
Rapport de stage individuel

4^{ème} année

Étude bibliographique des débits biologiques pour les macroinvertébrés

SARL RIVE
11 Quai Danton
37500 Chinon

Tuteur entreprise :
François Colas

Alan Fritsch
IMA

Tuteur académique :
Michel Bacchi

2022-2023

SOMMAIRE

Définitions	4
1. INTÉRÊT DES DÉBITS BIOLOGIQUES	5
1.1. Définition	5
1.2. Importance du débit pour les écosystèmes d'eau douce	5
2. MÉTHODES DE DÉBITS BIOLOGIQUES.....	6
2.1. Méthode de détermination des débits biologiques	6
2.2. Méthode de calcul des débits biologiques.....	6
2.3. Limites actuelles.....	7
3. APPLICABILITÉ DES DÉBITS BIOLOGIQUES AUX MACROINVERTEBRÉS BENTHIQUES	8
3.1. Intérêt des macroinvertébrés pour une étude de débit biologiques	8
3.2. Difficultés liées au macroinvertébrés	8
3.3. Analyse de méthodes récentes	9
3.3.1. Une méthode polonaise basée sur le BMWP (Kedzior et al., 2017).....	9
3.3.2. Une méthode Tchèque pour les cours d'eau urbanisés (Dana et al., 2017).....	10
3.3.3. Une méthode basé sur des algorithmes « Fuzzy-logic » (Theodoropoulos et al., 2018a)	10
3.3.4. Une méthode holistique anglaise basé sur des scénarios (Hough et al., 2019)	11
3.3.5. Une méthode adaptée à la plaine alluviale (Pander et al., 2019)	12
3.3.6. Une méthode s'appuyant sur la qualité de l'eau (Sedighkia et al., 2023)	12
Bibliographie.....	15
Tables des figures	18
Tables des tableaux.....	18

RÉSUMÉ

L'étude des débits biologique connaît un intérêt croissant dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de raréfaction de la ressource en eau. Les méthodes actuelles utilisent généralement des cibles biologiques pour calculer ces débits biologiques. Historiquement, les cibles biologiques de ces études étaient les poissons par leur intérêt économique et culturel. L'utilisation des macroinvertébrés en tant que cible de ces études est très récente et reste très marginale. Ce travail a pour but de faire une synthèse sur les études récemment développées sur ce sujet en faisant état des méthodes et paramètres utilisés.

ABSTRACT

Environmental flows science have been increasingly needed in the context of climate change and water scarcity. Current methods usually make use of biological target to calculate those environmental flows. Historically, fish were the main biological targets because of their economical and cultural benefits. Nevertheless, macroinvertebrates have been used recently as biological targets but those studies remain marginal. This work aims to summarise recent environmental flow methodologies on this topic by highlighting methods and variables.

REMERCIEMENTS

Ce stage touchant à sa fin, je remercie Michel de m'avoir permis de faire ce stage et de découvrir sur de nombreux aspects de la vie en bureau d'étude.

Je tenais également à remercier tous les membres de la S.A.R.L. Rive que j'ai pu rencontré lors de ce stage. Je les remercie grandement de leur patience, leur bonne humeur et leurs précieux conseils qui m'ont été d'une grande aide.

Je souhaite bonne continuation à tout ceux qui auront l'occasion de lire ces lignes et j'espère que nos routes se recroiseront un jour !

DEFINITIONS

- **Armure (sédimentologie)** : Sédiments grossiers qui ne sont transportés que lors de crues et qui protège de l'érosion les sédiments qu'ils recouvrent.
- **Bassin versant** : Unité géographique hydrologiquement close
- **Benthique** : Vivant à proximité du fond d'un écosystème aquatique
- **Incision du lit** : Enfoncement généralisé d'un cours d'eau
- **Indice EPT** : Proportion d'éphéméroptères, plécoptères et de trichoptères parmi une population
- **Macroinvertébré** : invertébré d'une taille supérieure à 0,5mm
- **Mésohabitat** = zone où une espèce peut être observée la plupart de la journée. Il vise à approximer l'habitat fonctionnel d'une espèce. (*Parasiewicz, 2007*)
- **Microhabitat** = échelle spatiale assez fine pour refléter l'environnement instantané des organismes
- **Oxbow lake** : Lac formé par un recoupement de méandres suivi d'une déconnexion du cours d'eau
- **Plaine alluviale** : Espace dans laquelle l'eau déborde lors de crues.
- **Préférence trophique** : Concentration en nutriments optimale pour le développement d'un organisme
- **Recovery** : temps nécessaire aux populations pour se remettre d'une perturbation
- **Surface Pondérée Utile** = surface disponible pour une espèce ou une population en fonction du débit (*Caletkova, 2007*)
- **Traits écologiques** = attributs d'un organisme relié de manière fonctionnelle à des conditions environnementales (*Poff et al., 2017*)

Fuzzy-Logic :

- Contrairement à une logique binaire, la valeur des variables n'est pas de 0 ou de 1, mais est maintenant comprise entre 0 et 1
- En décrivant les variables en différents ensembles, chaque variable obtient un degré d'appartenance à cet ensemble. (les variables dépendantes étant les variables et les variables indépendantes les ensembles)

ex: Si la largeur = faible ET vitesse = élevée ET substrat = sable ALORS abondance = faible

1. INTÉRÊT DES DÉBITS BIOLOGIQUES

1.1. Définition

La définition de débit biologique, également appelé débit écologique, a évolué avec du milieu du 20^{ème} siècle jusqu'à nos jours. Décrit au départ comme un débit minimum permettant la survie de la plupart des espèces aquatiques (Tennant, 1976), les débits biologiques ne sont désormais plus seulement des débits minimaux et prennent en compte les écosystèmes de manière plus large, incluant notamment les usages humains (Acreman et Dunbar, 2004). Lamouroux et al. les ont définis en 2018 comme « la quantité, la saisonnalité et la qualité des débits nécessaire à la durabilité des écosystèmes d'eau douce [...] ainsi qu'aux besoins et au bien être des hommes qui dépendent de ces écosystèmes » (traduit de la Déclaration de Brisbane, 2007).

Le concept de débit biologique repose sur l'importance du débit hydrologique d'un cours d'eau, son altération entraînant une réponse écologique importante. Ainsi une étude de débit biologique a pour but l'identification et la quantification des liens entre processus hydrologiques et différentes variables biologiques (Poff et al., 2017). Dans un contexte de réchauffement climatique et de surexploitation de la ressource en eau, ces études ont connu un intérêt croissant au début du 21^{ème} siècle, notamment en Europe avec la Directive Cadre sur l'Eau (Kedzior et al., 2017).

1.2. Importance du débit pour les écosystèmes d'eau douce

Le débit joue un rôle majeur dans la structure et dans la temporalité des changements au sein des écosystèmes d'eau douce. Il détermine la morphologie (par érosion et dépôt des sédiments), les conditions hydrauliques du cours d'eau et ainsi conditionne les habitats disponibles. Une hétérogénéité des débits favorise donc la diversité des habitats dans un milieu (Hough et al., 2019). Le débit est également un facteur important de la température et l'oxygénation des cours d'eau (Kedzior et al., 2022). Dans de nombreux cas, la perturbation des débits naturels favorise le succès de certaines espèces non-natives (Dana et al., 2017).

L'impact des événements hydrologiques (étiages et crue) est également à prendre en compte, selon leur intensité, fréquence et leur durée. Bien qu'ils surviennent naturellement, les étiages de forte intensité ou de longue durée sont très dommageable pour biodiversité. Ils conduisent à une dégradation des habitats, une densification des populations (étant contraintes dans un plus faible volume d'eau), une déconnexion avec la ripisylve et une hausse significative de la température de l'eau (Tennant, 1976). Le débit moyen n'est pas non plus à négliger, ayant une importance cruciale dans la dynamique sédimentaire et la migration de certains poissons, certains obstacles devenant difficilement franchissables en dehors des crues (Książek et al., 2016).

Les événements de haut débits sont également essentiels, comme décrit par le « Flood pulse concept » (Junk et al. en 1989). C'est le principal moteur de la recolonisation des milieux pour les invertébrés (Hough et al., 2019 ; Gillepsie et al., 2015). De la même manière, elle permet de renouveler le stock sédimentaire en brisant l'armure (Hough et al., 2019). De plus, elle assure la connectivité latérale du cours d'eau, permettant leur connexion temporaire aux habitats de la plaine alluviale et aux chenaux déconnectés (Poff et Zimmerman, 2010; Pander et al., 2019), permettant ainsi un échange de nutriments et de populations (Hough et al., 2019). En revanche, l'absence de forts débits dans un cours d'eau se traduit par une favorisation des espèces généralistes au détriment des espèces fluviales spécialisées (Pander et al., 2019). Il est cependant important de noter les effets négatifs d'une trop haute fréquence ou durée des événements de haut débit, conduisant par exemple à une baisse d'oxygénation dans le milieu (Książek et al., 2016) ou à une incision du lit du cours d'eau (Kedzior et al., 2017).

Bien qu'il est difficile d'établir des corrélations claires entre des réponses biologiques et des perturbations de débit (Gillepsie et al., 2015), un débit minimal est essentiel pour la pérennité et la diversité des écosystèmes fluviaux (Tennant, 1976).

2. MÉTHODES DE DÉBITS BIOLOGIQUES

2.1. Méthode de détermination des débits biologiques

Il existe deux manières de déterminer des valeurs correspondant aux débits biologiques :

- Les méthodes **basées sur un objectif** dont le but est d'obtenir une ou plusieurs valeur seuil de débit qui déclenche un état critique. Cet état critique est déterminé par l'état désiré du cours d'eau selon des critères écologiques, économiques et/ou sociaux. Ces méthodes sont parfois critiquées, la complexité des systèmes naturels rendant difficile voire impossible la détermination de seuils véritablement pertinents (Acreman et Dunbar, 2004). Par leur simplicité, elles restent néanmoins les plus répandues.
- Les méthodes **basées sur des scénarios** consistent en l'élaboration des différents scénarios possibles et d'aboutir à une discussion ou un compromis sur le scénario le plus pertinent dans le contexte donné. Ces méthodes sont plus rares à cause de leur relative nouveauté.

2.2. Méthode de calcul des débits biologiques

D'après Tharme (2003), il y a 4 principales méthodes d'évaluation des débits biologiques :

- Les **méthodes hydrologiques** estiment une valeur (ou plusieurs) seuil à partir de l'historique des débits. Elles reposent sur le postulat que le débit biologique est en lien avec le débit moyen annuel (Acreman et Dunbar, 2004). Bien que généralement simples, ces méthodes se sont complexifiées avec le temps en se basant sur l'ensemble du régime hydrologique. Bien que très facile à mettre en place, elles sont basées sur des valeurs arbitraires et ne prennent pas en compte les facteurs biotiques et l'hydromorphologie (Kedzior et al., 2017). La précision des résultats obtenus ne donne généralement qu'un ordre d'échelle et rarement des résultats véritablement exploitables.

L'exemple le plus connu est la *Méthode de Tennant* (1973). Basé une approche empirique des habitats et des traits écologiques piscicoles, il établit un seuil de débit minimal qui ne devrait pas être dépassé à 10% du débit moyen annuel et recommande fortement de rester au-dessus du seuil de 30% du débit moyen annuel. Malgré sa faible précision et le contexte nord-américain des années 1970, sa simplicité l'a conduit à être souvent utilisé en dehors de son contexte d'origine (Poff et al., 2017)

- Les **méthodes hydrauliques** et les **méthodes de simulation d'habitat** calculent les valeurs seuils à partir d'une réponse biologique associée à une perturbation hydraulique. Les réponses biologiques, difficilement quantifiables, sont approximées par l'usage de l'altération des habitats comme valeur intermédiaire (Acreman et Dunbar, 2004 ; Papadaki et al., 2017). Ainsi, ces méthodes analysent la quantité et la pertinence des habitats disponibles pour une cible biologique à différents débits (Dana et al., 2017). Les habitats sont analysés par des paramètres hydrauliques, principalement la profondeur, le substrat du cours d'eau, la vitesse du courant et les abris potentiels pour la faune.

Bien que similaire, ces deux méthodes diffèrent dans les outils utilisés. Les méthodes hydrauliques reposent sur des outils statistiques établir des corrélations (Lamoureaux et al., 2018) tandis que les méthodes de simulation d'habitats ont recours à des modélisations hydrauliques du milieu. Bien que généralement plus précises, ces dernières sont beaucoup plus complexes à mettre en place et demandent beaucoup plus de données. Ces méthodes sont adaptées à des études à petite échelle mais elles sont difficilement transférables en dehors de leur contexte d'origine. De plus, elles reposent sur une ou plusieurs espèces et ne retranscrivent pas véritablement la complexité des écosystèmes (Opperman, 2016).

- Les **Méthodes holistiques** ont pour but une approche complète prenant en compte l'intégralité du système. Cela inclut généralement hydrologie, écosystèmes et usages tout en prenant en compte la disponibilité des ressources et les processus importants écologiquement ou sociologiquement (Opperman, 2016). Basé sur plusieurs indices, ces méthodes incluent généralement des méthodes hydrologiques et une ou plusieurs méthodes hydrauliques utilisant différentes cibles biologiques (Poissons, macroinvertébrés et parfois macrophytes). Bien que beaucoup plus réaliste que les autres méthodes, elles requièrent beaucoup plus de moyens que les autres méthodes.

Méthode	Description		Cible	Avantages	Limites
Hydrologique	Calcul des débits biologiques à partir de l'historique des débits hydrologiques		Non-spécifique	- Demande relativement peu de données - Facile à mettre en œuvre	- Valeur arbitraire/déterminée par la littérature et non pas par des réponses biologiques - Ne prend pas en compte hydromorphologie et les habitats
Hydraulique	Analyse la quantité et la pertinence des habitats du cours d'eau disponible pour une ou plusieurs espèces à différents débits	Repose sur des outils statistiques pour établir des corrélations	Espèce ou un groupe d'espèce	- Meilleur équilibre entre facilité de mise en place et précision	- Ne prend en compte qu'une partie de l'écosystème - Simplification des habitats à seulement quelques variables - Applicabilité à d'autres contextes limitée
Simulation des habitats		Repose sur la modélisation des habitats à différents débits		- Bonne précision - Représentation graphique	- Besoin de beaucoup de données - Ne prend en compte qu'une partie de l'écosystème - Applicabilité à d'autres contextes limitée
Holistique	Agrégation de plusieurs indices environnementaux et/ou sociaux afin prendre en compte la complexité des écosystème		Plusieurs composantes écologiques simultanément	- Représentation de l'écosystème plus réaliste	- Difficile à mettre en place - Besoin de beaucoup de données - Interprétation de l'indice plus complexe - Applicabilité à d'autres contextes limitée

Tableau 1 - Récapitulatif des 4 méthodes d'estimation des débits biologiques

Du fait de leur diversité, les méthodes de débits biologiques sont aujourd'hui choisies selon le contexte de l'étude et les moyens mis à disposition. Les méthodes hydrologiques sont principalement utilisées à des fins de précautions et pour gestion de l'eau à large échelle tandis que les méthodes holistiques sont généralement réservées à l'identification et à la quantification des pressions locales appliquées aux écosystèmes (Poff et al., 2017).

2.3. Limites actuelles

La plupart des méthodes ayant recours à de la modélisation, les limites actuelles de celle-ci affectent fortement les débits biologiques. Selon Levins (1966), la modélisation des populations et des habitats requiert trop de paramètres qui sont pour la plupart difficilement quantifiable. Même en disposant de données solides de ces paramètres, la complexité des écosystèmes rendrait impossible l'élaboration d'équations retranscrivant efficacement la réalité. Une modélisation se doit donc d'être une approximation en conservant seulement les facteurs essentiels. À cause de ces facteurs, il est impossible de maximiser le réalisme (fidélité au phénomène observé), la précision (exactitude de la donnée) et la transférabilité (applicabilité à d'autres contextes) du modèle (Levins, 1966). La plupart des études se consacrent à la précision et au réalisme afin de garantir un modèle pertinent localement au détriment de la transférabilité, conduisant à de fortes incertitudes lors d'applications spatialement ou temporellement distantes de l'étude d'origine (Papadaki et al., 2017).

Il est également difficile d'établir des corrélations entre altération de débits et une réponse biologique particulière qui y est associée. Bien qu'on observe systématiquement une réaction à ces perturbations, aucune tendance générale claire n'a été remarquée (Gillepsie et al., 2015). En l'absence de cette relations de cause à effet, cela donne lieu à une grande marge d'interprétation de ces interactions hydrologie-biocénose et nuit non-seulement à la pertinence du modèle (Acreman et Dunbar, 2004) mais également à sa transférabilité (Poff et al., 2017).

Encore aujourd'hui, la plupart des méthodes se reposent sur le paradigme du "débit naturel", considérant l'hydrologie historique « naturelle » comme les conditions optimales des écosystèmes (Senent-Aparicio et al., 2021). Le climat et les populations ont fortement évolués avec le temps et il est anachronique de considérer les conditions historiques comme les plus appropriées (Poff et al., 2017).

3. APPLICABILITÉ DES DÉBITS BIOLOGIQUES AUX MACROINVERTEBRÉS BENTHIQUES

Historiquement, les méthodes de débits biologiques ne prenaient en compte que les populations piscicoles. Malgré cela, ils étaient parfois pris en compte marginalement par le biais des poissons ou à l'aide d'indicateurs intermédiaires, par exemple en maintenant la présence de radiers (*Książek et al.*, 2016). Récemment, les auteurs ont émis la volonté d'une prise en compte plus complète des écosystèmes comme le témoigne le développement de méthodes holistiques (*Poff et al.*, 2017), notamment par le développement de nouvelles méthodes ou l'adaptation de méthode préexistantes pour les macroinvertébrés benthiques.

3.1. Intérêt des macroinvertébrés pour une étude de débit biologiques

Les macroinvertébrés benthiques vivent dans tout écosystème aquatique, qu'il s'agisse de cours d'eau fortement pollués ou de cours d'eau de source non piscicole. Cette omniprésence est due à leur petite taille, leur grande variété et la forte tolérance de certaines espèces aux perturbations (*Dana et al.*, 2017). Cette variété abrite également un large spectre de préférences trophiques et de préférence d'habitat (*Van Broekhoven et al.*, 2016). Certaines de ces préférences d'habitats sont disponibles dans la littérature, tel que la distribution de certaines population selon un gradient de vitesse, facilitant la mise en place de relation entre débit et réponses biologiques (*Wegscheider et al.*, 2023).

Les variables hydrauliques nécessaires à la qualification des habitats des macroinvertébrés sont moins nombreuses que celle utilisées pour l'ichtyofaune. La hauteur d'eau est un facteur négligeable pour ces populations et les abris potentiels sont impossible à quantifier à l'échelle du microhabitat (*Hough et al.*, 2019). Les variables pertinentes sont donc réduites au substrat et la vitesse de courant, simplifiant ainsi les calculs d'habitat.

Un autre facteur notable est leur déplacement limité qui permet de les considérer comme fixe à l'échelle d'une rivière (*Dana et al.*, 2017). Contrairement à certains poissons, ils n'ont donc pas la capacité de fuir localement les perturbations du milieu (*Van Broekhoven et al.*, 2016). Leur court cycle de vie permet d'observer une réponse biologique rapide aux perturbations (*Dana et al.*, 2017). De la même manière, leur temps de « recovery » est très rapide chez les invertébrés, permettant une évolution rapide des populations. L'étude de débits biologiques adaptées aux invertébrés pourraient donc être utilisées en cas de perturbations à une échelle spatio-temporelle plus réduite que celle concernant les poissons (*Hough et al.*, 2019).

3.2. Difficultés liées au macroinvertébrés

La mise en place de méthode de débits biologiques fait face à certaines difficultés, notamment l'aggrégation d'habitats multiples. Les populations piscicoles vivent à l'échelle du mésohabitat, un tronçon contient donc un seul même peuplement. Les macroinvertébrés vivent à l'échelle du microhabitat à cause de leur faible mobilité. Un tronçon, contenant plusieurs microhabitats, a donc plusieurs peuplements d'invertébrés, rendant l'interprétation des certains indices est donc plus complexe.

De plus, à l'inverse des espèces piscicoles, il n'y a pas de véritable guildes, la répartition de chaque espèce se faisant de manière continue selon un gradient, complexifiant l'analyse en l'absence de groupes indicateurs pertinents (*Michel Bacchi*, transmission orale, 2023).

Malgré une documentation relativement complète sur les habitats des macroinvertébrés benthiques, leurs préférences semblent varier non seulement selon leur contexte géographique mais également selon la saison (*Szałkiewicz et al.*, 2022). Cette variabilité pourrait être compensée à l'aide d'une normalisation par site ou par métrique (*Theodoropoulos et al.*, 2018a).

Finalement, le faible nombre d'étude sur le sujet limite le développement de ces études et les comparaisons possibles entre les méthodes (*Gillepsie et al.*, 2015, *Theodoropoulos*, 2018b). L'effervescence des méthodes holistiques permet néanmoins l'inclusion progressive des macroinvertébrés dans des études et pourrait à terme donner plus de visibilité à ces études.

3.3. Analyse de méthodes récentes

Bien qu'elles soient toujours marginales en comparaison des études destinées aux poissons, plusieurs méthodes concernant les macroinvertébrés ont été publiées ces 6 dernières années. Le fonctionnement des écosystèmes étant similaires à ceux des cours d'eau français, seule les méthodes développées en Europe ont été retenues.

3.3.1. Une méthode polonaise basée sur le BMWP (Kedzior et al., 2017)

Cette méthode a été conçue à partir d'une étude sur les cours d'eau de montagne en Pologne. Les variables hydrauliques retenues pour la détermination des débits biologiques sont la **vitesse du courant** et la **hauteur d'eau**. Les réponses biologiques sont approximées par le score **BMWP** (Biological Monitoring Working Party), un indicateur biologique basé sur la présence de familles de macroinvertébrés et leur polluosensibilité (Hawkes, 1998). La relation entre les habitats et l'indice BMWP est établie par un **modèle additif généralisé** (GAM), un modèle statistique permettant de calculer des relations probables entre variables dépendantes biotiques et variables indépendantes hydrauliques (Fig. 1). À l'aide de la procédure AIC (Akaike Information Criterion), le modèle le plus probable est ensuite sélectionné. La combinaison des variables hydrauliques ayant une note de BMWP suffisante est donc considérée comme état optimal.

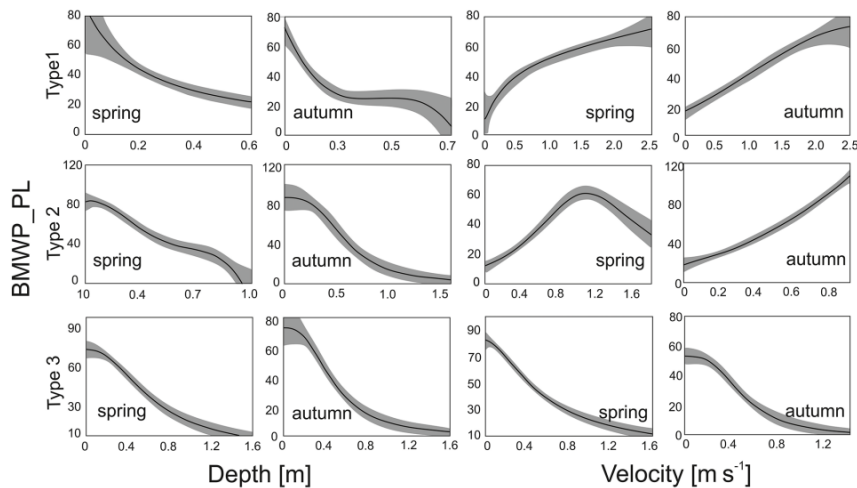


Figure 1: Courbe de l'indice BMWP en fonction des variables hydrauliques selon les saisons et les types de cours d'eau échantillonnés (Kedzior et al., 2017)

La modélisation hydraulique est simulée à l'aide **CCHE2D**, un modèle 2D dit « depth-averaged » (utilisant simplification de l'équation de Reynolds). En utilisant les couples de variables hydrauliques considérée comme « état optimal », les surface pondérée utile peuvent être calculées à différents débit. La valeur critique de débit écologique est fixé au débit le plus bas correspondant à 50% de surface pondérée utile (Fig. 2).

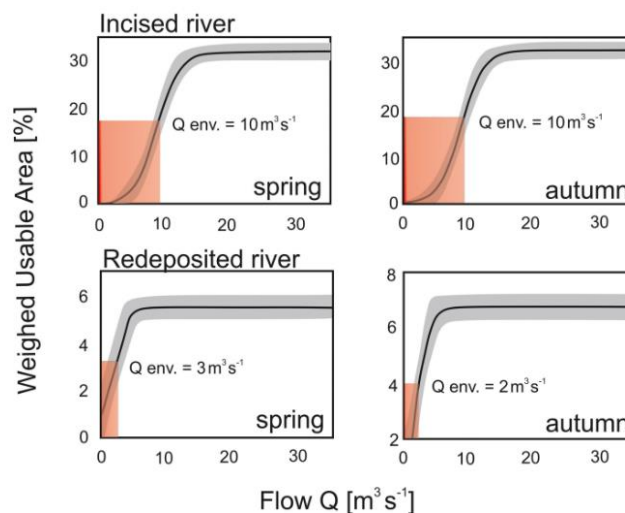


Figure 2: Courbe de la surface pondérée utile selon le débit et détermination de la valeur critique (Kedzior et al., 2017)

L'utilisation du BMWP en tant que variable biologique est fortement discutable dans le cas de cette étude. Ayant été publié en 1978 pour les pour des cours d'eau de Grande-Bretagne, la pertinence de l'indice est discutable dans le contexte géographique et temporel de l'étude. De même, l'utilisation de la hauteur d'eau à la place du substrat en tant que variable hydraulique est questionable. Néanmoins, par sa relative simplicité, cette méthode pourrait être transféré à des contextes différents en adaptant l'indice utilisé selon la localisation de l'étude.

3.3.2. Une méthode Tchèque pour les cours d'eau urbanisés (*Dana et al., 2017*)

Cette méthode de simulation d'habitat a été développée dans le but d'établir des débits biologiques dans les cours d'eaux fortement urbanisés de République Tchèque. Les réponses biologiques sont approximées par l'intermédiaire de l'**abondance relative d'espèces cibles** omniprésentes sur l'aire d'étude, tandis que les variables hydrauliques utilisées sont le **substrat** (divisé en 9 catégories), la **hauteur d'eau** et la **vitesse de courant**. Les habitats ont été modélisés à l'aide de **PHABSIM**, un logiciel originellement conçu pour les habitats piscicoles mais dont l'adaptation aux macroinvertébrés est possible.

Pour établir les relations entre les paramètres, 5 échantillonnages sur différents habitats sur 2 sites à 2 débits différents ont été prélevés sur 2 années. Les 10 espèces présentant une abondance suffisante à chaque prélèvement ont été retenues. Les données d'abondance des espèces sont converties en courbes de pertinence des habitats en fonction des variables hydrauliques pour chaque espèce. À l'aide de HABTAE, une sous fonction de PHABSIM, les courbes de la surface pondérée utile sont calculées à partir des courbes de pertinence des habitats obtenues précédemment. Cela permet de calculer le débit optimal, soit un intervalle pour lequel les surfaces pondérées utiles de chaque espèce est suffisamment haut. Le **débit biologique minimal** doit être compris entre 50 et 70% du débit optimal. Le **débit biologique maximal** correspond à au premier débit supérieur au débit optimal ayant 20% de la surface pondérée utile maximale.

Cette étude propose un cadre de méthode relativement simple et facilement adaptable à d'autres contextes. La prise en compte du débit biologique maximal est intéressant dans le cadre de cours d'eau fortement urbanisés car ils sont plus sensibles à cause du degré d'imperméabilisation des sols élevés dans ces bassins versants. Les valeurs de débits biologiques minimal peuvent être discutables par leur côté arbitraire et devraient être adaptés si le contexte de l'étude venait à changer. Également, l'utilisation de PHABSIM est considéré par certains auteurs comme problématique car il est jugé trop simpliste, inadapté dans le contexte actuel et son manque d'adaptabilité (*Railsback, 2016*).

3.3.3. Une méthode basé sur des algorithmes « Fuzzy-logic » (*Theodoropoulos et al., 2018a*)

Basé sur des algorithmes de « Fuzzy-logic », cette méthode de simulation des habitats estime le degré de relation entre les variables hydrauliques (**substrat, hauteur d'eau et vitesse de courant**) et les valeurs représentatives des réponses biologiques (**l'abondance totale, l'indice de diversité de Shannon, l'indice EPT et la richesse taxonomique**).

Afin de calibrer le logiciel 380 échantillonnage sur 9 sites de référence, les indices biologiques normalisés (divisés par la valeur maximale obtenue sur le site) sont agglomérés pour chaque échantillonnage par l'équation (1) un indice de « favorabilité de l'habitats » K_i

$$(1) \quad K_i^{j,n} = 0.4 \frac{n_i^{j,n}}{n_{\max}^{j,n}} + 0.3 \frac{H_i^{j,n}}{H_{\max}^{j,n}} + 0.2 \frac{EPT_i^{j,n}}{EPT_{\max}^{j,n}} + 0.1 \frac{\alpha_i^{j,n}}{\alpha_{\max}^{j,n}} \quad \text{Avec } n \text{ la diversité spécifique, } H \text{ l'indice de diversité spécifique, } \alpha \text{ l'abondance total, } i \text{ le microhabitat considéré et } j \text{ le site d'échantillonnage de } i$$

Les indices K_i sont séparées en 5 classes égales. Chaque microhabitat est caractérisé par les variables hydrauliques associées, également reconverties en 5 classes pour la hauteur d'eau et la vitesse de courant et 8 classes pour le substrat. Le logiciel **HABFUZZ** implémenté d'un algorithme FRB (Fuzzy Rule-based Bayesian) va créer un modèle prédictif à l'aide des relations observées entre les K_i et les variables hydraulique.

Le logiciel **TELEMAC 2D** va ensuite modéliser le cours d'eau par des nœuds et calculer un scénario de débit optimal en tenant compte de la favorabilité générale normalisée des habitats (la moyenne de tous les K_i de nœuds immergés), la connectivité des habitats (le nombre de connexions entre nodes avec $K_i > 0,6$ divisé par le nombre de noeuds immergées), la disponibilité des habitats (le nombre de nodes avec $K_i > 0,6$ divisé

par le nombre de nœuds immergées) et de la certitude de la prédiction (expliqué ci-dessous). Il est possible d'obtenir tous les scénarios de débits optimaux (OFS) à l'aide de l'équation (2)

$$(2) \text{OFS}_i = n\text{OSI}_i \times w_i \times C_i \times A_i \times \text{COP}_i$$

Avec pour chaque i : $n\text{OSI}$ la favorabilité générale normalisée des habitats, w le nombre de nœuds immergées, C la connectivité des habitats, A la disponibilité des habitats, COP la certitude de la prédiction

Après normalisation des valeurs d'OFS en les divisant par l'OFS maximal obtenu, le débit le plus faible ayant un OFS normalisé supérieur à 0,6 est considéré comme la valeur de débit biologiques.

Certitude de prédiction : Nombre de nœud ayant des combinaisons de variables hydrauliques observées lors de l'échantillonnage destiné à calibrer le modèle prédictif divisés par le nombre total de nœuds. Ainsi, elle mesure la proportion de Nœuds qui ne sont pas issus de prédiction du logiciel HABFUZZ mais d'observation réelle et qui sont donc plus certaines.

Cette méthode est particulièrement intéressante par la prise facteurs généralement négligés comme la connectivité des habitats. Les réponses biologiques prennent simultanément en compte la diversité, la sensibilité des organismes et l'abondance, ce qui est relativement rare. Dans le développement de la méthodes, de nombreuses normalisations ont été testées au profit de la plus efficace, justifiant son utilisation. Elle tient également compte de la nature incertaine des modèles prédictifs, en incluant la certitude de la précision dans le calcul.

3.3.4. Une méthode holistique anglaise basé sur des scénarios (Hough et al., 2019)

Hough et al. publient en 2019 une méthode holistique basée sur des scénarios applicables aux petits cours d'eau. Seule la partie sur les macroinvertébrés sera discuté ici. Cette méthode utilise le modèle CASiMiR pour simuler les réponses biologiques et utilise la **vitesse de courant** et l'**hétérogénéité des habitats** comme variable hydraulique, le substrat étant considéré comme négligeable dans des cours d'eau majoritairement de substratum. Les habitats sont modélisés par SRH-2D, un logiciel « depth-averaged ».

A l'aide des données de la base de données du projet STAR, 4 espèces cibles omniprésentes sur le site d'échantillonnage ont été sélectionnées. La méthode nécessite au moins une espèce pour chacune des 3 classes de vitesses préférentielles préétablies (faible, moyenne et forte). À partir de ces affinités et de la littérature, une courbe de pertinence des habitats est définie pour les 3 espèces puis implémentée dans CASiMiR. Les prédictions du logiciel ont ensuite été testée sur des échantillonnages de test qui se sont révélées relativement proches des abondances observées. Après calcul des surfaces pondérées utiles à l'aide de SRH-2D, une courbe de « pertinence des habitats hydraulique » en fonction du débit est obtenue pour chaque espèce en divisant les SPU obtenues par la surface mouillée totale (Fig. 3). Cette conversion a pour but d'obtenir des valeur sans dimension et ainsi plus intuitive car elle ne varie pas avec la taille du cours d'eau.

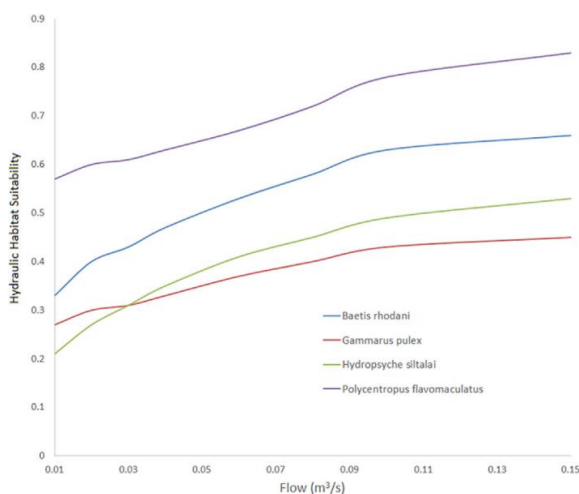


Figure 3: courbe de la pertinence des habitats hydrauliques en fonction du débit

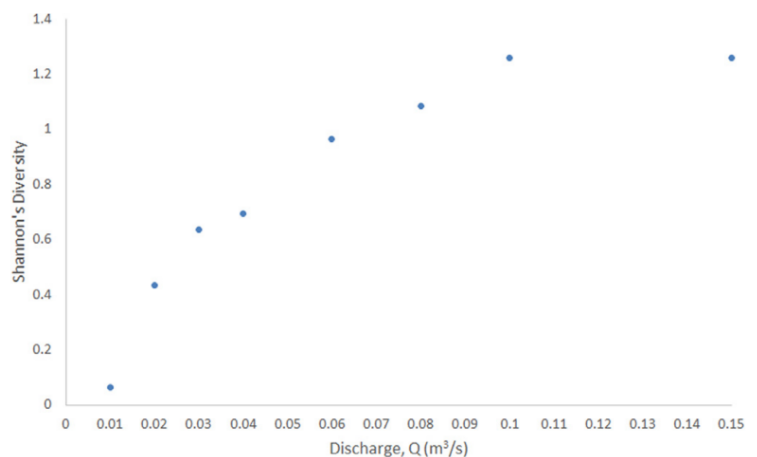


Figure 4: Courbe de l'hétérogénéité des habitats en fonction du débit

Afin de compléter cette analyse, un indice d'hétérogénéité des habitats basé sur l'indice de diversité de Shannon développé par *Magurran* en 2004 (republié en 2021) qui sera mis en relation avec le débit (Fig. 4). Les habitats étant ici seulement caractérisés par la vitesse, on calcule donc l'indice d'hétérogénéité à partir de 8 classes de vitesses définies par CASiMiR à l'aide de l'équation (3).

$$(3) H = - \sum (p \times \ln(p)) \quad \text{avec } p \text{ la proportion relative d'un habitat hydraulique (ici une classe de vitesse)}$$

Cette méthode présente plusieurs intérêt, notamment la prise en compte de la diversité des habitats, absente des autres méthodes présentées dans ce travail. Malgré cela, les auteurs sont critiques de l'utilisation de l'indice de Shannon par sa nature relative pour retranscrire la diversité réelle. Ils observent certaines valeurs incohérentes dans les courbes d'habitats, témoignant également de la difficulté d'établir des liens entre débit et réponse biologiques. L'approche basée sur des scénarios est finalement intéressante, permettant d'observer directement les courbes des différents indices et leurs points d'inflexion.

3.3.5. Une méthode adaptée à la plaine alluviale (*Pander et al., 2019*)

L'étude de *Pander et al. (2019)* publie une méthode holistique a pour but d'estimer le débit biologique nécessaire au fonctionnement de la plaine alluviale du Danube. La méthode prenant également en compte poissons et macrophytes, seule la partie sur les macroinvertébrés sera discuté ici. Les crues étant les principaux évènement affectant les plaines alluviales, **le débit des crues précédentes** est la seule variable hydraulique prise en compte. Les réponses biologiques seront approximées par l'**abondance totale** et la **richesse taxonomique** des macroinvertébrés échantillonnés séparément entre 3 habitats : les mares de la plaine alluviales, les oxbow-lakes et dans le cours d'eau. A l'aide d'une analyse multivariée, une courbe retraçant la diversité et l'abondance en fonction de l'intensité du débit de crue dans chacun des 3 habitats.

Cette méthode a été construite spécifiquement pour estimer les débits de crues nécessaires à la faune et la flore de la plaine alluviale, elle est donc difficilement applicable aux cours d'eau de par le simple choix de la variable hydraulique.

3.3.6. Une méthode s'appuyant sur la qualité de l'eau (*Sedighkia et al., 2023*)

Prenant en compte les populations poissons, les macroinvertébrés, les macrophytes, les potentielles zones de frayères, la géomorphologie, nappes souterraines et les demandes locales en eau, cette méthode holistique est relativement différentes des études vues jusqu'à présent. Pour chacune des composantes de l'écosystème citées ci-dessus, elle élabore un scénario optimal. Elle utilise ensuite un algorithme de **MOPSO** (Multi-Objective Particle Swarm Optimisation) qui va déterminer la solution la moins dommageable pour chaque composant. En revanche, la simulation des habitat ne concerne que les populations piscicoles et est réalisée à partir du logiciel **HEC-RAS 1D**.

Bien que visant à déterminer un débit, les macroinvertébrés sont pris en compte par l'intermédiaire de paramètres physico-chimique auxquelles ils sont sensibles et pour lesquels une modélisation est possible. La température de l'eau et l'oxygène dissous en fonction de la distribution de la « population normalisé de macroinvertébrés », ce qui peut être interprété comme l'abondance totale divisé par la population maximale obtenue (aucune explication claire n'étant donné quant à cette nomination). À l'aide du logiciel ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System), l'abondance totale de macroinvertébrés est modélisée par le biais de la température et de l'oxygène dissous en fonction du débit, de l'hydrogéomorphologie et de la Pollution normalisée en amont de la zone étudiée.

Cette méthode, bien que prenant en compte de nombreux facteurs, est très simpliste dans certaines de ses approches. L'utilisation de l'abondance totale de macroinvertébrés n'est pas un indicateur pertinent de la qualité de l'eau ou des réponses biologiques car elle omet totalement la diversité spécifique. Également, les macroinvertébrés montrent des réponses biologiques aux variables hydrauliques et non pas seulement à la qualité de l'eau (*Gillepsie et al., 2015*). Finalement, la modélisation de la température de l'eau et l'oxygène dissous présenté dans cette étude a montré des résultats incertains. Par conséquent, la méthode hydraulique mise en place pour les invertébrés est difficilement exploitable.

Article	Outils utilisés	Variables hydrauliques	Métriques biologiques	Calcul du débit biologique	Domaine d'application	Contexte géographique	Critique
Kedzior et al., 2017	- GAM - CCHED2D	- Vitesse - Hauteur d'eau	- BMWP	Débit Bio=50% SPU	Moyens/Petits cours d'eau	Pologne	- Choix des variables questionnables (BMWP hors contexte, pas de prise en compte du substrat)
Dana et al., 2017	- PHABSIM	- Vitesse - Hauteur d'eau - Substrat	- n espèces cibles (présentant >100 individus)	Min=50-70% du débit optimal en termes de SPU Max= correspond à 20% SPU optimal	Cours d'eau urbanisés	République Tchèque	- Utilisation de PHABSIM questionnable - Hauteur d'eau non nécessaire
Theodoropoulos et al., 2018a	- HABFUZZ - TELEMAC 2D	- Vitesse - Hauteur d'eau - Substrat	- Richesse taxonomique - Indice de Shannon - Proportion d'EPT - Abondance totale	Débts tels que : OFS > 0,6.OFSmax	Moyens/Petits cours d'eau	Grèce	- Hauteur d'eau non nécessaire
Hough et al., 2019	- CASIMIR - SRH-2D	- Vitesse de courant - Diversité des habitats	- une espèce pour chaque classe de vitesse (forte, moyenne et faible)	Holistique	Petits cours d'eau	Angleterre	- Pas de prise en compte du substrat
Pander et al., 2019	- Analyse multivariée	- Débit des crues précédentes	- Abondance - Richesse taxonomique	Holistique	Plaine alluviale	Allemagne	- Inapplicable aux cours d'eau (Variables hydraulique absentes)
Sedighkia et al., 2023	- ANFIS - HEC-RAS 1D	Aucune (utilisation des paramètres physico-chimiques)	- Population normalisé d'invertébrés	Holistique	Bassin versant	Iran	- Variables écologiques insuffisantes - Indice invertébré négligeant totalement les paramètres hydrauliques

Tableau 2 : Récapitulatif des 6 méthodes de débits biologiques analysées

4. SYNTHÈSE

L'étude des débits biologiques revêt un intérêt certain dans un contexte de réchauffement climatique et de raréfaction de la ressource en eau. Bien que longtemps ignorés, les macroinvertébrés se révèlent être des cibles biologiques idéales pour de nouvelles méthodes par leur omniprésence, leur nature stationnaire et leur grande variété de réponses aux perturbations. Souvent par intégration dans des méthodes holistiques prenant en compte plusieurs composantes écologiques, plusieurs manières d'établir des liens entre réponses biologiques et variables hydrauliques ont été développées, le plus souvent calculant une courbe de pertinence de l'habitat hydraulique d'une cible biologique ou d'un indice représentant la réponse biologique.

Le choix des variables hydrauliques et biologiques ne font pas consensus parmi les auteurs. La plupart conservent les paramètres d'habitats historiquement utilisés (Vitesse de courant, substrat et hauteur d'eau) bien qu'ils s'accordent sur l'importance primordiale de la vitesse du courant. Le substrat est plus difficile à quantifier et est généralement exclu dans un souci de simplicité. Les variables biologiques sont bien plus diversifiées selon les études, même si rarement élaborées. L'utilisation de plusieurs indices qui retranscrivent différents paramètres de la population étudiée (abondance, diversité, sensibilité...) semble particulièrement pertinente car elle permet de répondre de manière conjointe à différentes problématiques liées aux perturbations.

Le machine learning semble montrer de bons résultats pour la modélisation des réponses biologiques, et plus particulièrement les logiciels « Fuzzy-based » (CASiMiR, HABFUZZ...). Moins précis que certains autres programmes de machine learning, ils ont montré des résultats bien plus constants avec des échantillons de données déséquilibrées (*Theodoropoulos et al.*, 2018b), plus adaptés à la nature stochastique des écosystèmes.

La plupart des études actuelles utilisent des modélisations hydrauliques 2D. Elles semblent fournir une précision suffisante, les logiciels 1D étant même suffisant voir plus efficace en simulant seulement la vitesse (*Jowett et Duncan*, 2012). Même si les modélisations 3D augmentent de manière significative la précision, elles demandent exponentiellement plus de données (*Hough et al.*, 2019). La practicalité d'une méthode est probablement un facteur important et parfois négligé.

Les méthodes élaborées jusqu'à aujourd'hui cherchent à répondre aux problématiques dans le contexte actuel des choses, malgré l'évolution actuelle du climat et l'évolution des régimes hydrologiques associés (*Poff et al.*, 2017). Les cadres méthodologiques doivent désormais évoluer afin de prendre en compte les changements auxquels les cours d'eau sont actuellement soumis plutôt que de reprendre la structure d'anciennes méthodes dont la pertinence est désormais questionable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]
[1]
H. A. Hawkes, « Origin and development of the biological monitoring working party score system », *Water Research*, vol. 32, n° 3, p. 964-968, mars 1998, doi: [10.1016/S0043-1354\(97\)00275-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00275-3).
- [2]
M. C. Acreman et M. J. Dunbar, « Defining environmental river flow requirements – a review », *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 8, n° 5, p. 861-876, oct. 2004, doi: [10.5194/hess-8-861-2004](https://doi.org/10.5194/hess-8-861-2004).
- [3]
J. Caletkova, « Determination of Ecological Flow for Macroinvertebrate Communities in Streams Affected by Urban Drainage – Case Study of Prague », *TOEBMJ*, vol. 5, n° 1, p. 56-64, déc. 2012, doi: [10.2174/1875040001205010056](https://doi.org/10.2174/1875040001205010056).
- [4]
K. Dana, C. Jana, et V. Tomáš, « Analysis of environmental flow requirements for macroinvertebrates in a creek affected by urban drainage (Prague metropolitan area, Czech Republic) », *Urban Ecosyst*, vol. 20, n° 4, p. 785-797, août 2017, doi: [10.1007/s11252-017-0649-2](https://doi.org/10.1007/s11252-017-0649-2).
- [5]
B. R. Gillespie, S. Desmet, P. Kay, M. R. Tillotson, et L. E. Brown, « A critical analysis of regulated river ecosystem responses to managed environmental flows from reservoirs », *Freshw Biol*, vol. 60, n° 2, p. 410-425, févr. 2015, doi: [10.1111/fwb.12506](https://doi.org/10.1111/fwb.12506).
- [6]
I. M. Hough, P. H. Warren, et J. D. Shucksmith, « Designing an environmental flow framework for impounded river systems through modelling of invertebrate habitat quality », *Ecological Indicators*, vol. 106, p. 105445, nov. 2019, doi: [10.1016/j.ecolind.2019.105445](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105445).
- [7]
I. G. Jowett et M. J. Duncan, « Effectiveness of 1D and 2D hydraulic models for instream habitat analysis in a braided river », *Ecological Engineering*, vol. 48, p. 92-100, nov. 2012, doi: [10.1016/j.ecoleng.2011.06.036](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.036).
- [8]
W. Junk, P. Bayley, et R. Sparks, *The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems*, vol. 106. 1989.
- [9]
R. Kędzior et al., « Macroinvertebrate habitat requirements in rivers: overestimation of environmental flow calculations in incised rivers », *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 26, n° 15, p. 4109-4124, août 2022, doi: [10.5194/hess-26-4109-2022](https://doi.org/10.5194/hess-26-4109-2022).
- [10]
L. Książek, A. Woś, J. Florek, M. Wyrębek, D. Młyński, et A. Wałęga, « Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow: Wisłoka river, Poland: case study », *Environ Monit Assess*, vol. 191, n° 4, p. 254, avr. 2019, doi: [10.1007/s10661-019-7402-7](https://doi.org/10.1007/s10661-019-7402-7).
- [11]
N. Lamouroux et al., « Débits écologiques : la place des modèles d'habitat hydraulique dans une démarche intégrée », *Hydroécol. Appl.*, vol. 20, p. 1-27, mai 2018, doi: [10.1051/hydro/2016004](https://doi.org/10.1051/hydro/2016004).
- [12]
R. LEVINS, « THE STRATEGY OF MODEL BUILDING IN POPULATION BIOLOGY », *American Scientist*, vol. 54, n° 4, p. 421-431, 1966.
- [13]

- A. E. Magurran, « Measuring biological diversity », *Current Biology*, vol. 31, n° 19, p. R1174-R1177, oct. 2021, doi: [10.1016/j.cub.2021.07.049](https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.07.049). [14]
- J. M. Nestler, R. T. Milhous, T. R. Payne, et D. L. Smith, « History and review of the habitat suitability criteria curve in applied aquatic ecology », *River Res Applic*, vol. 35, n° 8, p. 1155-1180, oct. 2019, doi: [10.1002/rra.3509](https://doi.org/10.1002/rra.3509). [15]
- J. J. Opperman, « Environmental Flows: Three-Level Approach for Developing and Implementing Environmental Flow Recommendations », in *The Wetland Book*, C. M. Finlayson, M. Everard, K. Irvine, R. J. McInnes, B. A. Middleton, A. A. van Dam, et N. C. Davidson, Éd., Dordrecht: Springer Netherlands, 2016, p. 1-5. doi: [10.1007/978-94-007-6172-8_344-1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6172-8_344-1). [16]
- J. Pander, J. Knott, M. Mueller, et J. Geist, « Effects of environmental flows in a restored floodplain system on the community composition of fish, macroinvertebrates and macrophytes », *Ecological Engineering*, vol. 132, p. 75-86, juill. 2019, doi: [10.1016/j.ecoleng.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.003). [17]
- C. Papadaki, K. Soulis, L. Ntoanidis, S. Zogaris, N. Dercas, et E. Dimitriou, « Comparative Assessment of Environmental Flow Estimation Methods in a Mediterranean Mountain River », *Environmental Management*, vol. 60, n° 2, p. 280-292, août 2017, doi: [10.1007/s00267-017-0878-4](https://doi.org/10.1007/s00267-017-0878-4). [18]
- P. Parasiewicz, « The MesoHABSIM model revisited », *River Res. Applic.*, vol. 23, n° 8, p. 893-903, oct. 2007, doi: [10.1002/rra.1045](https://doi.org/10.1002/rra.1045). [19]
- P. Parasiewicz, P. Prus, K. Suska, et P. Marcinkowski, « “E = mc2” of Environmental Flows: A Conceptual Framework for Establishing a Fish-Biological Foundation for a Regionally Applicable Environmental Low-Flow Formula », *Water*, vol. 10, n° 11, p. 1501, oct. 2018, doi: [10.3390/w10111501](https://doi.org/10.3390/w10111501). [20]
- N. L. Poff, R. E. Tharme, et A. H. Arthington, « Evolution of Environmental Flows Assessment Science, Principles, and Methodologies », in *Water for the Environment*, Elsevier, 2017, p. 203-236. doi: [10.1016/B978-0-12-803907-6.00011-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00011-5). [21]
- S. F. Railsback, « Why It Is Time to Put PHABSIM Out to Pasture », *Fisheries*, vol. 41, n° 12, p. 720-725, déc. 2016, doi: [10.1080/03632415.2016.1245991](https://doi.org/10.1080/03632415.2016.1245991). [22]
- M. Sedighkia, N. badrzadeh, Z. Fathi, A. Abdoli, et B. Datta, « An integrated simulation–optimization framework for assessing environmental flows in rivers », *Environ Monit Assess*, vol. 195, n° 2, p. 292, févr. 2023, doi: [10.1007/s10661-022-10908-w](https://doi.org/10.1007/s10661-022-10908-w). [23]
- J. Senent-Aparicio, C. George, et R. Srinivasan, « Introducing a new post-processing tool for the SWAT+ model to evaluate environmental flows », *Environmental Modelling & Software*, vol. 136, p. 104944, févr. 2021, doi: [10.1016/j.envsoft.2020.104944](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104944). [24]
- E. Szałkiewicz, T. Kałuża, et M. Grygoruk, « Environmental Flows Assessment for Macroinvertebrates at the River Reach Scale in Different Degrees of Hydromorphological Alteration », *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, p. 866526, avr. 2022, doi: [10.3389/fenvs.2022.866526](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.866526). [25]

D. L. Tennant, « Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources », *Fisheries*, vol. 1, n° 4, p. 6-10, juill. 1976, doi: [10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2).

[26]

R. E. Tharme, « A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers », *River Res. Applic.*, vol. 19, n° 5-6, p. 397-441, sept. 2003, doi: [10.1002/rra.736](https://doi.org/10.1002/rra.736).

[27]

C. Theodoropoulos, N. Skoulikidis, A. Stamou, et E. Dimitriou, « Spatiotemporal Variation in Benthic-Invertebrates-Based Physical Habitat Modelling: Can We Use Generic Instead of Local and Season-Specific Habitat Suitability Criteria? », *Water*, vol. 10, n° 11, p. 1508, oct. 2018, doi: [10.3390/w10111508](https://doi.org/10.3390/w10111508).

[28]

C. Theodoropoulos, A. Vourka, N. Skoulikidis, P. Rutschmann, et A. Stamou, « Evaluating the performance of habitat models for predicting the environmental flow requirements of benthic macroinvertebrates », *Journal of Ecohydraulics*, vol. 3, n° 1, p. 30-44, janv. 2018, doi: [10.1080/24705357.2018.1440360](https://doi.org/10.1080/24705357.2018.1440360).

[29]

E. Van Broekhoven, V. Adriaenssens, B. De Baets, et P. F. M. Verdonchot, « Fuzzy rule-based macroinvertebrate habitat suitability models for running waters », *Ecological Modelling*, vol. 198, n° 1-2, p. 71-84, sept. 2006, doi: [10.1016/j.ecolmodel.2006.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.006).

[30]

B. Wegscheider et al., « Developing environmental flow targets for benthic macroinvertebrates in large rivers using hydraulic habitat associations and taxa thresholds », *Ecological Indicators*, vol. 146, p. 109821, févr. 2023, doi: [10.1016/j.ecolind.2022.109821](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109821).

TABLES DES FIGURES

Figure 1: Courbe de l'indice BMWP en fonction des variables hydrauliques selon les saisons et les types de cours d'eau échantillonnés (Kedzior et al., 2017)	9
Figure 2: Courbe de la surface pondérée utile selon le débit et détermination de la valeur critique (Kedzior et al., 2017)	9
Figure 3: courbe de la pertinence des habitats hydrauliques en fonction du débit	11
Figure 4: Courbe de l'hétérogénéité des habitats en fonction du débit.....	11

TABLES DES TABLEAUX

Tableau 1 - Récapitulatif des 4 méthodes d'estimation des débits biologiques.....	7
Tableau 2 : Récapitulatif des 6 méthodes de débits biologiques analysées	13



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Alan
FRITSCH
2022-2023

Étude bibliographique des débits biologiques pour les macroinvertébrés

Résumé : L'étude des débits biologique connaît un intérêt croissant dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de raréfaction de la ressource en eau. Les méthodes actuelles utilisent généralement des cibles biologiques pour calculer ces débits biologiques. Historiquement, les cibles biologiques de ces études étaient les poissons par leur intérêt économique et culturel. L'utilisation des macroinvertébrés en tant que cible de ces études est très récente et reste très marginale. Ce travail a pour but de faire une synthèse sur les études récemment développées sur ce sujet en faisant état des méthodes et paramètres utilisés.

Mots Clés : Débit biologiques, Macroinvertébrés, Écologie,
Modélisation hydraulique, Habitats

SARL RIVE

11 Quai Danton

37500 Chinon

Tuteur entreprise :

François COLAS

Tuteur académique :

Michel BACCHI