27335307_Environmental_issues_dams_and_fish_migration
- [33] McCullough, D.A. 1999. A review and synthesis of effects of alterations to the water temperature regime on freshwater life stages of salmonids, with special reference to Chinook Salmon. Seattle, Wash, U.S. Environmental Protection Agency, Region 10. 291p. <https://critfc.org/reports/a-review-and-synthesis-of-effects-of-alterations-to-the-water-temperature-regime-on>
- [34] Mills, D. (2002). *Migration of Freshwater Fishes*, Martin C. Lucas and Etienne Baras; Blackwell Science Ltd., Oxford, 440 pages, hardback, ISBN 0-632-05754-8, [Review of *Migration of Freshwater Fishes*, Martin C. Lucas and Etienne Baras; Blackwell Science Ltd., Oxford, 440 pages, hardback, ISBN 0-632-05754-8, £79.50]. *Fisheries Research*, 58(2), 250–251. Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(02\)00129-7](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(02)00129-7)
- [35] Mitigating the effects of high-head dams on the Columbia River, USA: experiences from the trenches https://explore.lib.uliege.be/permalink/32ULG_INST/9537n7/cdi_proquest_journals_288497500
- [36] Naiman, R. J., Bilby, R. E., Schindler, D. E., & Helfield, J. M. (2002). *Pacific Salmon, Nutrients, and the Dynamics of Freshwater and Riparian Ecosystems*. *Ecosystems* (New York), 5(4), 399–417. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0083-3>

- [37] Newton, M., Barry, J., Dodd, J. A., Lucas, M. C., Boylan, P., & Adams, C. E. (2019). A test of the cumulative effect of river weirs on downstream migration success, speed and mortality of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts: An empirical study. *Ecology of Freshwater Fish*, 28(1), 176–186. <https://doi.org/10.1111/eff.12441>
- [38] Noonan, M. J., Grant, J. W. A., & Jackson, C. D. (2012). A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries* (Oxford, England), 13(4), 450–464. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00445.x>
- [39] ØKLAND, F., THORSTAD, E. B., FINSTAD, B., SIVERTSGÅRD, R., PLANTALECH, N., JEPSEN, N., & MCKINLEY, R. S. (2006). Swimming speeds and orientation of wild Atlantic salmon post-smolts during the first stage of the marine migration. *Fisheries Management and Ecology*, 13(4), 271–274. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2006.00498.x>
- [40] Philippart, J.-C., Sonny, D., & Raemakers, V. (2003). Impact mécanique des prises d’eau et turbines sur les poissons en Meuse liégeoise. https://explore.lib.uliege.be/permalink/32ULG_INST/1iujq0/alma9920112179302321
- [41] POFF, N. L., & ZIMMERMAN, J. K. H. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 55(1), 194–205. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x>
- [42] Polák, M. (2021). A brief history of the kaplan turbine invention. *Energies* (Basel), 14(19), 6211-. <https://doi.org/10.3390/en14196211>
- [43] Pollock, M. M., Witmore, S., & Yokel, E. (2022). Field experiments to assess passage of juvenile salmonids across beaver dams during low flow conditions in a tributary to the Klamath River, California, USA. *PloS One*, 17(5), e0268088–e0268088. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268088>
- [44] Renardy, S., Colson, D., Benitez, J.-P., Dierckx, A., Goffaux, D., Sabbe, J., Rabouan, A., Detrait, O., Nzau Matondo, B., Sonny, D., & Ovidio, M. (2022). Migration behaviour of Atlantic salmon smolts (*Salmo salar* L.) in a short and highly fragmented gravel-bed river stretch. https://explore.lib.uliege.be/permalink/32ULG_INST/1iujq0/alma9922233571102321
- [45] Renardy, S., Benitez, J.-P., Tauzin, A., Dierckx, A., Nzau Matondo, B., & Ovidio, M. (2020). How and where to pass? Atlantic salmon smolt’s behaviour at a hydropower station offering multiple migration routes. *Hydrobiologia*, 847(2), 469–485. <https://doi.org/10.1007/s10750-019-04108-w>
- [46] Renardy, S., Ciraane, U. D., Benitez, J.-P., Dierckx, A., Archambeau, P., Piroton, M., Erpicum, S., & Ovidio, M. (2023). Combining fine-scale telemetry and hydraulic numerical

modelling to understand the behavioural tactics and the migration route choice of smolts at a complex hydropower plant. *Hydrobiologia*, 850(14), 3091–3111. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05237-z>

- [47] Renardy, S., Colson, D., Benitez, J., Dierckx, A., Goffaux, D., Sabbe, J., Rabouan, A., Detrait, O., Nzau Matondo, B., Sonny, D., & Ovidio, M. (2022). Migration behaviour of Atlantic salmon smolts (*Salmo salar* L.) in a short and highly fragmented gravel-bed river stretch. *Ecology of Freshwater Fish*, 31(3), 499–514. <https://doi.org/10.1111/eff.12646>
- [48] Scholz, N. L., Myers, M. S., McCarthy, S. G., Labenia, J. S., McIntyre, J. K., Ylitalo, G. M., ... & Collier, T. K. (2011). Recurrent die-offs of adult Coho salmon returning to spawn in Puget Sound lowland urban streams. *PLoS ONE*, 6(12), e28013. doi:10.1371/journal.pone.0028013.
- [49] Silva, A. T., Lucas, M. C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L. J., Thiem, J. D., Aarestrup, K., Pompeu, P. S., O'Brien, G. C., Braun, D. C., Burnett, N. J., Zhu, D. Z., Fjeldstad, H., Forseth, T., Rajaratnam, N., Williams, J. G., & Cooke, S. J. (2018). The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries* (Oxford, England), 19(2), 340–362. <https://doi.org/10.1111/faf.12258>
- [50] Silva, A.T., Santos, J.M., Franco, A.C., Ferreira, M.T. and Pinheiro, A.N. (2009), Selection of Iberian barbel *Barbus bocagei* (Steindachner, 1864) for orifices and notches upon different hydraulic configurations in an experimental pool-type fishway. *Journal of Applied Ichthyology*, 25: 173-177. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2009.01237.x>
- [51] Szabo-Meszaros, M., Forseth, T., Baktoft, H., Fjeldstad, H., Silva, A. T., Gjelland, K. Ø., Økland, F., Uglem, I., & Alfredsen, K. (2019). Modelling mitigation measures for smolt migration at dammed river sections. *Ecohydrology*, 12(7). <https://doi.org/10.1002/eco.2131>
- [52] Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., & Morgan, R. P. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), 706–723. <https://doi.org/10.1899/04-028.1>
- [53] Wedemeyer, Gary & McLeay, Donald & Goodyear, C.. (1984). ASSESSING THE TOLERANCE OF FISH AND FISH POPULATIONS TO ENVIRONMENTAL STRESS: THE PROBLEMS AND METHODS OF MONITORING. https://www.researchgate.net/publication/264558356_ASSESSING_THE_TOLERANCE_OF_FISH_AND_FISH_POPULATIONS_TO_ENVIRONMENTAL_STRESS_THE_PROBLEMS_AND_METHODS_OF_MONITORING
- [54] Williams, J. G. (2008). Mitigating the effects of high-head dams on the Columbia River, USA: experience from the trenches. *Hydrobiologia*, 609(1), 241–251. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9411-3>

- [55] Williams, G. P., & Wolman, M. G. (1984). Downstream effects of dams on alluvial rivers. United States Department of the Interior, Geological Survey. https://explore.lib.uliege.be/permalink/32ULG_INST/oao96e/alma9922792430002321

Annexe A

Annexe au chapitre 4

Sur base des photos aux figures 1, 2 et 3, on peut apercevoir que la topographie du fond de l'eau remonte progressivement au droit du déversoir sur approximativement soixante-cinq des nonante mètres de déversoir. Le fond de l'eau monte jusqu'à 50 centimètres en-dessous du niveau de la crête du déversoir et la mission de dragage à uniformisé cela sur les soixante-cinq mètres du déversoir en rive gauche. C'est pourquoi, sur cette zone, une interpolation linéaire a été faite entre la bathymétrie connue et la cote de la topographie contre le déversoir fixée à 63,75m (cote du déversoir à 64,24m).



Figure 1: Photo n°1 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage



Figure 2: Photo n°2 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage



Figure 3: Photo n°3 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage

Le long de la berge, le fond de l'eau émerge aussi de l'eau au même titre que la topographie du fond de l'eau le long du déversoir sur les soixante-cinq mètres en rive gauche (figures 3, 4, 5 et 6). Donc le long de la berge, la cote a été fixée à cette même valeur (63,75m). Entre la cote du fond à la berge et la bathymétrie connue, la bathymétrie a été interpolée linéairement.



Figure 4: Photo n°4 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage



Figure 5: Photo n°5 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage



Figure 6: Photo n°6 du site des Grosses-Battes durant une mission de dragage

La zone à l'entrée de la centrale possède un radier plat à la cote de 60,5 m, puis un autre à la cote de 59,5 m adjacent aux turbines. La zone restante, étant bordée de cotes connues, a été interpolée linéairement.