

## Caractérisation des refuges aquatiques pour le soutien à la résilience des écosystèmes d'eau douce dans un contexte de changement global

### Characterization of aquatic refuges to support the resilience of freshwater ecosystems in a global changing context

Matthieu Lucchini<sup>1,2</sup>, Cybill Staentzel<sup>1,2</sup>, Loïc trutin<sup>1</sup>, Etienne Chanez<sup>2,3</sup> & Jean-Nicolas Beisel<sup>1,2</sup>

1. ENGEES Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), 1 Cour des cigarières 67070 Strasbourg, France

2. LIVE CNRS UMR 7362 Laboratoire Image Ville Environnement (LIVE), Faculté de géographie et d'aménagement, 3 rue de l'Argonne 67083 Strasbourg Cedex, France

3. Institut de botanique, Faculté de Science de la Vie, 28 rue Goethe 67000 Strasbourg

[matthieu.lucchini@engees.unistra.fr](mailto:matthieu.lucchini@engees.unistra.fr) ; [cybill.staentzel@engees.unistra.fr](mailto:cybill.staentzel@engees.unistra.fr) ; [etienne.chanez@live-cnrs.unistra.fr](mailto:etienne.chanez@live-cnrs.unistra.fr) ; [jean-nicolas.beisel@engees.unistra.fr](mailto:jean-nicolas.beisel@engees.unistra.fr)

#### RÉSUMÉ

Les zones refuges aquatiques jouent un rôle clef dans la résilience des écosystèmes d'eau douce face aux pressions exercées par le dérèglement climatique et les pressions anthropiques. Pourtant, leur identification et leur caractérisation restent limitées par l'absence de consensus sur leur définition et le manque d'outils de diagnostic. Pour combler ces lacunes, nous avons conduit une revue systématique de la littérature selon un cadre reconnu, la stratégie PECO. Ce premier volet nous a permis de (i) mesurer l'importance des refuges aquatiques pour la résilience des écosystèmes lotique face aux perturbations environnementales, et (ii) d'identifier les paramètres structurels, physiques, spatiaux et biologiques qui structurent la zone-refuge. Sur cette base conceptuelle, ces paramètres ont été évalués en situation réelle, au sein du bassin versant de la Wieslauter dans le cadre du projet Interreg RiverDiv. Cette évaluation s'appuie sur une approche pluridisciplinaire combinant des prélèvements macro-invertébrés, des cartographies détaillées de la mosaïque fluviale et l'utilisation de drone i.e. imagerie visible et thermique. Cette approche intégrative ouvre des perspectives concrètes pour améliorer la gestion adaptative et durable des zones-refuges aquatiques, particulièrement dans un contexte où leur vulnérabilité face aux pressions croissantes est questionnée.

#### ABSTRACT

Aquatic refuges play a key role in the resilience of freshwater ecosystems facing pressures from climate change and human activities. However, their identification and characterization remain limited due to the lack of consensus on their definition and the absence of diagnostic tools. To address these gaps, we conducted a systematic review of the literature using a recognized framework, the PECO strategy. This first phase allowed us to (i) assess the importance of aquatic refuges for the resilience of lotic ecosystems to disturbances, and (ii) identify the structural, physical, spatial, and biological parameters that define a refuges. Building on this conceptual foundation, these parameters were evaluated under real-world conditions across the Wieslauter basin as part of the Interreg RiverDiv project. This evaluation relied on a multidisciplinary approach combining macroinvertebrate sampling, detailed mapping of river mosaics, and the use of drones for visible and thermal imaging. This integrative approach provides concrete opportunities to enhance the adaptive and sustainable management of aquatic refuges, particularly in a context where their vulnerability to growing pressures raises critical concerns.

#### MOTS CLÉS

Biodiversité, changements globaux, écosystèmes d'eau douce, refuges aquatiques, résilience

Aquatic refuges, biodiversity, freshwater ecosystems, global change, resilience

## 1 INTRODUCTION

Les écosystèmes d'eau douce figurent parmi les plus vulnérables aux impacts croissants des changements globaux, tels que les sécheresses prolongées, les crues extrêmes et la fragmentation des habitats aquatiques (Dudgeon et al., 2006). Ces perturbations compromettent la biodiversité ainsi que des fonctions essentielles des écosystèmes, comme la régulation des cycles hydrologiques et la production primaire, et sont souvent exacerbées par des pressions anthropiques telles que l'urbanisation et l'intensification agricole (Le Quesne et al., 2010). Dans ce contexte, les refuges aquatiques apparaissent comme des éléments clés pour amortir les effets des perturbations, en offrant des conditions favorables à la persistance des organismes aquatiques en période de stress, et jouent ainsi un rôle central dans la résilience écologique (Vander Vorste et al., 2020). Pourtant, leur définition et leur caractérisation restent lacunaires mais tend à se définir pour le soutien à la biodiversité dans un contexte de changement global selon trois composantes proposées par Selwood & Zimmer, 2020 : « the place, the threat, the biota ». L'absence d'une vision intégrative liant données biotiques et abiotiques freine également la compréhension systémique des interactions entre les espèces et leur environnement. Ce travail vise à combler ces lacunes par une double approche : une revue systématique rigoureuse pour structurer les connaissances existantes et des campagnes de terrain novatrices pour valider les hypothèses. Le bassin versant de la Lauter, avec ses données biotiques, abiotiques et visuelles issues de l'imagerie drone, constitue un cadre idéal pour développer un cadre opérationnel permettant d'identifier et de caractériser les refuges aquatiques dans un contexte de changements globaux.

## 2 METHODOLOGIE

### 2.1 Revue systématique : structurer les connaissances sur les refuges aquatiques

La stratégie de recherche pour la revue systématique s'appuie sur le cadre « PECO » (Population, Exposition, Comparateur, Objectif), reconnu pour sa rigueur et sa transparence (James et al., 2016 ; Siddaway et al., 2019). Cette approche a permis d'articuler les recherches autour de la question : quelle est l'importance des refuges aquatiques pour la résilience des écosystèmes lotique face aux perturbations ? La population cible inclut les écosystèmes d'eau douce vulnérables aux perturbations climatiques (Population), telles que sécheresses et crues amplifiées par le changement climatique (Exposition). Les comparaisons se basent sur les réponses des taxons aquatiques étudiés – de l'espèce à la communauté (Comparateur) – afin d'évaluer l'effet des zones refuges sur la résilience des écosystèmes (Objectif). Une stratégie itérative a permis d'identifier un corpus de 522 publications pertinentes grâce à une combinaison de termes spécifiques (e.g., « freshwater », « resilient\* », « refug\* ») et d'exclusions ciblées, optimisant la pertinence des résultats tout en soulignant des lacunes méthodologiques (Fig. 1). Les données extraites ont été organisées dans un tableau bibliométrique structuré selon les axes du milieu étudié (« the place »), des menaces identifiées (« the threat ») et des taxons concernés (« the biota ») (Selwood & Zimmer, 2020). Cette structure a permis d'analyser les typologies de refuges, les indicateurs utilisés pour leur identification, et leur rôle dans le maintien de la biodiversité.

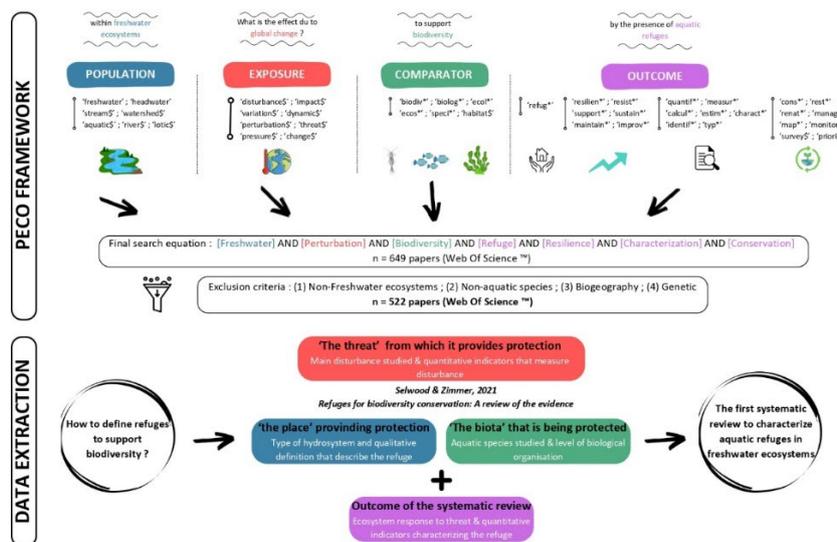


Figure 1 : Stratégie de recherche : PECO FRAMEWORK

## 2.2 Campagnes de terrain : caractériser les refuges dans un bassin versant de référence

Les campagnes de terrain menées dans le bassin versant de la Lauter ont permis de valider l'hypothèse selon laquelle les refuges aquatiques soutiennent les espèces et offrent des conditions environnementales stables face aux perturbations extrêmes liées au changement global. Ce site, intégré au programme transfrontalier Interreg RiverDiv, a été sélectionné en raison de sa forte variabilité hydrologique, porté par l'Université de Landau (Rheinland-Pfälzische Technische Universität) et en partenariat avec l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, l'Université de Strasbourg et l'Université de Freiburg (Albert-Ludwigs-Universität). Le protocole I2M2 a été utilisé pour échantillonner les communautés d'invertébrés aquatiques et évaluer leur diversité spécifique en réponse aux perturbations. Parallèlement, des mesures abiotiques (température, oxygène dissous) et des cartographies d'habitats ont permis de caractériser l'hétérogénéité des substrats et la stabilité hydrologique. Une innovation majeure réside dans l'utilisation de drones équipés de caméras visibles et thermiques pour cartographier les paysages aquatiques aux points de prélèvement et identifier des traits optiques (e.g., densité de végétation, gradients thermiques), essentiels pour détecter les refuges thermiques (Dugdale et al., 2019 ; Kuhn et al., 2021). En croisant ces données biotiques, abiotiques et visuelles, cette approche fournit une base robuste pour caractériser les interactions entre refuges et taxons.

## 3 RESULTATS

### 3.1 Analyse quantifiée de la revue systématique

Sur un corpus de 522 articles, une analyse bibliographique exploratoire avec le logiciel KH Coder 3 a permis d'identifier les principales thématiques associées aux refuges aquatiques et leurs modalités de caractérisation. Le cluster dominant concerne les habitats physiques, principalement étudiés pour les populations de poissons. Le terme « refuge » est majoritairement lié à des aspects biotiques, notamment les espèces, plutôt qu'à des indicateurs abiotiques, soulignant un manque de connaissances sur la caractérisation physique des refuges. Les thèmes récurrents incluent les refuges thermiques et le changement climatique, tandis que les échelles spatio-temporelles restent sous-étudiées. Les notions d'« identification » et de « conservation » sont mises en avant, mais manquent souvent d'une étape préalable de « caractérisation ». L'analyse chronologique révèle trois grandes périodes dans l'évolution des recherches. Dans les années 2000, les recherches se concentrent sur les réponses des écosystèmes et les dynamiques de population face aux perturbations. La décennie 2010 marque l'apparition des premières études spécifiques sur les refuges (thermiques, zones humides, sécheresses, échelles spatio-temporelles). Plus récemment, l'accent a été mis sur le changement climatique et le rôle des refuges dans la gestion adaptative des écosystèmes aquatiques, montrant leur importance face aux pressions croissantes. Une analyse quantitative sur un échantillon de 100 articles a identifié 18 paramètres abiotiques et 15 biotiques comme indicateurs du potentiel refuge. Parmi les paramètres abiotiques figurent par exemple, la profondeur, la température, l'oxygène dissous et la granulométrie du substrat, tandis que les paramètres liés à la végétation, comme la densité végétale ou la présence de ripisylves, sont également prépondérants. Les paramètres biotiques incluent, entre autres, la présence d'espèces invasives ou d'espèces ingénieurs. Les protocoles de terrain appliqués au bassin versant de la Wieslauter intègrent plus de 60 % des indicateurs identifiés dans la littérature. Par ailleurs, les technologies émergentes, telles que l'imagerie par drone, pourraient améliorer la détection et la caractérisation des refuges, notamment des refuges thermiques (Fig. 2). Enfin, l'analyse sémantique distingue deux grandes catégories de refuges : les « refuges », zones offrant des conditions stables à court terme (e.g., « cold water refuges »), et les « refuges », permettant la persistance des espèces sur des périodes évolutive beaucoup plus longues (e.g., « climatic refuges »). Ces distinctions mettent en lumière des perspectives complémentaires pour la conservation des écosystèmes aquatiques face aux pressions globales.

### 3.2. Bilan initial des données collectées en 2024

Les campagnes de terrain réalisées en 2024 dans le bassin versant de la Wieslauter ont permis de collecter des données essentielles pour caractériser les refuges aquatiques au niveau de 5 stations d'études. Les résultats confirment l'existence de hotspots de biodiversité, où les espèces aquatiques profitent de conditions favorables, renforçant leur rôle critique dans le maintien de la biodiversité face au changement global. Les premiers résultats de l'analyse des communautés de macro-invertébrés sur deux stations : LAUT02 (amont) et LAUT05 (aval) révèle un gradient écologique marqué. À LAUT02, 50 taxons ont été identifiés, dont 1074 individus d'Éphéméroptères, Plécoptères et Trichoptères (EPT), reflétant un très bon état écologique (I2M2 = 0,74). Ces espèces bénéficient de substrats variés et de conditions physico-chimiques optimales (oxygène dissous élevé, courant modéré). En aval, à LAUT05, la richesse spécifique diminue à 41 taxons, et l'abondance totale d'EPT chute à 302 individus. Cette diminution est liée aux pressions anthropiques accrues (pollution organique, urbanisation) et à une

homogénéité des substrats, avec un état écologique bon mais diminué ( $I2M2 = 0,62$ ). Les indices biologiques (e.g., polyvoltinisme 0,72 contre 0,60 en aval) confirment une meilleure résilience des communautés en amont. La cartographie des habitats a également révélé une grande diversité écologique entre les stations. Par exemple, à LAUT05, une forte hétérogénéité des substrats et une densité élevée d'habitats rares témoignent d'une grande complexité écologique, tandis que LAUT04 présente une configuration plus homogène, traduisant un gradient environnemental le long du cours d'eau. L'analyse en composantes principales (ACP) a identifié trois paramètres environnementaux clés structurant les habitats : le substrat dominant, la température moyenne de l'eau et l'oxygène dissous. Une relation inverse entre température et oxygène souligne l'importance des zones ombragées pour maintenir des conditions favorables à la biodiversité. Enfin, les technologies d'imagerie visible et thermique par drone apportent de nouvelles perspectives pour affiner la caractérisation des habitats. L'imagerie visible met en évidence l'hétérogénéité des substrats et de la végétation aquatique, tandis que l'imagerie thermique permet de localiser les refuges thermiques (Fig. 2). Sur cet exemple à LAUT01, des zones froides (7 °C, en violet) sont potentiellement associées à des apports d'eau souterraine ou au rôle de la ripisylve, tandis que les zones plus chaudes (jusqu'à 13,9 °C, en rouge) traduisent une exposition solaire accrue.

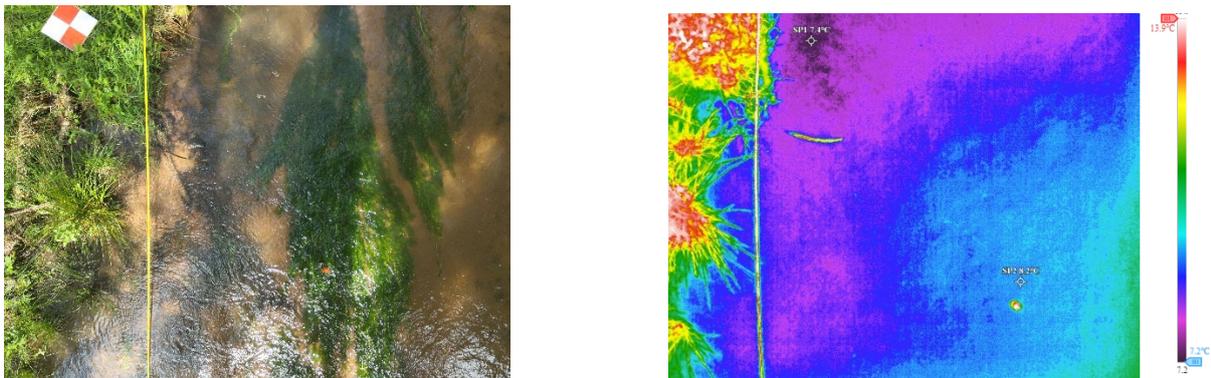


Figure 2 : Photographie visible et thermique d'un paysage aquatique au point de prélèvement d'invertébrés sur la station à LAUT01 (amont)

#### 4 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

L'analyse bibliométrique a révélé une diversité terminologique importante pour définir les refuges aquatiques (e.g., « refuges », « hydrologic refuges », « climate change refuges »), reflétant un manque de consensus qui limite l'élaboration de stratégies de conservation ciblées (Morelli et al., 2020). Cependant, certaines catégories émergent, telles que les refuges hydrologiques, caractérisés par leur stabilité environnementale en réponse à des perturbations comme les sécheresses (Lake, 2003), ou les refuges biologiques, qui réduisent les pressions biotiques comme la compétition (Boon et al., 2023). Les refuges thermiques, définis par des gradients thermiques réduits, se révèlent essentiels pour les taxons thermosensibles dans un contexte de réchauffement climatique (Sullivan et al., 2021). Les campagnes de terrain dans le bassin versant de la Lauter confirment l'importance des habitats structurés pour la résilience des communautés d'invertébrés. Les zones présentant une stabilité hydrologique et des substrats diversifiés soutiennent des bioindicateurs sensibles (EPT), tandis que des gradients thermiques faibles, souvent associés à des ripisylves denses ou à des substrats ombragés, favorisent la persistance des taxons thermosensibles (Dugdale et al., 2019). Les données thermiques collectées via drones ont révélé des microclimats stables critiques en période de stress thermique et des variations fines souvent invisibles avec des méthodes classiques, renforçant l'idée que les refuges aquatiques reposent sur une combinaison d'interactions abiotiques et biotiques. Enfin, ces travaux ont également une dimension méthodologique souhaitant évaluer l'intérêt des outils modernes tels que l'imagerie drone pour identifier et cartographier rapidement les refuges à des échelles étendues, réduisant les efforts de terrain. Ces travaux visent à appuyer les stratégies de conservation et de restauration, en valorisant les refuges aquatiques comme levier essentiel d'adaptation aux défis écologiques du 21<sup>e</sup> siècle.

**BIBLIOGRAPHIE**

- Boon, J. S., Keith, S. A., Exton, D. A., & Field, R. (2023). The role of refuges in biological invasions: A systematic review. *Global Ecology and Biogeography*, 32(8), 1244–1271.
- Dudgeon, D., et al., (2006). Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, 81(2), 163–182.
- Dugdale, S. J., Kelleher, C. A., Malcolm, I. A., Caldwell, S., & Hannah, D. M. (2019). Assessing the potential of drone-based thermal infrared imagery for quantifying river temperature heterogeneity. *Hydrological Processes*, 33(7), 1152–1163.
- James, K. L., Randall, N. P., & Haddaway, N. R. (2016). A methodology for systematic mapping in environmental sciences. *Environmental Evidence*, 5(1), 1-13.
- Kuhn, J., Casas-Mulet, R., Pander, J., & Geist, J. (2021). Assessing Stream Thermal Heterogeneity and Cold-Water Patches from UAV-Based Imagery: A Matter of Classification Methods and Metrics. *Remote Sensing*, 13(7), 1379.
- Lake, P. S. (2003). Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters. *Freshwater Biology*, 48(7), 1161–1172.
- Le Quesne, T., et al., (2010). *Flowing Forward: Freshwater Ecosystem Adaptation to Climate Change in Water Resources Management and Biodiversity Conservation*. World Bank and WWF Report.
- Morelli, T. L., Barrows, C. W., Ramirez, A. R., Cartwright, J. M., Ackerly, D. D., Eaves, T. D., ... & Thorne, J. H. (2020). Climate-change refuges: Biodiversity in the slow lane. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(5), 228–234.
- Selwood, K. E., & Zimmer, H. C. (2020). Refuges for biodiversity conservation: A review of the evidence. *Biological Conservation*, 245, 108502.
- Siddaway, A. P., Wood, A. M., & Hedges, L. V. (2019). How to do a systematic review: A best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. *Annual Review of Psychology*, 70(1), 747–770.
- Sullivan, C. J., Vokoun, J. C., Helton, A. M., Briggs, M. A., & Kurylyk, B. L. (2021). An ecohydrological typology for thermal refuges in streams and rivers. *Ecohydrology*, 14(5), e2295.
- Vander Vorste, R., Obedzinski, M., Nossaman Pierce, S., Carlson, S. M., & Grantham, T. E. (2020). Refuges and ecological traps: Extreme drought threatens persistence of an endangered fish in intermittent streams. *Global Change Biology*, 26(7).