



Tiré à part du Forêt.Nature n° 169, p. 8-17

L'ÉCO-HYDRAULIQUE : POUR UNE APPROCHE INTÉGRÉE DE LA RESTAURATION DES COURS D'EAU

Margaux Lognoul, Bruno Chermanne, Xavier Janssens, Noé Desmet, Sébastien Den Doncker (Stream & River)

Rédaction : Rue de la Plaine 9, B-6900 Marche, info@foretnature.be, T +32 (0)84 22 35 70. Photo de couverture : Bbsferrari/Adobe Stock
La reproduction ou la mise en ligne totale ou partielle des textes et des illustrations est soumise à l'autorisation de la rédaction. foretnature.be



L'éco-hydraulique : pour une approche intégrée de la restauration des cours d'eau

Margaux Lognoul | Bruno Chermanne | Xavier Janssens | Noé Desmet | Sébastien Den Doncker
Stream & River

L'impact des infrastructures hydrauliques sur les écosystèmes aquatiques est de mieux en mieux connus. En évaluant finement le milieu, il est possible de concevoir ces infrastructures ou la restauration des cours d'eau en respectant mieux les écosystèmes.

L'essor de l'industrie, de l'agriculture et de l'urbanisation au 19^e siècle a entraîné des modifications importantes des écosystèmes, dont l'artificialisation des cours d'eau. Celle-ci a eu un impact considérable sur les processus hydrodynamiques des rivières, ainsi que sur les habitats des espèces aquatiques⁴. La capacité des rivières à maintenir leur structure et les fonctions essentielles qu'elles remplissent pour les espèces aquatiques, telles que la reproduction, l'alimentation et le repos, a été altérée, tout comme la diversité biologique. Or, la fourniture d'habitats pour les espèces aquatiques est une des fonctions capitales des cours d'eau.

De nombreux projets de restauration et des programmes d'action ont été lancés dans le but de préserver et d'améliorer la qualité des écosystèmes aquatiques. L'objectif est de protéger les espèces associées et de réduire l'impact des aménagements hydrauliques en trouvant un équilibre entre les besoins des milieux aquatiques et ceux des êtres humains. Au niveau européen, la Directive-cadre sur l'eau² fixe divers objectifs visant à préserver la faune aquatique et à atteindre un « bon état » des eaux. Sur certains projets de restauration, la notion de « débit biologique » est également appliquée pour garantir un flux d'eau suffisant, notamment aux points de prélèvement ou en aval des ouvrages. La conscience de l'impact des prélèvements d'eau, des déversoirs et des barrages sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et connexes (milieux humides, plaines alluviales) a été renforcée.

Cependant, les questions purement hydrauliques s'imposent souvent dans les projets d'aménagement. En effet, les craintes pour les infrastructures et les

habitations, ravivées par les événements climatiques de l'été 2021, prévalent parfois sur les besoins de restaurer ou de préserver la biodiversité des cours d'eau. Les études se concentrent alors sur des questions de génie civil et hydraulique (prévenir les débordements, stabiliser les berges...) en faisant l'impasse sur la biodiversité aquatique.

Développer une vision intégrée

Les approches modernes de la gestion des cours d'eau soulignent l'importance d'une vision intégrée incorporant les deux aspects hydrauliques et écologiques des écosystèmes aquatiques. Pour une meilleure performance des projets de restauration, la compréhension de l'adéquation des habitats aquatiques avec les besoins des espèces-cibles est primordiale. Les caractéristiques de ces habitats, variables en fonction du stade de développement des espèces, sont intimement liées aux caractéristiques hydrodynamiques du cours d'eau.

La reconnaissance de l'importance des approches interdisciplinaires pour la gestion des écosystèmes aquatiques a donné naissance à une sous-discipline en plein essor : l'éco-hydraulique*. L'éco-hydraulique a pour objectif d'établir un lien entre les caractéristiques physiques des rivières et leurs performances biologiques.

* La plateforme internationale ecohydraulics.org regroupe les scientifiques, techniciens et ingénieurs impliqués dans la thématique, et propose des références et formations.

RÉSUMÉ

L'éco-hydraulique, discipline émergente dans la gestion des cours d'eau, relie les caractéristiques physiques des rivières à leur performance biologique. Se basant sur la notion d'habitat hydraulique, elle utilise des courbes de préférence pour évaluer le potentiel en habitat pour les espèces dans les rivières, en fonction des caractéristiques locales (profondeur, vitesse d'écoulement de l'eau...).

La modélisation éco-hydraulique constitue un outil innovant pour évaluer et concevoir des projets d'aménagement ou de restauration des cours d'eau, en prenant en compte les besoins écologiques des espèces. Pour illustrer la méthode, l'exemple d'un projet de reméandration est donné (Syre, Luxembourg). Les courbes de préférences de la loche franche et du gardon, associée à une modélisation hydraulique en deux dimensions, permettent d'évaluer le potentiel en habitat du tronçon renaturé.

Une telle méthode comprend cependant des défis. Les besoins en données sont élevés (topographie, modélisation hydraulique...) et une connaissance du cours d'eau et de ses espèces est nécessaire pour une utilisation efficace. De plus, la modélisation éco-hydraulique calcule un potentiel en habitat, mais d'autres paramètres limitants peuvent entrer en ligne de compte (détérioration de la qualité de l'eau, obstacle à la continuité écologique sur le cours d'eau...). Toutefois, cette méthode se révèle complémentaire aux outils de diagnostic déjà existants.

La modélisation éco-hydraulique est un outil innovant pour évaluer les réponses écologiques aux changements hydrauliques dans les cours d'eau, mais son utilisation généralisée nécessite des données de haute qualité et une connaissance approfondie des écosystèmes aquatiques.



La restauration des cours d'eau nécessite une vision intégrée prenant en compte l'hydraulique et l'écologie.

Un pan significatif de l'éco-hydraulique concerne l'étude et la modélisation de l'habitat hydraulique. L'hypothèse admise est que des combinaisons de profondeur, de vitesse et de type de substrat offrent un moyen concret de prédire, d'évaluer et de concevoir les habitats biologiques dans les rivières. Comprendre comment la gestion physique des cours d'eau peut transformer les habitats aquatiques demande de combiner des modèles hydrauliques et des modèles biologiques.

Cette discipline apparaît comme un outil potentiel permettant d'évaluer et de concevoir des projets d'aménagement ou de restauration des cours d'eau, en augmentant la prise en compte de l'écologie⁶.

Les préférences des espèces aquatiques

À l'instar des humains, dont certains préfèrent l'agitation des villes alors que d'autres recherchent la

tranquillité de la campagne, les espèces de la faune aquatique affichent aussi des préférences en termes d'habitat. Nous nous limiterons aux poissons dans les exemples donnés ci-dessous.

Notion d'habitat hydraulique

L'habitat désigne l'environnement aquatique dans lequel les espèces évoluent et trouvent les conditions nécessaires à leur survie et à leur reproduction. Il est déterminé par une combinaison complexe de facteurs hydrologiques, géomorphologiques et biologiques, et il joue un rôle essentiel dans le maintien et le développement des populations de poissons.

La profondeur, la vitesse d'écoulement de l'eau et la nature du substrat figurent parmi les éléments clés qui définissent un habitat hydraulique. La profondeur de l'eau influence la capacité des poissons à se cacher des prédateurs, à se reproduire et à se déplacer dans l'habitat. Les mouilles (zones d'eaux profondes et calmes) constituent des zones refuges et ont tendance à maintenir une température stable. Concernant la vitesse du courant, les écoulements plus rapides peuvent apporter une plus grande quantité de nourriture, mais les poissons doivent être capables de nager efficacement pour la capturer. Les

zones de courant lent peuvent quant à elles constituer des endroits de repos. Notons enfin que le type de substrat au fond du lit mineur a aussi son importance : de nombreuses espèces de poissons pondent ainsi leurs œufs sur des substrats spécifiques (gravier ou sable, par exemple). Une vitesse d'écoulement appropriée est nécessaire pour maintenir ces substrats en bon état ; un écoulement trop lent peut entraîner l'accumulation de sédiments ou une mauvaise oxygénation.

S'il n'est donc pas question de métropole animée ou de village tranquille pour la faune aquatique, il apparaît bel et bien que les espèces recherchent différents types d'habitats hydrauliques dont les projets d'aménagement des cours d'eau doivent tenir compte.

La modélisation de l'habitat hydraulique d'un tronçon de rivière permet une évaluation quantitative (et non plus qualitative : « bon » ou « mauvais ») du potentiel en habitat biologique en fonction des caractéristiques hydrauliques locales. Elle permettrait donc également de comparer la situation existante d'un cours d'eau à des scénarios de restauration du lit mineur.

Les courbes de préférence ou « suitability curves »

Afin de caractériser les préférences d'une espèce en termes d'habitat hydraulique, les exigences vis-à-vis des paramètres physiques sont classiquement représentées sous forme de courbes et d'histogrammes (en

anglais : « *suitability curve* »)⁵. Ces courbes sont élaborées grâce à la littérature, aux études en laboratoire ou aux observations sur le terrain.

L'axe des ordonnées des graphes reprend l'indice de préférence, ou « *Suitability Index* » (SI). Cet indice représente la capacité d'un habitat donné à accueillir et soutenir une espèce à un stade de développement précis. Le SI varie de 0 à 1. Il est généralement admis qu'un indice supérieur à 0,8 correspond à un excellent potentiel en habitat pour l'espèce ciblée, tandis qu'un indice inférieur à 0,5 témoigne d'un potentiel pauvre.

Les tendances de préférence des espèces piscicoles sont bien connues des hydrobiologistes et des pêcheurs, mais l'utilisation d'un indice chiffré permet une quantification du potentiel en habitat dans un cours d'eau si les caractéristiques hydrauliques (profondeur, vitesse) sont connues.

Par exemple, la loche franche (*Barbatula barbatula*) au stade adulte s'épanouit dans des eaux modérément rapides (figure 1)¹. Au-delà d'une vitesse de courant d'un mètre par seconde, l'indice de préférence

L'habitat hydraulique d'une espèce à un stade de développement précis est défini par une profondeur, une vitesse d'écoulement et un substrat préférentiels.



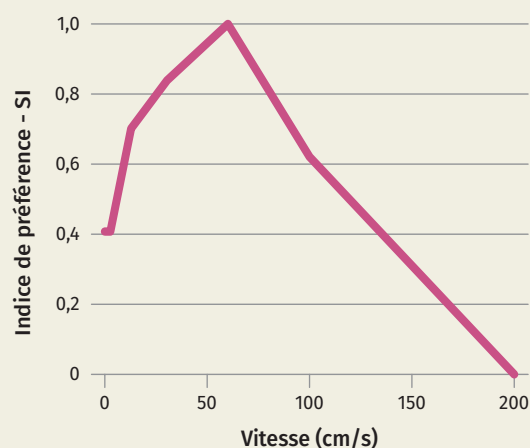
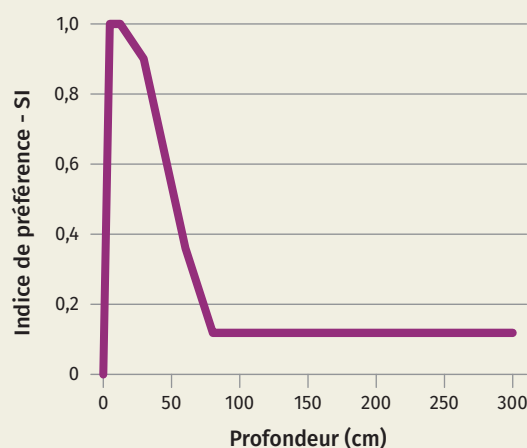
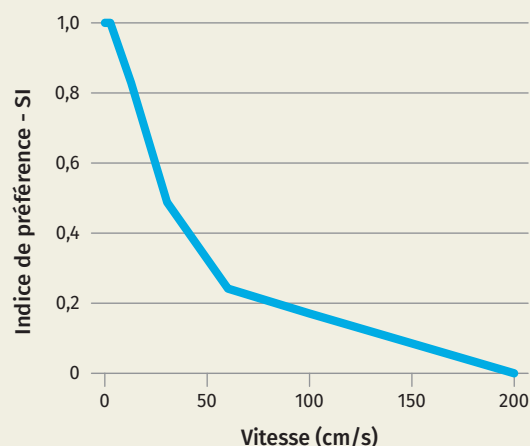
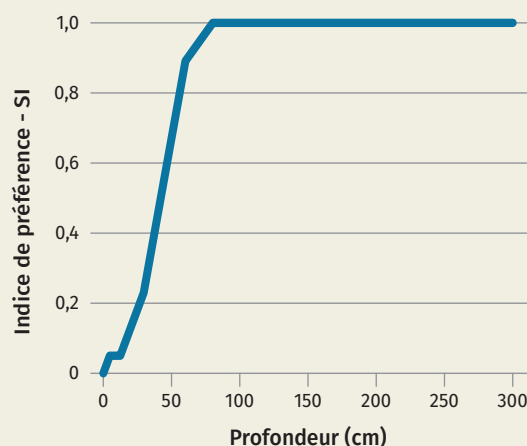


Figure 1. Indices de préférence d'habitat de la loche franche (*Barbatula barbatula*)¹.

Figure 2. Indices de préférence d'habitat du gardon (*Rutilus rutilus*)¹.



chute sous la barre de 0,6. Ce poisson évite les eaux très profondes, comme en témoigne l'indice de préférence, inférieur à 0,5 dès que la profondeur dépasse 50 cm. Le gardon (*Rutilus rutilus*) présente des courbes de préférences bien différentes (figure 2). Les zones d'eau profondes et de courant faible lui sont les plus favorables (SI > 0,8). Bien que ces deux espèces affichent des formes de courbes de préférence différentes, un même cours d'eau peut les accueillir s'il offre une diversité de profondeurs et d'écoulements suffisante pour satisfaire leurs besoins.

Notons qu'au-delà des facteurs d'habitats considérés dans cet article (hauteur d'eau, vitesse du courant et substrat), les modèles peuvent également intégrer des paramètres supplémentaires tels que la qualité physico-chimique de l'eau, la qualité des sédiments...

La modélisation éco-hydraulique en pratique

Comment peut-on en pratique quantifier le potentiel en habitats d'un tronçon de cours d'eau ? D'une part, cela nécessite de connaître la distribution spatiale des profondeurs et des vitesses dans la rivière. Cela passe par une modélisation hydraulique en deux dimensions. D'autre part, il faut cibler des espèces cohérentes avec la typologie de la rivière, pour associer leurs courbes de préférence à l'hydraulique modélisée.

Modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique permet de traduire des données hydrologiques (débit de la rivière) en caractéristiques hydrauliques, telles que la profondeur, la vitesse et la direction des écoulements sur un tronçon modélisé.



La loche franche (*Barbatula barbatula*) préfère des eaux modérément rapides et peu profondes.



Le gardon (*Rutilus rutilus*) recherche les eaux calmes et profondes.

Elle nécessite plusieurs données d'entrée :

- **Le débit du cours d'eau.** Les débits sont généralement issus de statistiques sur des mesures limnimétriques ou obtenus par modélisation hydrologique sur le bassin versant de la rivière (modèle « pluie-débit »). Plusieurs débits peuvent être modélisés si on s'intéresse à la période estivale ou aux hautes eaux hivernales.
- **La topographie détaillée du cours d'eau en trois dimensions.** Une représentation tri-dimensionnelle du terrain est indispensable pour modéliser finement le comportement des écoulements dans le lit mineur. La technologie de télédétection par laser topographique (LIDAR) est régulièrement utilisée. Cependant, elle fonctionne avec un signal infra-rouge qui est absorbé par l'eau, ce qui empêche dès lors des mesures fiables lorsque la lame

d'eau est trop importante. Pour s'assurer d'une représentation correcte du fond du lit, des mesures topographiques complémentaires au sol s'avèrent nécessaires. L'ajout d'un laser vert (on parle alors de laser topo-bathymétrique) est également une option. Ces mesures topographiques peuvent représenter un coût important dans les études, mais sont cruciales pour la modélisation éco-hydraulique (figure 3).

- **La rugosité du lit mineur.** La rugosité d'une surface influence la manière dont l'eau s'y écoule. Il est donc nécessaire de caractériser la rugosité du lit mineur pour la traduire en coefficient. Par exemple, un cours d'eau avec de nombreux blocs de pierre ou débris ligneux aura un coefficient de rugosité plus élevé qu'un tronçon de rivière au fond bétonné.

De nombreux logiciels existent pour construire un modèle hydraulique à partir de ces données (Lekan, HEC-RAS...). Ils permettent d'obtenir la distribution spatiale des profondeurs d'eau et les vitesses d'écoulement pour le tronçon modélisé (figure 4). Ce résultat peut ensuite être injecté dans le modèle éco-hydraulique.

Combinaison de l'hydraulique et de l'hydrobiologie

En se rapportant aux courbes de préférence présentées plus haut, une valeur d'indice de préférence peut être attribuée à chaque point du tronçon de rivière pour lequel un modèle hydraulique a calculé une profondeur et une vitesse. Il convient cependant de sélectionner les espèces en fonction de la typologie piscicole du cours d'eau ! Le tronçon renaturé pris en exemple est situé sur la Syre, rivière du Luxembourg. Dans la zone d'étude (commune de Schuttrange), elle est considérée comme un cours d'eau mixte, et la loche franche et le gardon sont des espèces cohérentes avec sa zonation piscicole. Ces deux poissons ont également été recensés à proximité de la zone d'étude entre 2005 et 2020.

Prenons l'exemple de la loche franche : les profils de vitesse dans ce tronçon semblent idéaux pour le stade adulte mais également pour les juvéniles (figure 5). La gamme de courants rencontrée dans ce tronçon convient en effet au développement et à la survie de cette espèce.

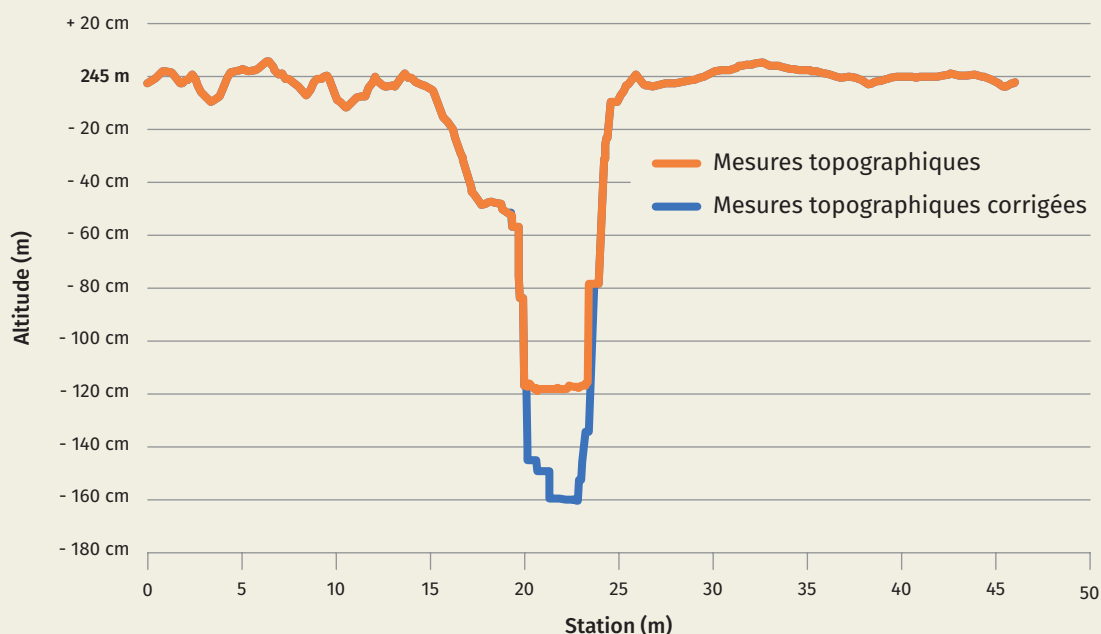
Il est dès lors possible de calculer le SI pour chaque paramètre et de moyenner ces indices pour obtenir un indice de préférence global (HSI, « *Habitat Suitability Index* »). Plusieurs formules existent : moyenne géométrique, moyenne arithmétique, SI minimum... Un exemple est donné à la figure 6 pour le gardon adulte, pour lequel nous avons réalisé une moyenne géométrique des SI liés respectivement à la vitesse et à la hauteur d'eau.

Points forts et points faibles

Le premier obstacle à la modélisation éco-hydraulique est... l'hydraulique ! En effet, une modélisation hydraulique requiert tout d'abord des connaissances techniques spécifiques, et toutes les équipes de biologistes n'ont pas un hydraulicien sous la main. La modélisation hydraulique nécessite des données fiables qui ne sont pas toujours disponibles. Sur certains cours d'eau, les mesures de débit sont absentes. De plus, les levés topographiques et bathymétriques demandent un haut degré de résolution et peuvent se révéler coûteux.

Une autre difficulté majeure de l'éco-hydraulique est qu'elle n'évalue qu'un potentiel en habitat. Ce potentiel aura beau être idéal pour une espèce donnée, d'autres paramètres pourraient fortement limiter le développement de celle-ci (obstacle à la libre circula-

Figure 3. La correction du LIDAR topographique est primordiale pour une représentation fidèle du lit mineur. En témoignent ces mesures prises sur la Syre (Luxembourg) par Stream & River. À cause de la lame d'eau, le LIDAR topographique a sous-estimé la profondeur du lit de plusieurs dizaines de centimètres !



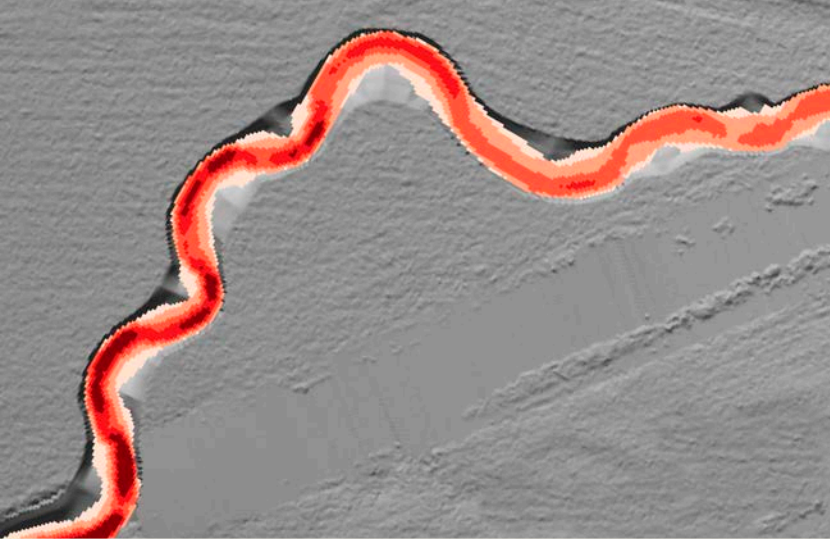
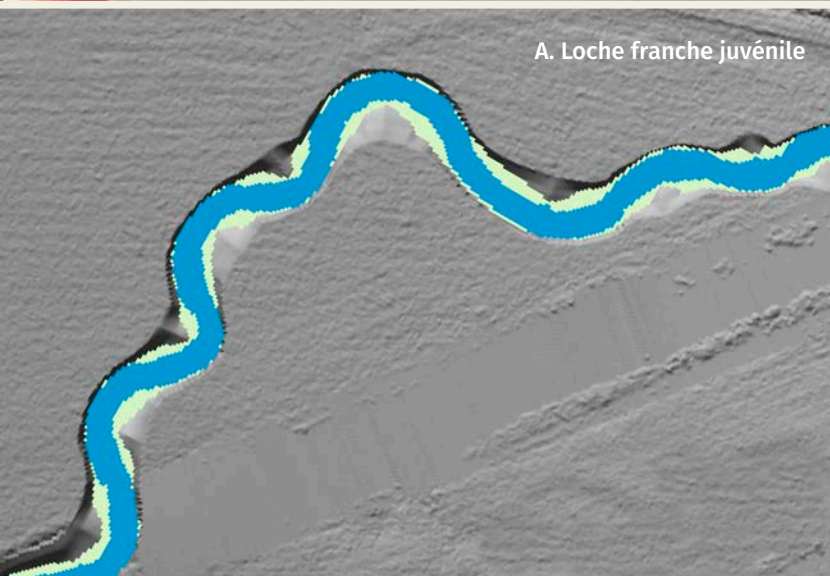


Figure 4. Modélisation hydraulique d'un projet de reméandration sur la Syre (Luxembourg). Le modèle numérique de terrain a été modifié pour créer un lit renaturé, et l'écoulement du débit moyen interannuel y a été modélisé. On observe sur cette figure la distribution spatiale des vitesses d'écoulement sur le tronçon, mais les hauteurs d'eau ont également été calculées.

Vitesse (m/s) :

● ≤ 0,10 ● 0,10-0,20 ● 0,20-0,30 ● 0,30-0,40 ● > 0,40

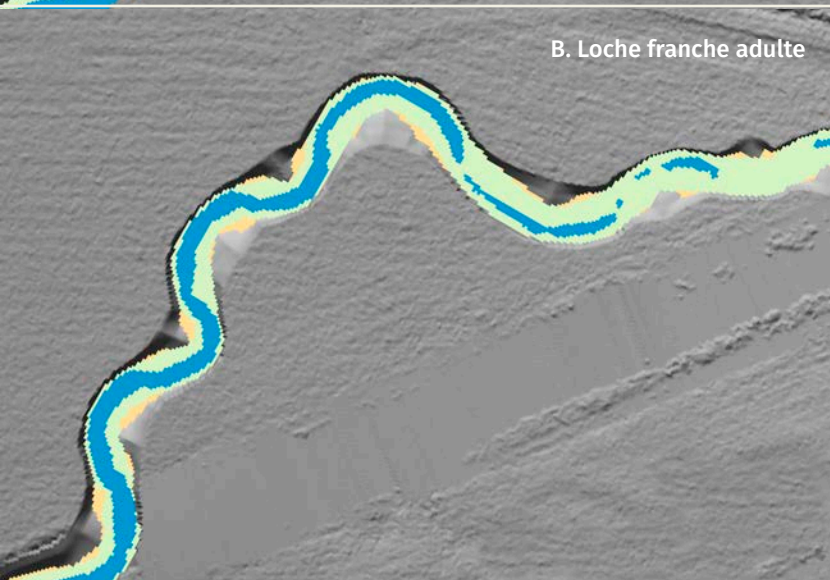


A. Loche franche juvénile

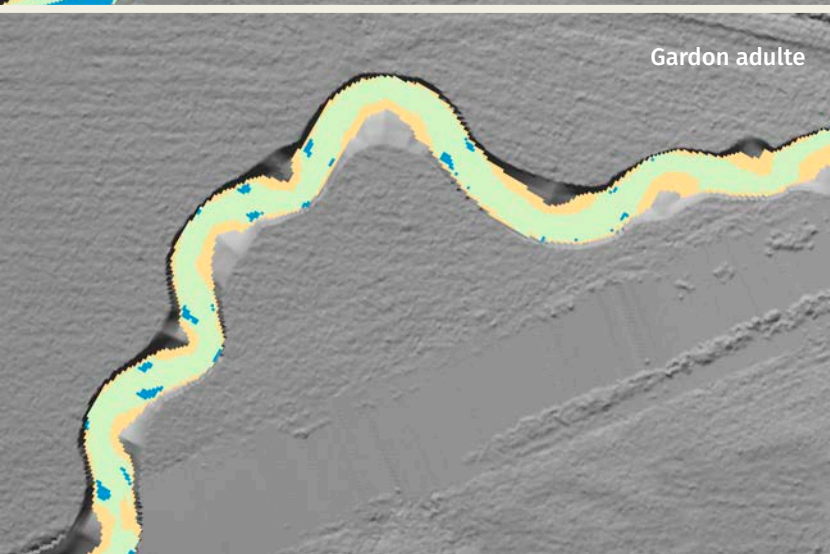
Figure 5. Indice de préférence (SI) de la loche franche en fonction de la vitesse d'écoulement. Un SI supérieur à 0,8 (en bleu sur les cartes) signifie un potentiel d'habitat idéal. De manière générale, un juvénile (A), par sa taille moins élevée, n'a aucun problème à fréquenter les zones très peu profondes (contrairement aux adultes (B)).

SI loche franche :

● ≤ 0,50 ● 0,50-0,80 ● > 0,80



B. Loche franche adulte



Gardon adulte

Figure 6. Indice de préférence d'habitat global (HSI) du gardon adulte. Les paramètres pris en compte sont la vitesse et la hauteur d'eau. La majorité du tronçon présente le potentiel d'accueillir cette espèce (HSI supérieur à 0,5).

HSI gardon adulte :

● ≤ 0,50 ● 0,50-0,80 ● > 0,80



Nord

0 10 20 m

tion, forte dégradation de la qualité de l'eau...). Modéliser le vivant n'est jamais facile tant les paramètres en jeu sont nombreux.

Toutefois, la modélisation éco-hydraulique permet d'aller plus loin que les outils de diagnostic déjà existants dans les projets de restauration. En effet, ces outils et méthodes, tels que « Qualphy » (Agence de l'Eau Rhin-Meuse), Cartographie de la qualité structurelle (LANUV, Allemagne), ou encore « CARHYCE » (Agence Française pour la Biodiversité)³ caractérisent la morphologie des cours d'eau, mais permettent difficilement de comparer des scénarios d'aménagement et d'évaluer quantitativement des mesures de restauration. L'éco-hydraulique pourrait donc être complémentaire à ces outils.

De plus, la modélisation éco-hydraulique ne se limite pas aux seuls poissons. Des courbes de préférences sont aussi disponibles dans la littérature pour les macro-invertébrés des rivières. Les perspectives sont nombreuses car les connaissances biologiques actuelles permettent de produire des courbes pour de nombreux groupes taxonomiques supplémentaires (dont les plantes).

Conclusion

Malgré l'importance d'une vision intégrée pour la restauration des rivières, il reste des défis pour définir et

quantifier les relations entre la gestion hydraulique et les conséquences écologiques. Les méthodes dites « éco-hydrauliques », notamment la modélisation éco-hydraulique, sont des outils récents et innovants de plus en plus utilisés pour évaluer les réponses écologiques suite aux changements hydrauliques, en tenant compte des caractéristiques écologiques des espèces aquatiques. Cependant, une telle modélisation est gourmande en données, et exige également une connaissance fine du cours d'eau et de ses espèces pour analyser les résultats de manière critique.

La modélisation éco-hydraulique n'est donc pas prête d'être généralisée, mais présente toutefois l'avantage de quantifier l'impact d'aménagements existants ou projetés sur le potentiel en habitats d'un cours d'eau. Elle représente donc une réelle plus-value dans les projets de restauration d'ampleur pour lesquels des données de bathymétrie et de débit sont déjà disponibles. ■

Bibliographie

- ¹ Lamouroux N., Capra H., Pouilly M., Souchon Y. (1999). Fish habitat preferences in large streams of southern France. *Freshwater Biology* 42 : 673-687. 
- ² Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. CELEX : 32000L0060. 

RIVALIS : un projet wallon innovant

Le projet RIVALIS, soutenu par le Pôle de compétitivité GREENWIN, a démarré en septembre 2023. Il est piloté par le bureau d'étude Stream & River. Notre dicton ? « Les petits ruisseaux font les grandes rivières » !

Les petits cours d'eau sont les parents pauvres de la renaturation des rivières. Pourtant, ils remplissent des fonctions écosystémiques majeures, d'autant plus importantes que les événements climatiques extrêmes se multiplient. Par ailleurs, les budgets d'études et la complexité des chantiers rendent les projets de renaturation des cours d'eau exceptionnels plutôt que systématiques. À l'image de l'intégration des nouvelles technologies en matière de simulation dans le domaine de la construction, RIVALIS vise à intégrer ce type de développement pour faciliter les renaturations et améliorer l'état des cours d'eau.

La modélisation des liens entre les caractéristiques physiques et biologiques sera une étape-clé du projet. L'éco-hydraulique permettra de quantifier l'impact d'une potentielle renaturation d'un ruisseau sur la biodiversité aquatique. La modélisation de la zone hyporhéique (zone de sédiments et d'espace poreux située sous et le long du lit mineur) constitue également une innovation. D'autres aspects, telle que la résilience aux inondations et sécheresses, seront également pris en compte.

Outre l'équipe de Stream & River, RIVALIS rassemble une équipe pluridisciplinaire, avec la participation des entreprises Kapta Survey et SkalUP, du laboratoire d'hydrographie et de géomorphologie fluviale de l'ULiège, du laboratoire d'hydraulique de l'UCLouvain, de l'axe Échanges Eau-Sol-Plante de Gembloux Agro-Bio Tech (ULiège).

Le projet RIVALIS est financé par la Région wallonne.

- ³ Kampa E., Bussetini M. (2018). *River hydromorphological assessment and monitoring methodologies*. Final report, CIS ATG on Hydromorphology, 126 p. 
- ⁴ Meybeck M. (2003). Global analysis of river systems : from Earth system controls to Anthropocene syndromes. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 358 : 1935-1955. 
- ⁵ Nestler J.M., Milhous R.T., Payne T.R., Smith D.L. (2019). History and review of the habitat suitability criteria curve in applied aquatic ecology. *River Research and Applications* 35(5) : 1-26. 
- ⁶ Nestler J.M., Stewardson M.J., Gilvear D., Webb G.A. (2016). Ecohydraulics exemplifies the emerging « paradigm of the interdisciplines ». *Journal of Ecohydraulics* 1 : 1-2, 5-15. 

Crédit photo. Adobe Stock (p. 8, 17), X. Janssens/Stream & River (p. 10, 11), H. Crisp/Wikimedia commons (p. 13 haut), Stream & River (p. 13 bas, 15).

Margaux Lognoul

Bruno Chermanne

Xavier Janssens

Noé Desmet

Sébastien Den Doncker

mlognoul@streamandriver.com

Stream & River

streamandriver.com

Cette étude s'inscrit dans le programme de recherche « ECOHYDR », financé par la Région wallonne.

POINTS-CLEFS

- Pour des aménagements de cours d'eau performants tant au niveau hydraulique qu'écologique, une gestion intégrée est primordiale.
- L'éco-hydraulique répond à ce besoin en combinant la modélisation hydraulique et la biologie dans le but de quantifier le potentiel en habitat des milieux aquatiques.
- En plein essor, cette discipline peine cependant à se développer sur les projets de renaturation : elle nécessite des données à l'acquisition coûteuse (bathymétrie) et des connaissances pointues (hydraulique, biologie).

