UCLouvain

École polytechnique de Louvain

Développement d'un indice de qualité pour les projets de renaturation des petits cours d'eau

Auteur: **Zoé HALLARD**
Promoteur: **Sandra SOARES-FRAZÃO**
Lecteurs: **Martin PETITJEAN, Didier BOUSMAR, Geoffrey HOUBRECHTS**
Année académique 2024–2025
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Préambule

Dans le cadre de l'élaboration de ce mémoire, j'ai bénéficié de l'accompagnement d'outils d'intelligence artificielle, notamment ChatGPT et Perplexity à plusieurs stades du travail.

Premièrement, Perplexity m'a permis d'approfondir la recherche bibliographique. Ensuite, ChatGPT a principalement été utilisé pour la composition de graphiques sur Python ainsi que pour la mise en page sous LaTeX (génération de tables, minipages, etc.). Il m'a également été utile tant pour la restructuration de certaines de mes phrases que pour trouver des synonymes.

Remerciements

Ce mémoire représente l'accomplissement de 6 années d'études, et je me dois de remercier particulièrement certaines personnes sans qui cela n'aurait pas été possible.

En premier lieu, je tiens à remercier ma promotrice, Sandra Soares-Frazão, pour son encadrement bienveillant tout au long de l'année et sa disponibilité.

Ensuite, je souhaite également remercier mes encadrants, Martin Petitjean et Pierre-Yves Gousenbourger, pour leur aide apportée à mes réflexions et leur commentaires pertinents lors de la relecture de certains passages de l'écrit.

Enfin, je souhaite remercier mes parents de m'avoir donné accès au parcours universitaire.

Abstract

Les rivières remplissent un nombre important de fonctions écologiques et socio-économiques essentielles. Les petits cours d'eau constituent la majorité du réseau hydrographique en terme de longueur cumulée et participent activement à la qualité des cours d'eau qui en découlent. Les cours d'eau naturels sont nécessaires dans la gestion d'événements climatiques extrêmes (pluies importantes ou sécheresse). Cependant, la qualité de nombreux cours d'eau a été impactée par l'homme.

Renaturer les petits cours d'eau est aujourd'hui indispensable pour freiner la perte de biodiversité et récupérer une dynamique fluviale naturelle. Toutefois, le processus de restauration de cours d'eau peut s'avérer long et coûteux, le rendant peu accessible. C'est dans ce contexte que le projet Rivialis voit le jour.

L'application Rivialis a pour but de proposer un diagnostic rapide de l'état écologique d'un cours d'eau et de servir d'outil d'aide à la décision pour des particuliers ou communes qui souhaiteraient entreprendre des travaux de renaturation sur un tronçon d'un cours d'eau impacté.

Cependant, comparer l'état initial du cours d'eau à chaque variante de projet de renaturation possible suppose un référentiel solide ; qui nécessite de mettre au point un indice de qualité dédié aux petits cours d'eau : l'indice petit cours d'eau (IPCE).

Ce mémoire a pour objectif de proposer une base pour le développement de l'IPCE. La qualité hydromorphologique de l'Orneau, un cours d'eau à Gembloux, a été évaluée selon deux modalités : sur le terrain et à distance. De cette mise en pratique sont retirées des perspectives d'améliorations afin de définir un indice de qualité robuste et pertinent au domaine d'application.

Table des matières

1 Contexte et objectifs **1**

1.1 Introduction . . . 1

1.2 Fonctionnement et dynamique des cours d'eau . . . 4

1.2.1 Zones fonctionnelles . . . 4

1.2.2 Équilibre dynamique . . . 7

1.2.3 Un équilibre fragile . . . 9

1.2.4 Impacts des perturbations anthropiques sur l'équilibre . . . 12

1.3 Les travaux de renaturation . . . 16

1.3.1 Stratégies et interventions pour la renaturation des petits cours d'eau . . . 16

1.3.1.1 Reméandrage . . . 17

1.3.1.2 Suppression d'ouvrage en travers . . . 18

1.3.1.3 Remise dans le talweg . . . 19

1.3.2 Stream & River Consult . . . 20

1.3.3 Rivialis . . . 20

1.4 Objectifs du mémoire . . . 22

2 État de l'art : les indicateurs de qualité des cours d'eau existants **23**

2.1 Les indices hydromorphologiques . . . 25

2.1.1 IHMD : indice hydromorphologique de la diversité . . . 25

2.1.2 IAM : indice d'attractivité morphodynamique . . . 27

2.1.3 Indice tronçon . . . 29

2.1.4 SMG : Système modulaire gradué . . . 32

2.1.5 Qualphy . . . 36

2.1.6 MQI : morphological quality index . . . 38

2.1.7 MMQI : modified MQI . . . 39

2.1.8 Méthodologie développée par l'OFB . . . 40

2.2 Acquisition des données . . . 43

2.2.1 Mesures et observations in situ . . . 43

2.2.2 Données disponibles en ligne . . . 46

2.2.3 Simulation numérique . . . 47

2.2.4 Dans le cadre de Rivialis . . . 48
2.3 Cahier des charges de l'indice petit cours d'eau . . . 50

3 Détail de la méthodologie choisie comme base pour établir l'IPCE 53
3.1 Introduction . . . 54
3.2 Diagnostic . . . 55
3.2.1 Lit mineur . . . 57
3.2.2 Bande riveraine et ripisylve . . . 61
3.2.3 Réseau hydraulique annexe . . . 61
3.2.4 Obstacles transversaux anthropiques à l'écoulement . . . 62
3.2.5 Rangs 0 . . . 62
3.3 Exploitation des données du diagnostic . . . 63
3.3.1 Évaluation de la rugosité du lit mineur du cours d'eau . . . 63
3.3.2 Analyse des profils en travers des segments étudiés . . . 63
3.3.3 Évaluation du débit de plein bord . . . 65
3.3.4 Évaluation de la puissance spécifique . . . 66
3.3.5 Indice d'artificialisation du lit mineur . . . 67
3.3.6 Indice de pression dans la bande riveraine . . . 68
3.3.7 Indice de résilience par tronçon . . . 69
3.3.8 Indice sur les obstacles à l'écoulement . . . 70
3.4 Les impacts sur la santé mentale et le bien-être : mémoire Oíkos . . . 71

4 Application de la méthode proposée à un cas d'étude 72
4.1 Aperçu du site étudié . . . 73
4.2 Application de la méthode in situ . . . 76
4.3 Application de la méthode à distance . . . 84
4.3.1 Lit mineur . . . 84
4.3.2 Bande riveraine et ripisylve . . . 95
4.3.3 Obstacles à l'écoulement . . . 95
4.4 Analyse de l'évaluation de l'Orneau à distance et comparaison des résultats . . . 97

5 Discussion 101

6 Conclusion et perspectives 103

A Travail de Lisa Piorka dans le cadre du mémoire Oíkos : Quelles sont les propriétés des rivières perçues favorablement par les individus et comment expliquer ces préférences ? 114

B Typologie des différents faciès d'écoulement 119

C IPR : Indice Poisson Rivière **120**

D Détail de la méthode Qualphy **122**

E MQI : liste des 28 indicateurs évalués et scores **125**

F Méthologie de Wolman pour la détermination de la granulométrie **131**

G Méthodologie de l'OFB - Détail du diagnostic **133**

H Étude de quelques cas de mesure de largeur de plein bord (Carhyce) **138**

Chapitre 1

Contexte et objectifs

1.1 Introduction

Les rivières remplissent un nombre important de fonctions écologiques et socio-économiques essentielles. Sur le plan écologique, elles constituent des corridors de biodiversité, participent activement à l'épuration naturelle des eaux, à la régulation du climat local et à la prévention des inondations par leur capacité à stocker et ralentir les eaux de ruissellement. Du point de vue socio-économique, les cours d'eau représentent une ressource indispensable pour l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture, les loisirs ou encore le tourisme. Les petits cours d'eau constituent la majorité du réseau hydrographique en terme de longueur cumulée et participent activement à la qualité des cours d'eau qui en découlent [78]. Leur équilibre et leur qualité influencent directement tous les cours d'eau situés en aval [79].

Un cours d'eau altéré n'est plus capable de se réguler chimiquement, biologiquement ou hydromorphologiquement [14]. Cette diminution de qualité provient principalement de pollution due à l'agriculture, des rejets urbains et industriels, ainsi que des altérations physiques des lits des rivières telles que la canalisation du cours d'eau et l'artificialisation des berges. En particulier, en Wallonie, les eaux de surface présentent encore de nombreuses lacunes en terme de qualité écologique. Cette diminution de la qualité concerne principalement les cours d'eau artificialisés, comme visible à la figure 1.1.

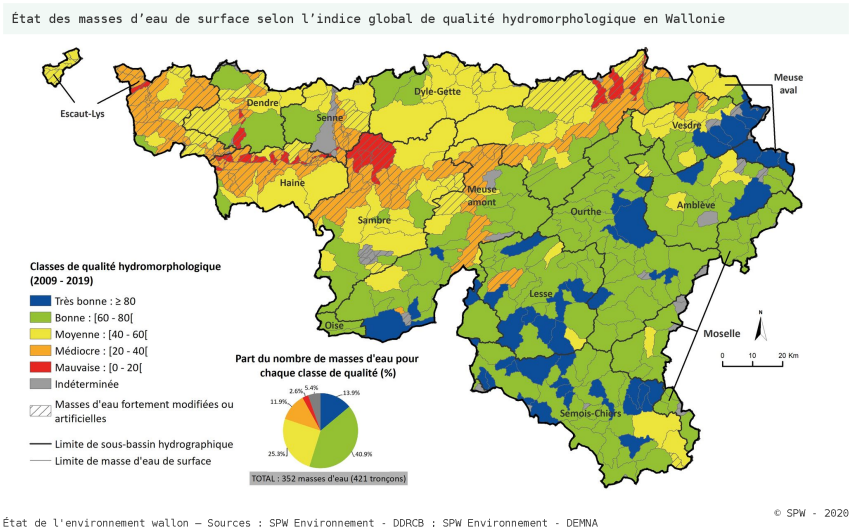


FIGURE 1.1 – État de la qualité des masses d'eau de surface en Wallonie [78].

Face à cette situation, un cadre réglementaire précis et contraignant a été établi à l'échelle européenne pour améliorer la qualité des masses d'eau. La DCE impose à tous les États membres d'atteindre un bon état écologique et chimique des eaux de surface d'ici 2027. Elle implique la mise en place de plans de gestion adaptés et la réalisation régulière de suivis pour évaluer les progrès effectués. Le respect de ces objectifs réglementaires constitue ainsi une priorité en Wallonie, afin d'améliorer durablement la santé des écosystèmes aquatiques.

Un cours d'eau peut être renaturé par des mesures visant l'amélioration de l'aspect biologique, chimique mais aussi hydromorphologique, car ces trois aspects sont considérés comme ayant un impact direct sur la biodiversité aquatique et la qualité de l'eau [47]. Le contexte hydromorphologique conditionne fortement la dynamique fluviale et les espèces aquatiques qui pourront s'y développer. Plusieurs études ont clairement démontré qu'une amélioration de la qualité morphologique des cours d'eau entraîne systématiquement une amélioration de leur qualité biologique [14].

Ces enjeux sont étroitement liés aux Objectifs de Développement Durable indiqués en figure 1.2 fixés par les Nations Unies. L'objectif 6 vise à garantir la disponibilité et la gestion durable de l'eau et de l'assainissement pour tous. L'objectif 15, concerne la préservation de la biodiversité terrestre et aquatique. Les objectifs 3, 13 et 14 sont aussi concernés. La renaturation des cours d'eau, en restaurant leur morphologie naturelle, participe directement à l'atteinte de ces objectifs, contribuant ainsi à un développement durable global intégrant à la fois les dimensions environnementale, économique et sociale.



FIGURE 1.2 – Objectifs de développement durable concernés [60].

1.2 Fonctionnement et dynamique des cours d'eau

Un cours d'eau constitue un écosystème complexe, essentiel au maintien de la biodiversité. Cette biodiversité est actuellement en danger, puisqu'elle constitue une des limites planétaires largement dépassées aujourd'hui. La préservation ou la restauration de cours d'eau naturels devient alors une priorité. Pour comprendre comment préserver ou restaurer efficacement ces milieux, il est important de saisir leur fonctionnement global, en s'intéressant à leurs différentes zones fonctionnelles, à leur dynamique naturelle et à leur équilibre fragile. Cette section détaille ces différents points, afin de mieux comprendre les mécanismes en jeu et ainsi orienter les projets de renaturation vers un retour à un écosystème complet et sain.

1.2.1 Zones fonctionnelles

Un cours d'eau est l'écoulement terrestre reliant une source à une embouchure. Le bassin versant englobe toutes les surfaces où les eaux convergent naturellement vers ce même cours d'eau ou vers une nappe souterraine commune. Comme illustré à la figure 1.3, il s'organise autour d'une rivière principale née en amont à la tête de bassin, qui descend la vallée pour se jeter, à l'exutoire du bassin, dans un fleuve ou directement dans la mer [72].

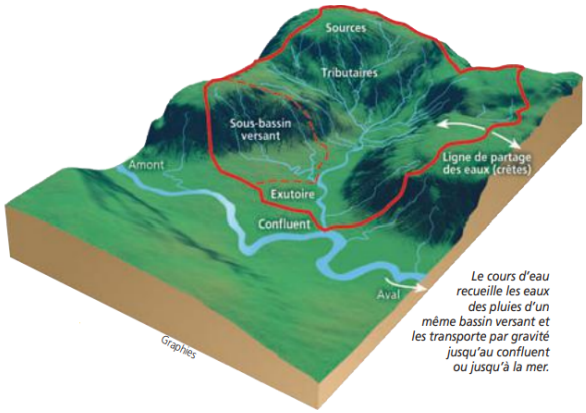


FIGURE 1.3 – Représentation d'un bassin versant [58].

Un cours d'eau est composé d'un ensemble d'éléments en constante interaction les uns avec les autres. En effet, les fonctions du cours d'eau ne s'arrêtent pas uniquement au lit mineur, et la qualité d'un cours d'eau dépend aussi de certains éléments annexes tels que le lit majeur, les berges, la bande riveraine et la ripisylve [8], tels que représentés à la figure 1.4. Chacun des ces éléments remplit une mission d'un point de vue biologique ou hydromorphologique.

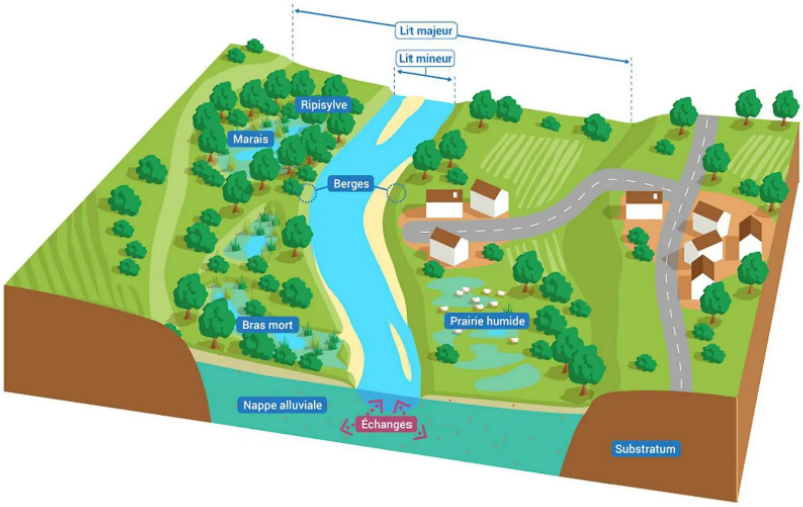


FIGURE 1.4 – La structure d'un cours d'eau [23].

Le lit mineur est l'endroit où l'écoulement a lieu hors période de crue. Il est limité par les berges. Il est le lieu d'une importante biodiversité peuplant le cours d'eau. Les caractéristiques telles que la hauteur d'eau, la vitesse et la taille des substrats du lit vont avoir un impact sur les peuplements biologiques du cours d'eau, tels qu'illustrés à la figure 1.5.

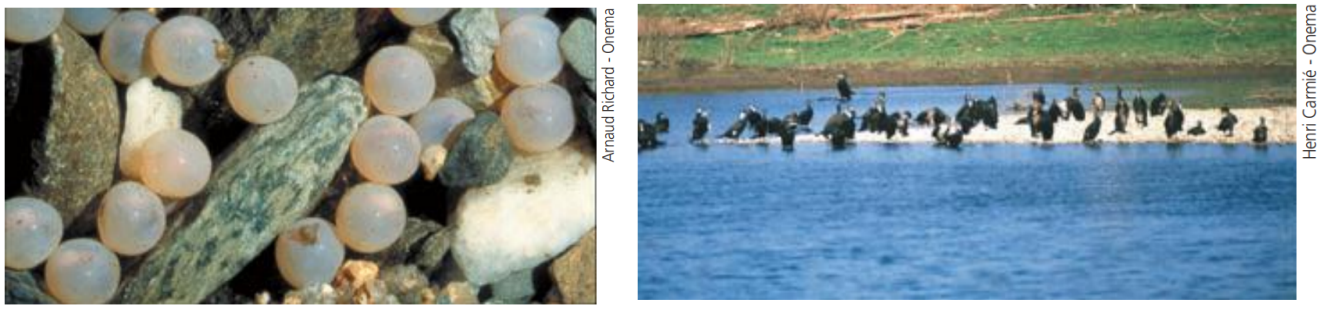


FIGURE 1.5 – Exemple d'habitat du lit mineur : des graviers non colmatés qui permettent l'accueil des oeufs de certains poissons (gauche). Exemple d'habitat du lit mineur : banc alluvial utilisé par des cormorans afin de s'y reposer (droite) [58].

Le lit majeur correspond au lieu de l'écoulement temporaire lors des crues, comme représenté en figure 1.6. Une crue correspond à l'augmentation du débit du cours d'eau, et se traduit souvent par une augmentation visible de la hauteur d'eau. Une crue se définit avant tout par la fréquence à laquelle elle revient, c'est-à-dire sa période de récurrence (ou période de retour). Par exemple, une crue biennale $Q_{2\text{ ans}}$ se produit en moyenne tous les deux ans et une crue centennale $Q_{100\text{ ans}}$ tous les siècles [58].

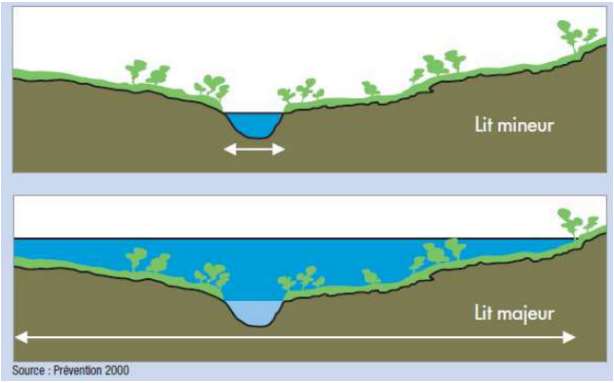


FIGURE 1.6 – Débordement de l'écoulement dans le lit majeur en cas de crues [18].

Finalement, la ripisylve correspond à la formation végétale qui se développe sur les bords du cours d'eau. Comme représenté à la figure 4.5, la végétation qui s'y retrouve peut être de type herbacée, arbustive ou encore arborée. Sa continuité longitudinale peut varier [4]. La bande riveraine correspond aux formations végétales qui s'étendent jusqu'à une profondeur d'une quinzaine de mètres à partir des berges d'un cours d'eau.

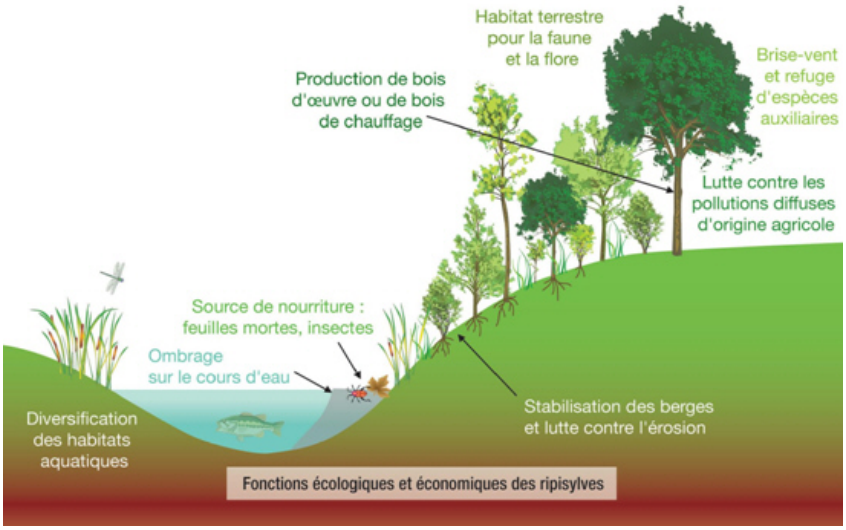


FIGURE 1.7 – Elements caractérisant la ripisylve [46].

La ripisylve remplit différents rôles essentiels au bon fonctionnement du cours d'eau. Tout d'abord, elle a une fonction mécanique, et permet ainsi la stabilité des berges et lutte contre l'érosion via le système racinaire des arbres et arbustes [72]. Elle joue un rôle de filtre végétal, agissant comme une protection contre certains polluants (nitrates, phosphates, pesticides) et améliore ainsi la qualité de l'eau. La ripisylve permet aussi au cours d'eau d'avoir une zone d'ombre, ce qui en réduit le réchauffement, l'évaporation et l'eutrophisation [72]. Finalement, elle abrite également une partie de la biodiversité faunistique et floristique [46].

1.2.2 Équilibre dynamique

Un cours d'eau transporte à la fois des volumes liquides et des matières solides. Le débit liquide varie en fonction des précipitations. Le débit solide correspond à tous les éléments solides, sédiments et cailloux, transportés par ce même cours d'eau. Les sédiments alimentant ce débit solide sont de sources multiples : érosion des berges, transport des éléments du lit mineur et apports solides du bassin versant, comme l'illustre la figure 1.8.

La figure 1.9 indique, elle, que les éléments les plus légers sont transportés en suspension au sein de l'écoulement, tandis que les éléments plus grossiers sont transportés par charriage.

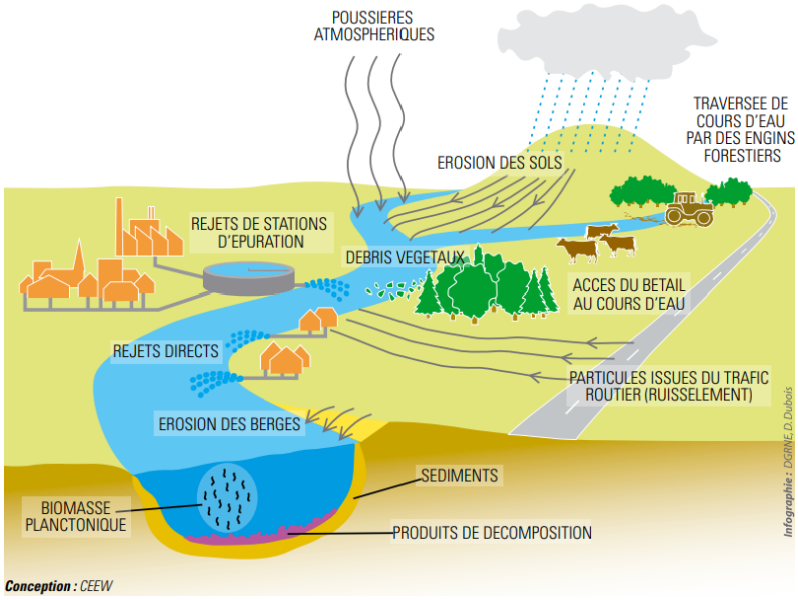


FIGURE 1.8 – Principales sources de matières en suspension qui alimentent un cours d'eau [44].

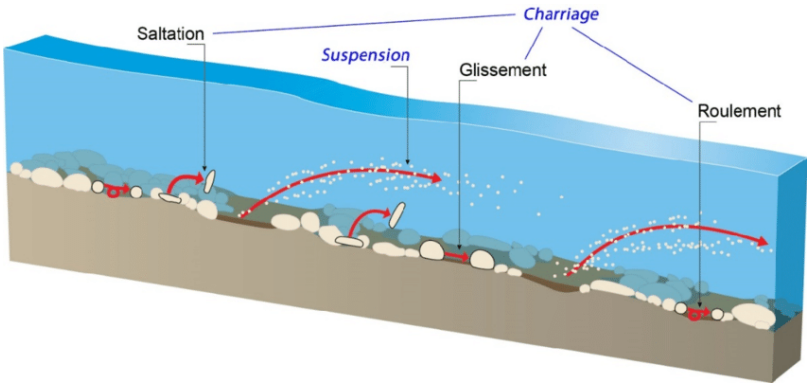


FIGURE 1.9 – Un cours d'eau peut transporter les éléments solides par charriage et en suspension [27].

Comme décrit par Schumm en 1977 [68], les cours d'eau naturels ont tendance à atteindre un équilibre dynamiquement stable entre deux types de variables : les variables de « contrôle » et les

variables de « réponse » [45]. Les variables de contrôle correspondent au débit liquide et au débit solide du cours d'eau. Elles dépendent elles-mêmes de la localisation de la rivière. Les variables de contrôle exercent une action directe sur le cours d'eau et gouvernent son évolution morphologique. D'un autre côté, les variables de « réponse », telles que la largeur, la sinuosité, ou la pente locale permettent au cours d'eau de répondre aux modifications imposées par les variables de contrôle (dues par exemple à un changement dans les pluies, la couverture végétale, etc.) afin de garder un certain équilibre dynamique [45].

Tout au long des saisons et des années, le cours d'eau naturel adapte son comportement en fonction des pressions qu'exerce son environnement.

Un cours d'eau est donc en constante évolution afin de rester dans un équilibre dynamique. Cette notion d'équilibre dynamique a été théorisée par E. W. Lane, et W. Borland [40] et schématisée à la figure 1.10.

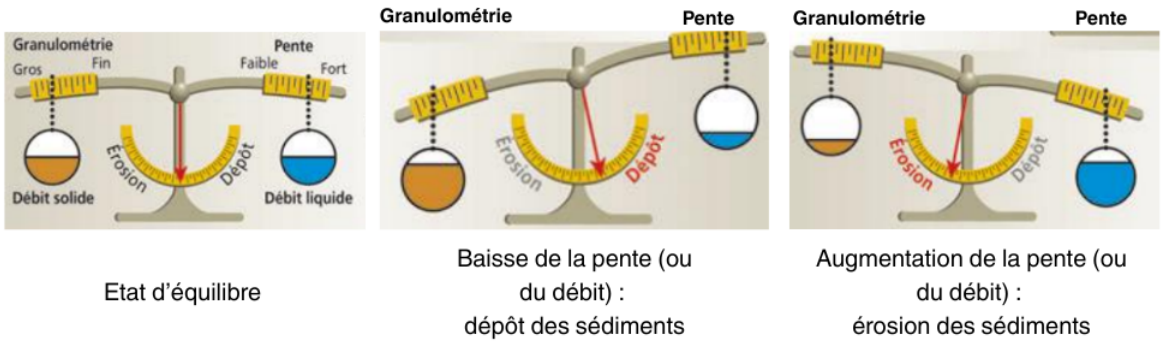


FIGURE 1.10 – Équilibre dynamique entre les débits liquide Q et solide Q_s , la granulométrie et la pente [58].

La figure 1.10 représente à nouveau cet équilibre dynamique, en faisant apparaître le débit solide et sa granulométrie ainsi que le débit liquide, qui, couplé à la pente, informe sur l'énergie disponible pour transporter ces éléments solides [45]. Les débits liquide et solide varient en fonction des saisons et des précipitations. Tout au long de son existence, le cours d'eau subit sans cesse des phases de dépôt et d'érosion qui réajustent en permanence sa morphologie.

Cette représentation simplifiée permet d'exprimer un mécanisme principal de fonctionnement des cours d'eau : l'équilibre dynamique. Concrètement, cela signifie que lorsqu'un cours d'eau subit une diminution de pente, il possède alors une énergie tractrice plus faible et un dépôt de sédiment aura tendance à apparaître. A contrario, un cours d'eau dont la pente ou le débit augmente, possède alors une énergie tractrice plus importante et implique donc l'érosion des sédiments du lit de la rivière [8]. Ces changements de dynamique fluviale sont tout à fait bénéfiques tant que l'équilibre reste dynamique. De plus, cet équilibre dynamique est assuré s'il existe une connexion longitudinale et transversale au sein du cours d'eau, comme illustré en figure 1.11.

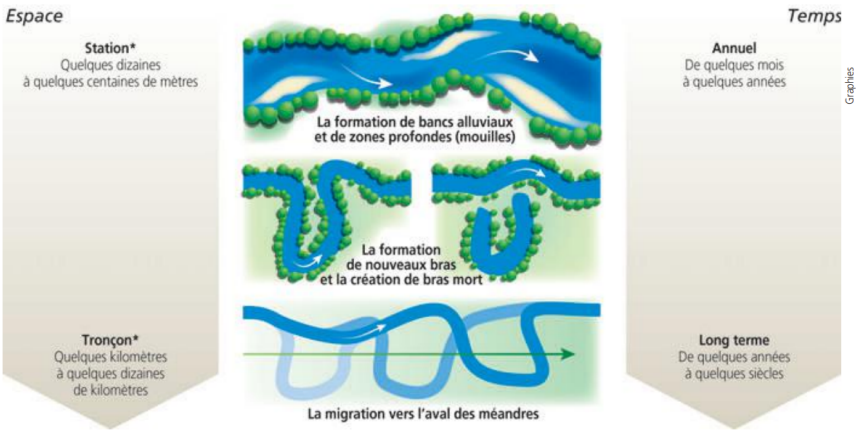


FIGURE 1.11 – Représentation de la dynamique fluviale dans le temps et l'espace [58].

Dans cet équilibre dynamique, le cours d'eau s'adapte à son environnement et ceci peut être décrit en trois fonctions : la collecte, le transfert et le stockage [8]. En effet, l'eau et les sédiments ou tout type d'apport solide peuvent être collectés au sein du cours d'eau. Une partie de ces éléments sera transportée en aval tandis qu'une autre partie sera stockée dans la nappe alluviale pour l'eau, et les éléments solides seront déposés au fond du lit mineur, ou alors participeront à créer des bancs alluviaux.

1.2.3 Un équilibre fragile

La qualité hydromorphologique d'un cours d'eau est essentielle afin de garantir une capacité écologique et de réaction face au changement climatique [8].

Cependant, la qualité hydromorphologique repose sur des éléments très sensibles, dont le dérèglement de l'un peut affecter l'entièreté de l'écosystème. On peut décrire un bon état hydromorphologique par un ensemble de paramètres décrivant la dynamique du cours d'eau [57]. Cette section vise à décrire ces paramètres conditionnant la qualité hydromorphologique.

Configuration morphologique riche et hétérogène

L'hétérogénéité de la morphologie du lit mineur constitue un élément important de la qualité hydromorphologique d'un cours d'eau. En effet, un cours d'eau présentant une diversité de profondeurs d'eau et de vitesses contribue à la création d'une mosaïque de sous-habitats, qui permet à la faune et flore de se développer, comme illustré à la figure 1.12.



FIGURE 1.12 – Tronçon proche de l'état naturel (gauche) et à faible diversité des habitats (droite) [29].

Cette hétérogénéité de la morphologie du lit mineur peut être exprimée par la diversité de faciès. Un faciès d'écoulement est un type de zone d'eau reconnaissable par sa profondeur, sa vitesse et sa turbulence. Par exemple, un radier [1] est peu profond et rapide, une mouille est profonde et lente, et un plat est moyennement profond et calme. Chaque faciès offre des conditions physiques particulières (oxygénation, température, abri, nourriture) qui conviennent à différentes espèces aquatiques et stades de vie. Par exemple, un poisson a besoin de zone d'écoulement plus calme afin de pouvoir s'y reposer ou pondre des œufs. Une alternance de ces différents faciès d'écoulement, comme représenté à la figure 1.13, reflète un bon fonctionnement hydromorphologique. L'Annexe B reprend une description simplifiée des différents types de faciès d'écoulement.

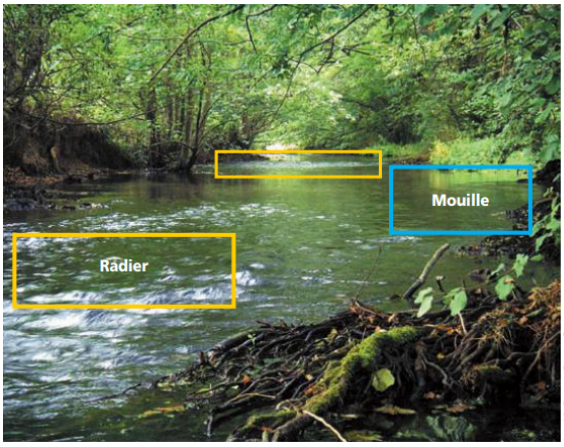


FIGURE 1.13 – Succession de radiers et de mouilles. La diversité des faciès garantit l'hétérogénéité des habitats du cours d'eau [57].

Cette notion de diversité de faciès d'écoulement est également étroitement liée à la présence de bancs alluviaux mobiles. Ces bancs alluviaux sont créés suite au processus de dépôt-érosion

1. Dans ce contexte, la notion de radier ne correspond pas à une structure en béton utilisée dans le domaine du génie civil. Pour ce travail, la notion de radiers-mouilles est considérée similaire à celle de seuils-mouilles.

prenant lieu dans les cours poursuivant leur équilibre dynamique. En fonction du débit solide et de l'énergie du cours d'eau, des zones de dépôts peuvent apparaître et disparaître, comme représenté à la figure 1.14, témoin de cet équilibre dynamique.



FIGURE 1.14 – Exemples de bancs alluviaux résultants de processus de dépôt du cours d'eau. De gauche à droite : atterrissement formé sur un radier suite à une crue sur le Ballon (Indre-et-Loire) ; atterrissement sur la Moselle (Vosges) ; dépôts de sédiments sur la berge intérieure du méandre du Castellas sur le Gardon (Gard). [57].

Ensuite, la végétation naturelle des berges et de la ripisylve présente un meilleur lieu d'accueil pour la faune et la flore [8], comme visibles à la figure 1.15. De plus, des berges non protégées ainsi qu'une ripisylve bien fournie permettent de garantir un apport en éléments solides suffisant afin de maintenir l'équilibre dynamique de l'écoulement [57].

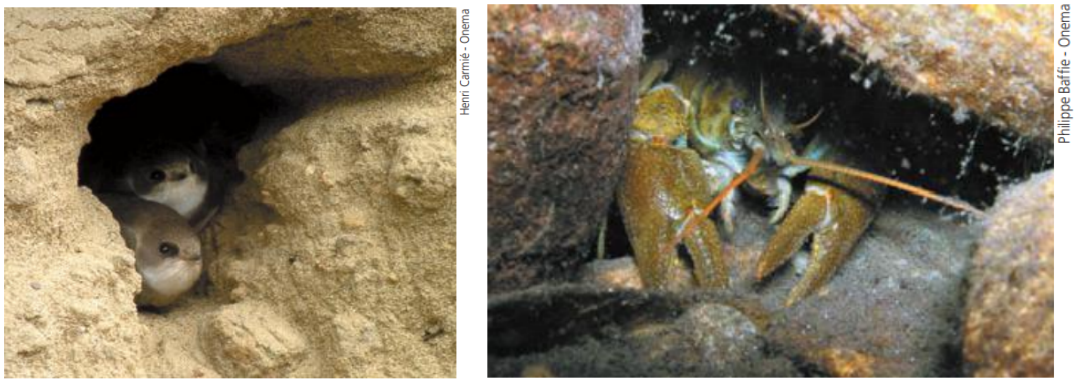


FIGURE 1.15 – Exemple d'espèce se retrouvant dans les berges de certains cours d'eau : l'hirondelle de rivage (gauche) Exemple d'espèce vivant dans les berges : une écrevisse pieds blancs" (droite) [58].

Continuité écologique

Les continuités longitudinale et transversale sont respectivement nécessaires afin de permettre aux sédiments et aux poissons de se déplacer ; et permettre une connexion entre le lit mineur et le lit majeur lors d'épisodes plus ou moins pluvieux [8], comme représenté à la figure 1.16.

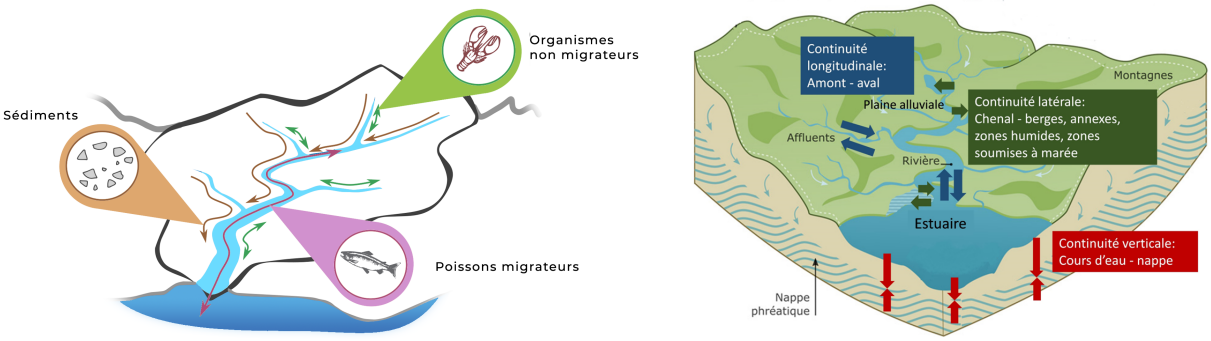


FIGURE 1.16 – A gauche : continuité longitudinale [53]. A droite : Représentation des différents types de continuité écologique [7]. En assurant la libre circulation des organismes et des sédiments, la continuité écologique maintient le bon fonctionnement du cours d'eau et permet le déroulement complet du cycle biologique des espèces.

Espace de mobilité

Au fil des saisons et des années, le cours d'eau ajuste naturellement sa forme pour répondre aux conditions extérieures. Il lui faut donc un espace libre suffisant autour de son lit afin de pouvoir remodeler sa morphologie quand cela s'avère nécessaire, sans contraintes, tel qu'illustré en figure 1.17.



FIGURE 1.17 – Laisser un espace d'évolution libre empêche toute gêne aux réajustements morphologiques du cours d'eau. De gauche à droite : espace de mobilité du Var (Alpes-Maritimes) ; méandres abandonnés et recréés par l'Allier (Allier) [57].

1.2.4 Impacts des perturbations anthropiques sur l'équilibre

Cet équilibre fragile est très souvent affecté par les activités anthropiques sur les rivières ou encore les bassins versants [8]. La modification d'un des éléments caractérisant la morphologie d'un cours d'eau va entraîner inévitablement le dérèglement d'autres paramètres, conduisant ainsi à une situation peu favorable pour la biodiversité.

Présence de seuils

La présence d'obstacles à l'écoulement tels que des barrages ou la présence de seuil, tel qu'illustré à la figure 1.18, impacte négativement l'hétérogénéité morphologique, et la continuité écologique du cours d'eau. En plus de cela, la présence de seuils induit un déséquilibre dans le processus de dépôt-érosion.



FIGURE 1.18 – Exemples d'ouvrages transversaux qui interrompent la continuité écologique d'un cours d'eau [38].

La présence de tels seuils induit une accumulation de sédiments en amont de l'obstacle, et une érosion en aval. En addition à ce changement de morphologie, ce type d'ouvrage bloque les flux sédimentaires et biologiques.

Canalisation du cours d'eau

La canalisation de cours d'eau implique une diminution de l'hétérogénéité des faciès d'écoulement ainsi que l'espace de mobilité. De plus, la protection des berges par des matériaux artificiels tels que du béton vont empêcher leur érosion et donc l'apport en sédiment nécessaire au bon fonctionnement de la rivière.

La figure 1.19 permet de comparer le comportement du cours d'eau en situation artificielle et naturelle. En situation artificielle, le chenal est rectiligne, calé entre berges protégées par enrochements. Les hauteurs d'eau varient peu (lit creusé, écoulement uniforme) et le contact avec le lit majeur est rompu. Tandis qu'en situation naturelle, le cours d'eau conserve sa mobilité latérale : formation de bancs alluviaux mobiles, diversité d'écoulements (radiers, mouilles, plats) et présence de végétaux le long des berges. La section est moins encaissée, ce qui permet la reconnexion régulière avec le lit majeur et une meilleure dissipation de l'énergie.

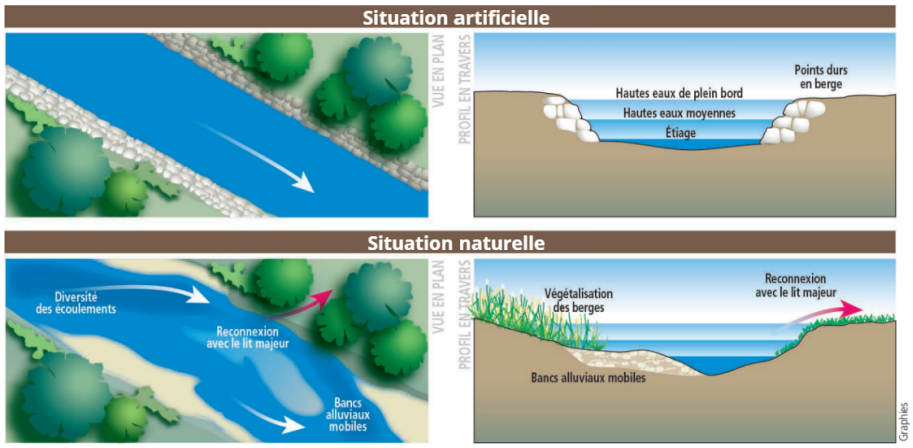


FIGURE 1.19 – Comparaison hydromorphologique entre un tronçon artificialisé et un tronçon naturel d'un cours d'eau, présentée en vue aérienne (gauche) et en coupe transversale (droite) [48].

La figure 1.20 quant à elle, met en avant les différences suivantes. En situation artificielle (lit mineur canalisé), le cours d'eau présente une morphologie homogène. Peu de zones calmes ou turbulentes sont présentes, induisant des zones d'habitats réduites pour la faune et la flore.

Or, un cours d'eau naturel, présentant des méandres (sinuosité), est constitué d'une alternance d'élargissements et rétrécissements, ainsi que de secteurs rapides, lents, zones de remous. Ce profil hétérogène constitué de zones de dépôt (bancs alluviaux) et zone d'érosion forme un lieu d'accueil pour la faune et la flore.

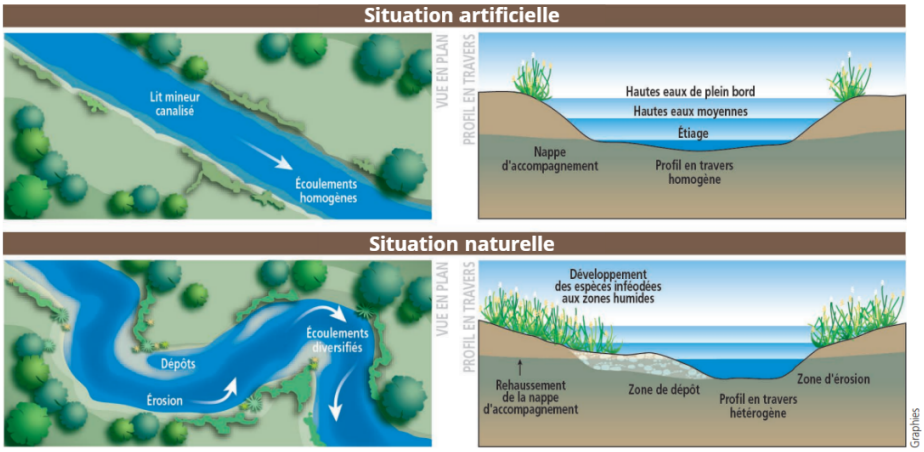


FIGURE 1.20 – Comparaison hydromorphologique entre un tronçon de cours d'eau canalisé et un tronçon naturel, présentée en vue aérienne (gauche) et en coupe transversale (droite).[49]

.

Les exemples ci-dessus illustrent le fait que les cours d'eau artificiels présentent de grandes lacunes en biodiversité ainsi qu'en gestion des événements climatiques extrêmes, tels que des pluies importantes ou des périodes de sécheresse. En effet, en cas de pluies importantes, l'écoulement dans un cours d'eau naturel va déborder du lit mineur et s'écouler également dans le lit majeur. Cela

permet ainsi une recharge des nappes alluviales et une connexion, en sédiments notamment, entre le lit mineur et le lit majeur. A contrario, un cours d'eau artificiel canalisé ne présente aucune capacité de réaction face à ce genre d'événement et débordera immédiatement de son lit, créant des inondations dans des zones où il n'était pas prévu de recevoir cette eau.

1.3 Les travaux de renaturation

Les sections précédentes ont mis en évidence l'importance de conserver des cours d'eau naturels, car ce sont les seuls capables d'assurer pleinement leurs fonctions écologiques, biologiques et paysagères. Cependant, de nombreux cours d'eau ont vu leur tracé et leur morphologie modifiés au fil du temps, principalement à cause de projets d'aménagement du territoire.

Dans l'objectif de respecter les exigences fixées par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) et de retrouver des rivières plus naturelles, des projets de restauration et de renaturation sont aujourd'hui mis en place.

Il existe plusieurs types de travaux de restauration possibles, qui dépendent de différents facteurs comme le type de site, les problèmes rencontrés, le budget disponible ou encore l'espace sur lequel il est possible d'intervenir.

L'objectif de cette section n'est pas de détailler en profondeur toutes les techniques existantes, mais plutôt de présenter les principaux types d'interventions envisageables et de donner au lecteur une vision générale des améliorations possibles sur un cours d'eau.

La figure 1.21 représente les objectifs visés dans le cadre des projets de renaturation.

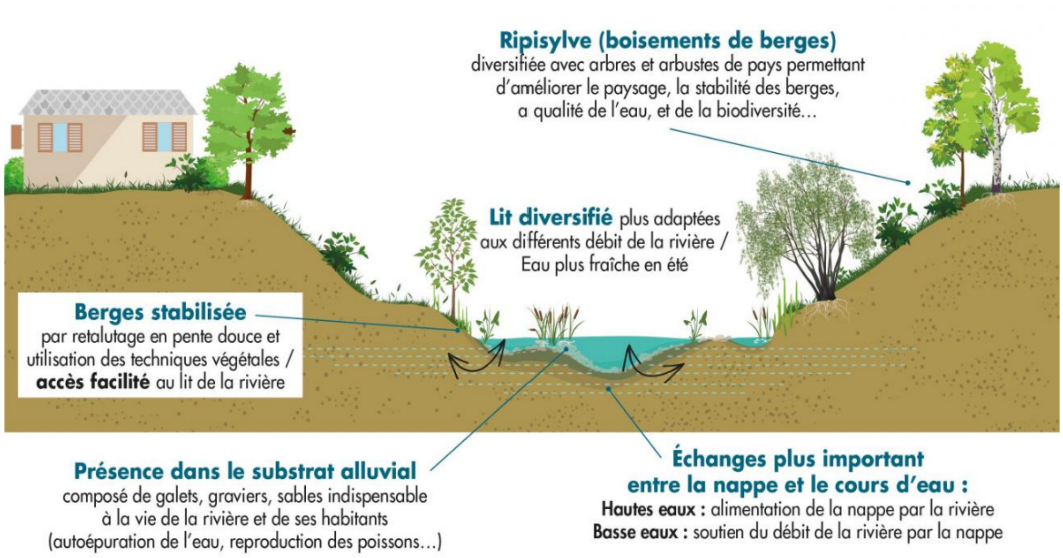


FIGURE 1.21 – Cours d'eau restauré dont les composantes clés illustrent un fonctionnement écologique retrouvé [9].

1.3.1 Stratégies et interventions pour la renaturation des petits cours d'eau

Ici seront présentés en détail les travaux de reméandrage, la suppression des ouvrages transversaux et la remise du cours d'eau dans son talweg. D'autres techniques peuvent toutefois être mises

en œuvre : contournement de plans d'eau, reconstitution du matelas alluvial, levée des contraintes latérales ou modification de la géométrie du lit.

1.3.1.1 Reméandrage

Les travaux de Friedkin [26] ont mis en lumière la tendance naturelle d'un cours d'eau à former des méandres. En effet, en allongeant son trajet, il adoucit la pente, dissipe son énergie, limite la vitesse d'écoulement et prévient une incision excessive du lit. De plus, la présence de méandres induit une alternance de zones de dépôts (intérieur du méandre) et d'érosion (extérieur du méandre), traduisant une dynamique fluviale riche et d'un transport solide actif, comme visible à la figure 1.22. Cette alternance de zones de dépot et d'érosion est due à une vitesse d'écoulement plus faible à l'intérieur des méandres, et une vitesse plus importante à l'extérieur.

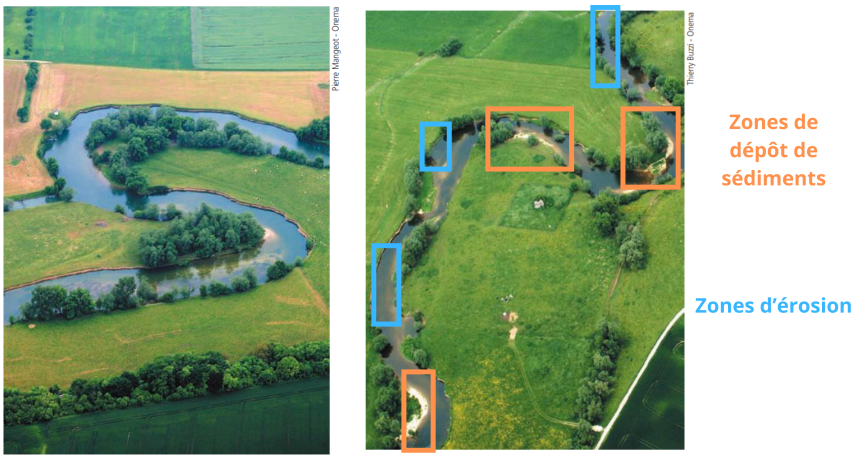


FIGURE 1.22 – Méandres de la Meuse et mise en évidence du processus de dépôt et d'érosion sédimentaire [57].

Cependant, certains cours d'eau ont été canalisés en raison de projets d'aménagement de territoire par exemple. Ceci implique un tracé rectifié, une augmentation de la pente et confère à l'écoulement une énergie plus élevée. Le lit s'incise alors davantage, avec toutes les conséquences hydromorphologiques que cela implique.

Le reméandrage consiste dès lors à remettre le cours d'eau dans ses anciens méandres s'il sont toujours visibles, ou alors à recréer un cours d'eau sinueux [67].

Une représentation simplifiée de ce genre d'intervention est indiquée en figure 1.23.

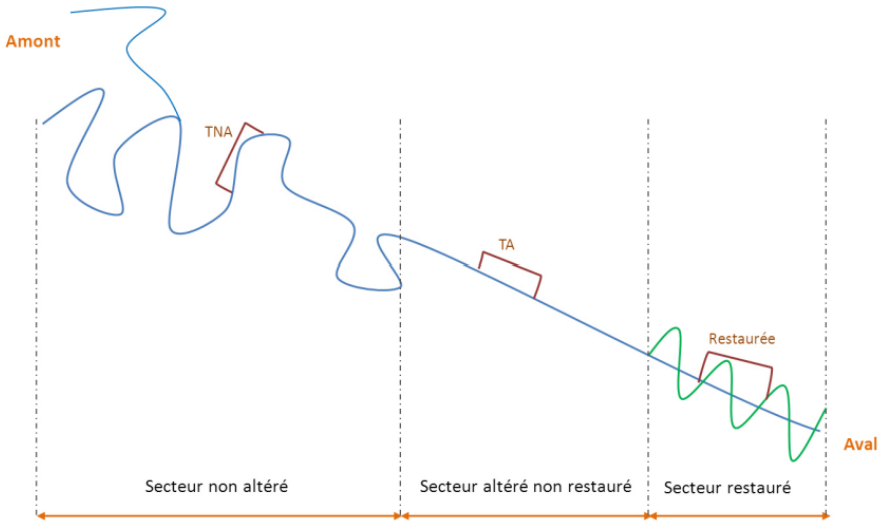


FIGURE 1.23 – Représentation de l'intervention de reméandrage [67].

Les avantages du reméandrage sur l'amélioration de la dynamique fluviale et la biodiversité sont multiples. Tout d'abord, en ce qui concerne l'hydromorphologie, ce type d'intervention permet de réactiver le processus de dépôt-érosion, en créant des zones préférentielles de dépôt de sédiments et des zones d'érosion. Ensuite, le cours d'eau renaturé présente une augmentation de la diversité des écoulements, des habitats en lit mineur et des morphologies du lit. Finalement, il favorise la reconnexion ou la recréation d'annexes fluviales et les échanges entre la nappe et le chenal [67]. Ensuite, du point de vue biologique, la diversification des habitats induit une diversification des espèces présentes et conduit donc à une amélioration de l'état écologique du secteur restauré [67].

1.3.1.2 Suppression d'ouvrage en travers

Un ouvrage en travers peut être un seuil ou une digue de plan d'eau, comme illustré à la figure 1.24. La présence de ce genre d'obstacle nuit à la continuité écologique du cours d'eau et en dérègle la dynamique. Aussi, la présence de ce type d'obstacle induit une augmentation de la température de la masse d'eau située en amont, ce qui implique un déséquilibre physico-chimique et la présence d'espèces invasives.



FIGURE 1.24 – Exemples d'ouvrages en travers. A gauche : digue de plan d'eau et à droite : seuil [38].

1.25.



FIGURE 1.25 – Situation initiale avec présence de digue de plan d'eau et situation après suppression [1].

La figure 1.25 représente un exemple de projet de suppression de seuil en Corrèze (France). La suppression de ce type d'obstacles améliore considérablement l'hydromorphologie ainsi que la qualité biologique du cours d'eau. Tout d'abord, d'un point de vue hydromorphologique, le profil en long et la pente d'équilibre du cours d'eau sont restaurés. Ensuite, la redynamisation du transport solide implique une recréation de la dynamique fluviale naturelle. Finalement, les morphologies du lit, les écoulements et habitats du lit mineur sont diversifiés [67]. En ce qui concerne les communautés biologiques, la diversification des habitats induit une amélioration de l'état écologique du tronçon renaturé.

1.3.1.3 Remise dans le talweg

Le talweg est la ligne du fond de vallée et représente donc le lieu où s'écoule naturellement la rivière.

Une remise dans le talweg, représentée à la figure 1.26, consiste donc à replacer un cours d'eau canalisé en fond de vallée, pour permettre une reconnexion à sa nappe d'accompagnement.

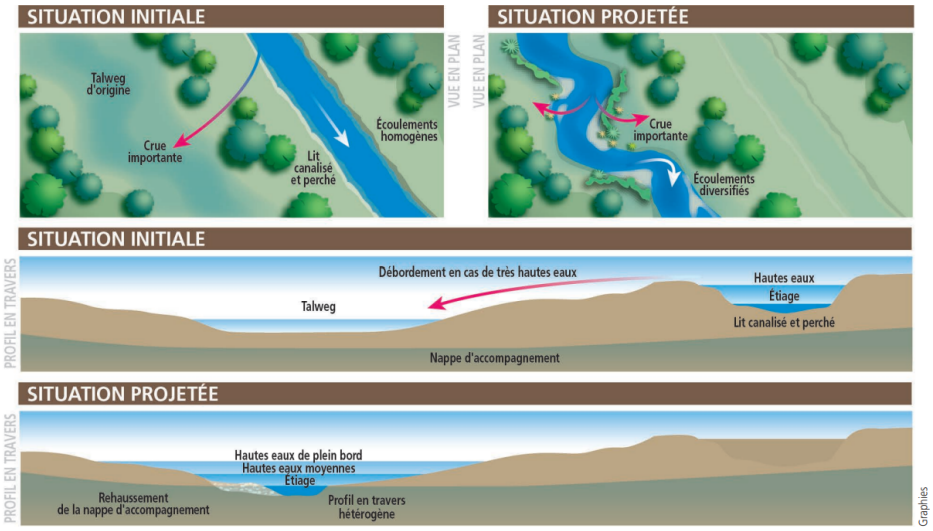


FIGURE 1.26 – Remise du cours d'eau dans son talweg : comparaison entre la situation initiale et la situation projetée [3].

La remise dans le talweg permet une amélioration de l'hydromorphologie par une restauration du profil en long et de la pente d'équilibre du cours d'eau. Cette opération augmente aussi la diversité des écoulement, des habitats du lit mineur et les morphologies du lit. Finalement, ce type de restauration favorise la reconnexion des annexes fluviales et les échanges entre la nappe alluviale et le chenal [67]. L'état écologique est amélioré par la diversification des espèces induite par la diversification des habitats et la reconnexion avec la nappe alluviale.

1.3.2 Stream & River Consult

Renaturer les petits cours d'eau est aujourd'hui indispensable pour freiner la perte de biodiversité, récupérer une dynamique fluviale naturelle et respecter les accords de la DCE.

Cela passe par les travaux de renaturation tels que la création de méandres, la restauration de la continuité écologique, la diversification d'habitats, la suppression de seuils, etc. Depuis 2009, Stream & River Consult met ces mesures en œuvre sur le terrain grâce à une équipe pluridisciplinaire composée de biologistes, bio-ingénieurs, hydromorphologues et ingénieurs civils. Ce bureau d'ingénierie écologique basé à Ciney, avec des antennes au Luxembourg et en Nouvelle-Zélande, intervient sur l'ensemble du cycle de renaturation des petits cours d'eau. Cependant, les études préliminaires à la mise en œuvre de projet de renaturation peuvent s'avérer coûteuses et chronophages.

1.3.3 Rivialis

Pour lever les freins liés au coût et au temps des diagnostics, le bureau S&R Consult porte aujourd'hui le projet Rivialis dont l'objectif est de développer une plateforme, conçue avec Kapta

Survey, SkalUP et trois équipes universitaires wallonnes, qui dresse rapidement l'état d'un cours d'eau et simule l'effet des scénarios de restauration via la modélisation et l'intelligence artificielle. L'application Rivialis a pour but de proposer un diagnostic rapide de l'état écologique d'un cours d'eau et de servir d'outil d'aide à la décision pour, des particuliers ou communes qui souhaiteraient entreprendre des travaux de renaturation sur un tronçon d'un cours d'eau impacté.

Cependant, comparer l'état initial du cours d'eau à chaque variante de projet de renaturation possible suppose un référentiel solide ; qui nécessite de mettre au point un indice de qualité dédié aux petits cours d'eau : l'indice petit cours d'eau (IPCE). Cet indice offrira une comparaison objective des différentes options de renaturation, afin de retenir celle qui correspond le mieux au contexte et au budget. Cet indice doit être déterminé à partir de mesures sur terrain, informations disponibles en ligne ou par simulation numérique. Enfin, parce que Rivialis s'adresse aussi à des utilisateurs hors du domaine de l'hydromorphologie, l'indice reposera sur des paramètres aisément mesurables ou observables in situ, avec une interprétation simple et fiable.

Le projet Rivialis se concentre sur les petits cours d'eau, correspondant aux catégories non navigables non classés et ceux de 3ème catégorie, comme indiqué à la figure 1.27. Avec une longueur cumulée de 9 770 km sur 17 371 km, ils représentent 56% du réseau hydrographique wallon.

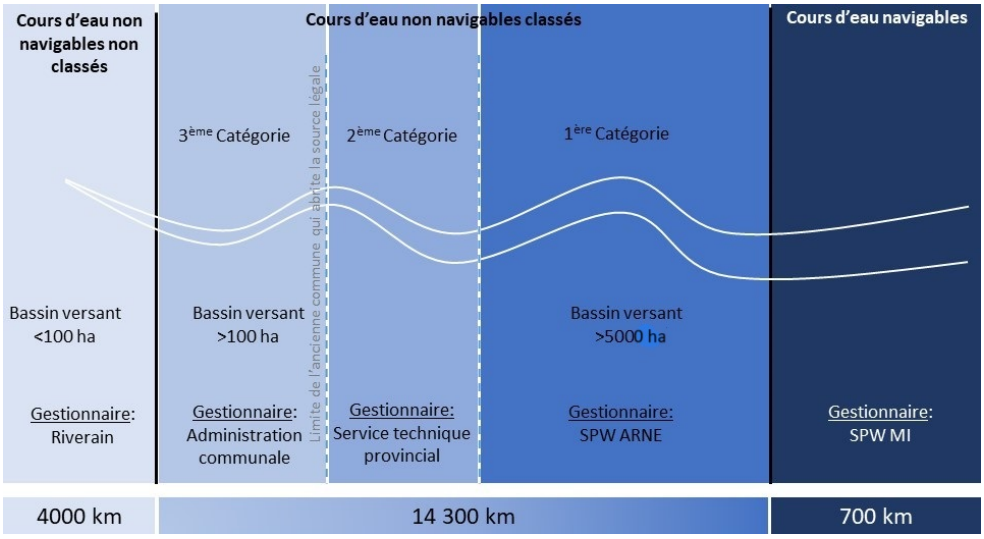


FIGURE 1.27 – Catégories de voies hydrauliques et cours d'eau en Wallonie [69].

1.4 Objectifs du mémoire

Le cœur de l'étude de ce document est donc le développement et le test sur un cas réel d'un indice permettant de refléter de la qualité d'un petit cours d'eau : l'Indice Petit Cours d'Eau (IPCE). Le présent document débutera avec une consultation des ressources bibliographiques concernant les méthodes principales existantes pour évaluer la qualité hydromorphologique des cours d'eau et mise au point d'une synthèse comparative. La recherche bibliographique a pour objectif de répondre aux questions suivantes : *Quels indicateurs de qualité ou de performance des cours d'eau existent ? Par qui sont-ils utilisés ? Dans quel contexte ? Avec quels objectifs ?*

Ensuite, une méthodologie reproductible à appliquer dans le projet sera développée et détaillée. Cette méthodologie sera testée sur l'Orneau à Gembloux. Finalement, les résultats seront analysés et des améliorations seront proposées.

Ce sujet s'inscrit également dans le cadre des mémoires Oíkos. Il s'agit de mémoires interdisciplinaires et transdisciplinaires, centrés sur les enjeux du développement durable et de la transition. Dans ce contexte, j'ai collaboré avec Lisa Piorka, étudiante en médecine, dont le sujet de mémoire porte sur l'impact des cours d'eau naturels sur la santé mentale. Elle a notamment élaboré une liste d'indicateurs bénéfiques pour le bien-être psychologique, qui pourraient être intégrés dans la conception des projets de restauration. La remise du mémoire de Lisa est prévue pour juin 2026, mais une première partie de son travail est disponible en Annexe A. Cette collaboration permet ainsi d'élargir la portée des projets de renaturation en prenant en compte également la dimension humaine et sanitaire.

Chapitre 2

État de l'art : les indicateurs de qualité des cours d'eau existants

Le chapitre précédent a mis en évidence les principaux mécanismes naturels qui régissent le fonctionnement d'un cours d'eau, ainsi que les dérèglements induits par leur altération. Les opérations de restauration permettent de tendre vers un état naturel.

Par conséquent, il devient nécessaire de pouvoir quantifier de manière la plus objective la qualité d'un tronçon de cours d'eau. Tout d'abord, cela permet d'établir une hiérarchie d'intervention. Par exemple, lorsque plusieurs sites doivent être renaturés sous contrainte budgétaire, elle désigne en priorité les tronçons qui exigent une restauration immédiate. Ensuite, la détermination de la qualité du cours d'eau permet de mettre en avant les éléments du cours d'eau les plus altérés, et permet donc de sélectionner la stratégie de restauration la mieux adaptée à la situation. Finalement, elle permet de quantifier l'amélioration de la qualité après travaux et d'assurer un suivi post-travaux.

Différents outils ont été mis au point pour répondre à cette exigence. Il s'agit d'indices mesurant la qualité biologique, physico-chimique ou hydromorphologique d'un cours d'eau.

Les indices biologiques expriment le plus souvent le rapport entre la valeur observée d'un paramètre biologique et sa valeur en *conditions de référence*[1] pour les masses d'eau naturelles, ou en *potentiel écologique maximal* pour les masses d'eau artificielles ou fortement modifiées [62]. Un exemple de description d'indice biologique, l'indice poissons rivière, est disponible en Annexe C.

Les indices physico-chimiques, quant à eux, évaluent l'oxygénation, la température, le pH, la conductivité, la pollution organique, la turbidité ou encore la charge en nutriments du cours d'eau [63].

Finalement, les indices hydromorphologiques visent à décrire la qualité de la structure du cours d'eau, en prenant en compte la nature du substrat, la granulométrie du lit, la morphologie lon-

1. Compte tenu de la variabilité écologique des écosystèmes, aucun standard absolu ne peut être édicté pour l'ensemble des États membres ; la Directive-cadre sur l'eau (DCE) définit donc le *bon état* comme un état proche de celui que l'on rencontrerait sous impact anthropique minimal, tandis que le *potentiel écologique maximal* constitue l'objectif pour les masses d'eau artificielles ou fortement modifiées [62].

gitudinale et transversale. Elle étudie également les variations naturelles de hauteur d'eau ou de vitesse d'écoulement [72].

Dans le présent mémoire, seuls les indices hydromorphologiques seront passés en revue. Les indices biologiques et physico-chimiques ne sont toutefois pas écartés, car ils pourront être intégrés lors de futurs travaux et permettront d'analyser l'évolution du site avant et après intervention.

Cette attention portée sur l'hydromorphologie se justifie par le contexte de l'étude. Les tronçons examinés sont de petits cours d'eau et l'objectif est d'obtenir rapidement et à faible coût un diagnostic fiable de l'état du tronçon considéré. Or, l'application d'indices biologiques mobilise des moyens conséquents tels que des campagnes de pêche électrique, des inventaires de macro-invertébrés ou de macrophytes et des analyses de laboratoire. De leur côté, les indices physico-chimiques exigent des séries de mesures régulières ainsi qu'un équipement spécialisé. Les indices hydromorphologiques, pour la plupart nécessitant des mesures simples de terrain ou des observations, offrent dès lors le meilleur compromis entre la précision recherchée et les contraintes opérationnelles.

Cette section vise donc à décrire les indices hydromorphologiques existants les plus pertinents au vu du contexte de l'étude. Cette analyse permettra de mettre en avant les composantes que l'IPCE devra incorporer a minima. Les différentes méthodes d'acquisition de données nécessaires au calcul de ces indices seront aussi détaillées.

2.1 Les indices hydromorphologiques

2.1.1 IHMD : indice hydromorphologique de la diversité

Cet indice est basé sur l'évaluation quantitative de la diversité morphologique des projets d'aménagement des eaux. Une importante différence entre les cours d'eau à la morphologie naturelle et ceux dont la morphologie est artificielle réside dans la diversité morphologique, comme exposé en figure 2.1.



FIGURE 2.1 – Tronçon proche de l'état naturel (gauche) et à faible diversité des habitats (droite) [29].

La chenalisation d'un cours d'eau entraîne son homogénéisation et donc une diminution de la richesse en espèces et de la biomasse d'organismes des milieux aquatiques et humides. En effet, les organismes présents dans les cours d'eau ont besoin de différents types d'habitats (zone de recirculation, zone plus ou moins profonde, etc.) afin de s'y reproduire et se développer. La vitesse du courant, la hauteur d'eau, et leurs paramètres statistiques décrivent la diversité morphologique d'un tronçon de cours d'eau. Les paramètres statistiques des valeurs hydrauliques peuvent être combinés en une variable, l'IHMD, à l'aide d'une définition mathématique [29].

L'écart-type σ et la moyenne μ interviennent dans l'expression de la diversité $V(i)$ d'une valeur hydraulique en 2.1.

$$V(i) = (1 + c_{v,i})^2 = \left(1 + \frac{\sigma_i}{\mu_i}\right)^2 \tag{2.1}$$

Finalement, l'IHMD correspond au produit de l'indice partiel de la diversité de la vitesse du courant v et de la profondeur t, exprimé en 2.2.

$$\text{IHMD}_{\text{tronçon}} = \prod_i V(i) = V(v) \cdot V(t) = \left(1 + \frac{\sigma_v}{\mu_v}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{\sigma_t}{\mu_t}\right)^2 \tag{2.2}$$

Cet indice est donc représenté par une valeur numérique. Une valeur élevée représente un état proche de l'état naturel, tandis qu'une valeur faible décrit un état homogénéisé et donc faible en

biodiversité, représenté à la figure 2.2.

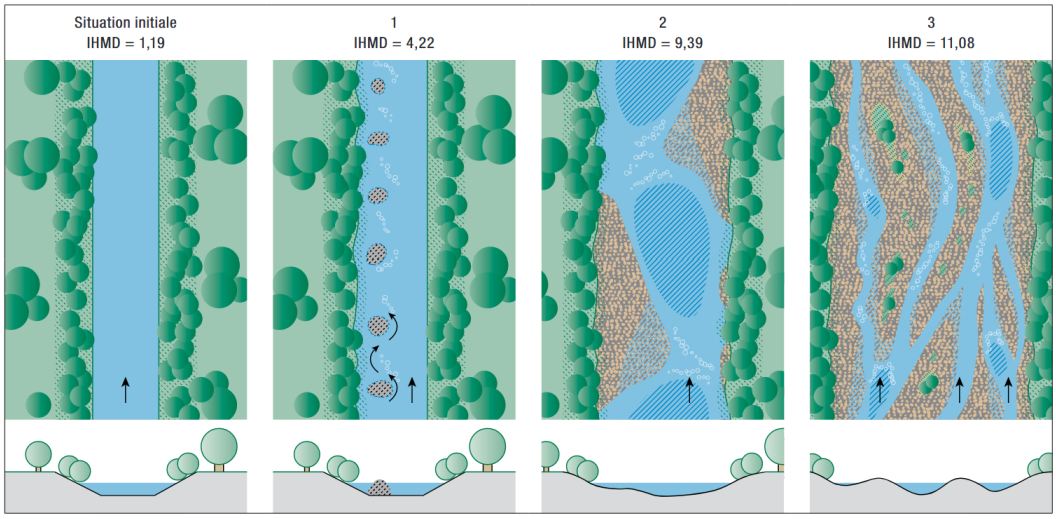


FIGURE 2.2 – Schéma des variantes envisageables pour une revitalisation avec indication de l'IHMD de chaque variante. De gauche à droite : situation initiale, variante 1 (fixation de pierres bétonnées), variante 2 (aménagement de bancs de gravier), variante 3 (rétablissement de la dynamique complète) [29].

Gostner et Schleiss [28] ont définit plusieurs gammes de valeurs typiques pour l'IHMD, illustré en figure 2.3, évalué dans des rivières à charge caillouteuses.

	IHMD = 1	1 < IHMD < 4	4 < IHMD < 5	5 < IHMD < 9	10 < IHMD
Qualité	Score minimal	Médiocre	Faible	Modérée	Forte
Type de cours d'eau		Canal	Tracé rectifié	Peu anthropisé	Naturel
Commentaire	Absence de variabilité	Très peu de variabilité	Tracé rectifié Faibles variations	Peu anthropisé Variabilité importante	Dynamique hydromorpho fortement développée

FIGURE 2.3 – Classes de scores pour l'IHMD [29].

Cependant, si la biodiversité est appauvrie pour d'autres raisons que les caractéristiques morphologiques et structurelles du cours d'eau (par exemple à cause des apports nutritifs de l'agriculture ou de la pollution chimique), le score IHMD ne reflétera pas forcément le résultat réel du projet de renaturation. Il faut donc veiller à la connectivité longitudinale et transversale.

Cet indice présente de nombreux avantages. Tout d'abord, il permet un diagnostic à l'échelle du tronçon, décrivant la mosaïque d'habitats [29]. Ensuite, l'IHMD est une évaluation quantitative, ce qui évite d'avoir recours à des experts et une analyse subjective. De plus, cet indice peut être déterminé à partir des valeurs hydrauliques déduites de modélisation numérique. Par ailleurs, cet

indice a été abondamment étudié et expérimenté dans plusieurs pays, témoignant ainsi de son intérêt à l'échelle internationale. Le nombre important d'études à son sujet peuvent fournir un socle solide de paramétrisation de ce dernier au contexte de Rivialis, centré sur les petits cours d'eau belges [12, 24, 71].

Par contre, cet indice permet uniquement de comparer quantitativement plusieurs variantes de projets d'aménagement des eaux du point de vue de l'amélioration de la diversité morphologique. Il ne s'agit pas d'un outil d'appréciation de l'état initial ou de suivi [29]. Finalement, cet indice peut être utilisé en parallèle d'autres indices proposant une analyse plus complète. Il peut facilement être intégré aux simulations numériques du cours d'eau pour évaluer la qualité hydromorphologique de plusieurs scénarios.

2.1.2 IAM : indice d'attractivité morphodynamique

Cet indice se base sur la détermination de pôles d'attraction afin d'évaluer la qualité de l'habitat pour la faune piscicole [34]. La combinaison des valeurs de vitesse de courant, hauteur d'eau et de substrat du fond du lit constitue le niveau d'attraction des pôles d'une station. En effet, les variables hydrauliques telles que la hauteur d'eau et vitesse d'écoulement sont de bons indicateurs des conditions d'habitats [6]. Les mesures de vitesse et de profondeur sont divisées en 5 classes significatives pour le poisson, exposées à la table 2.1. Les limites ont été définies statistiquement à partir de la distribution spatiale des poissons observée sur une centaine de stations [5].

Classe	1	2	3	4	5
Profondeur [cm]	< 5	6–20	21–70	71–150	> 151
Vitesse [cm/s]	< 10	11–40	41–80	81–150	> 151

TABLE 2.1 – Classification des profondeurs et vitesses dans le cadre de l'IAM.

Concernant le substrat, il est subdivisé en 16 catégories, chacune liée à un score d'attractivité, allant de 100 à 1. Ces scores sont repris à la table 2.2.

Code	Substrat	Attractivité
BRA	Branchages, grosses racines immergées	100
BER	Sous-berges	90
HYI	Hydrophytes immergés	80
AFF	Sources, résurgences, affluents	70
BLO	Blocs avec caches	60
GAL	Galets	50
HEL	Hélophytes	40
CHV	Chevelus racinaires, végétations rases	40
BLO	Blocs sans anfractuosités	30
GGR	Galets et graviers mélangés	25
GRA	Graviers	20
GLS	Galets pavés (sans anfractuosité)	10
LIT	Litières organiques	10
SAB	Sables	8
FIN	Éléments fins, limons, vases	4
DAL	Dalles, surfaces indurées (sans cache)	1

TABLE 2.2 – Hiérarchisation de l'attractivité des différents substrats [32].

Concrètement, il s'agit de réaliser une cartographie à partir de transects incluant les hauteurs d'eau, les vitesses de courant et les substrats. Ensuite, ces 3 cartes sont superposées et l'intersection de ces 3 niveaux d'information permet de tracer la cartographie des pôles d'attraction [55]. Chaque type de combinaison correspond à un score calculé à partir de l'expression 2.3.

$$IAM = \left(\sum (S_i * Attract(subst_i)) * V(subst_i) * V(p) * V(v)\right) \tag{2.3}$$

avec

V	Variété (nombre de catégories ou de classe)
v	Vitesse (m/s)
p	Profondeur/hauteur d'eau (m)
$subst$	Substrat
S_i	Surface relative au substrat i
Attract($subst_i$)	Attractivité du substrat i

Finalement, l'IAM calculé est comparé à un IAM de référence, qui correspond à la valeur que devrait atteindre l'IAM sans perturbations physiques. Le rapport entre l'IAM calculé et l'IAM de référence décrit la qualité habitationnelle de la station, tel que représenté à la table 2.3 [34].

% IAM référence	0 – 20 %	20 – 40 %	40 – 60 %	60 – 80 %	80 – 100 %
Qualité	Nulle	Mauvaise	Moyenne	Bonne	Excellente

TABLE 2.3 – Classes de qualité définies par rapport à l'IAM théorique.

Un cas concret d'utilisation de l'IAM est illustré à la figure 2.4. Cette analyse hydromorphologique et d'habitats a été conduite au niveau du Lunain à Nonville (France) afin d'étudier l'état actuel de la rivière en vue d'un potentiel projet de renaturation. Il en témoigne une assez bonne hétérogénéité du milieu malgré une faible attractivité des substrats dominants [35].



FIGURE 2.4 – Etude de restauration de la continuité écologique au droit du Domaine de Nonville sur la rivière du Lunain [35]. Cartographie des hauteurs d'eau, vitesses d'écoulements et pôles d'attraction et substrats.

En définitive, cette méthode offre d'abord une caractérisation précise du lit du cours d'eau, en tenant compte de la vitesse, de la profondeur et du substrat, et permet ainsi de cartographier l'intégralité de la station. Elle est également plus simple à mettre en œuvre que d'autres approches, puisque seuls trois paramètres sont à intégrer, tout en proposant un compromis intéressant entre précision et efficacité.

Cependant, en se fondant principalement sur la structure du lit, la méthode peut se révéler demandeuse en temps. L'évaluation du substrat demeure une analyse subjective, nécessitant une personne experte, surtout lorsqu'il s'agit de lui attribuer un score. La variabilité des profondeurs et des vitesses peut aisément être déterminée numériquement. En revanche, la variabilité et l'attractivité des substrats se révèlent plus difficiles à évaluer de cette manière, en l'absence de mesures détaillées réalisées sur le terrain [30].

2.1.3 Indice tronçon

La détermination de la qualité du cours d'eau commence par sa sectorisation. Le cours d'eau est découpé en tronçons dont la longueur varie d'une centaine de mètres à plusieurs kilomètres. Un tronçon correspond à une entité homogène du point de vue géomorphologique, habitationnel, dynamique et sur le plan de l'artificialisation.

Ensuite, pour chaque tronçon, les 4 composantes suivantes sont étudiées : l'hétérogénéité du lit mineur, son attractivité, sa stabilité et sa connectivité avec les autres compartiments du corridor fluvial [74]. Ces composantes sont représentées à la figure 2.5. La détermination de la qualité du cours d'eau est donc faite à travers ces 4 composantes pour lesquelles sont recensés les éléments favorables ou défavorables [74]. A partir des mesures sur le terrain et de grilles normalisées, les scores synthétiques suivants sont calculés : score d'hétérogénéité, score d'attractivité, score de connectivité et score de stabilité. Ces scores sont distingués en 5 classes et sont repris à la figure 2.6.

Les scores concernant l'hétérogénéité, l'attractivité et la connectivité doivent être comparés à un tronçon de référence, considéré comme intact pour la typologie du cours d'eau. Cependant, la démarche idéale serait d'évaluer le degré d'altération de chaque tronçon d'après l'évolution historique de la qualité physique (si ces données sont disponibles).

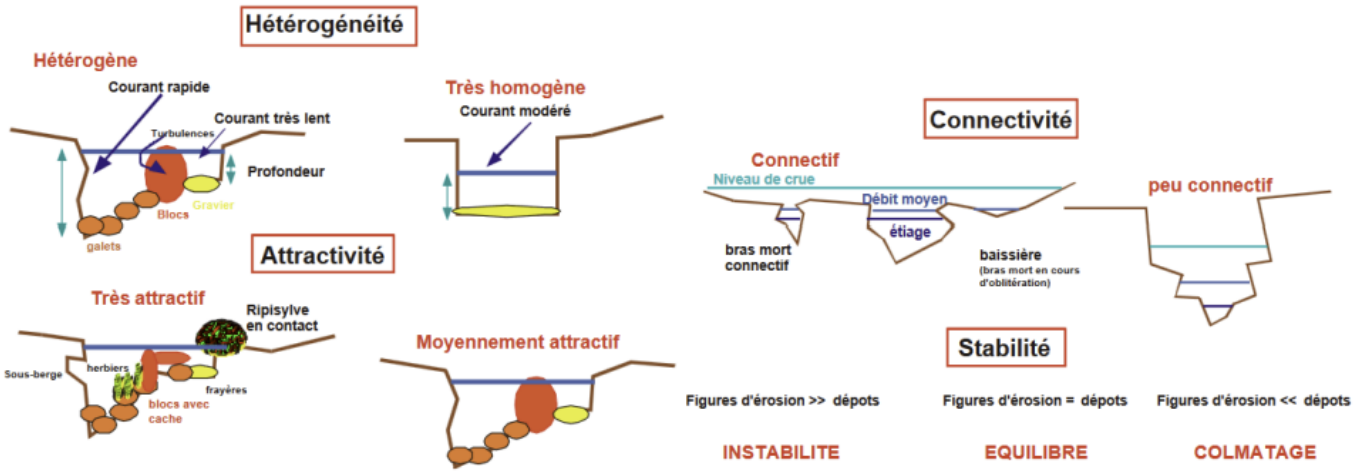


FIGURE 2.5 – Composantes de la qualité physique des cours d'eau dans le cadre de l'indice tronçon [74].

Hétérogénéité H sur 111		Attractivité A sur 90		Connectivité C sur 130		Stabilité S. de – 60 à + 40		Qualité Physique (QP) = (H + A) x C x K sur 30 600	
A	> 50	A	> 45	A	> 65	Sédimentation	> +10	A	> 6 500
B	40 - 50	B	34 - 45	B	49 - 65	Équilibre	-10 / +10	B	3 500 - 6 500
C	28 - 40	C	23 - 34	C	33 - 49	Érosion	-25 / -10	C	1 500 - 3 500
D	14 - 28	D	11 - 23	D	16 - 33	Forte érosion	-60 / -25	D	400 - 1 500
E	< 14	E	< 11	E	< 16	S détermine le coef. de stabilité, dont la valeur dépend de l'hétérog.		E	< 400

Valeurs prises par le coefficient de stabilité K en fonction de l'Hétérogénéité du tronçon				
Si la valeur du score de stabilité S est	*-60 < **S** < -26*	*-25 < **S** < -11*	*-10 < **S** < 9*	*10 < **S** < 40*
Et si le milieu est hétérogène (H > 50)	***K** = 0,85*	***K** = 1*	***K** = 1,25*	***K** = 0,75*
Et si le milieu est homogène (H < 50)	***K** = 0,85*	***K** = 1*	***K** = 0,85*	***K** = 0,75*

FIGURE 2.6 – Limites des différentes classes de qualité pour l'indice tronçon [74].

Pour plus de précision, la description des éléments inclus dans l'hétérogénéité, l'attractivité, la connectivité et la stabilité est détaillée ci-dessous.

L'hétérogénéité comprend la sinuosité, les caractéristiques hydromorphologiques et la diversité des faciès. Cette dernière est obtenue par comparaison des hauteurs d'eau et vitesses le long d'un profil longitudinal.

Ensuite, l'attractivité concerne le type et la qualité des substrats (intérêts pour la faune pissicole) ainsi que la quantité et la qualité des caches et des abris.

La connectivité se concentre sur la caractérisation du lit majeur, la ripisylve, la présence d'obstacles tels que des seuils et la capacité de circulation des poissons.

Finalement, la stabilité des berges et du lit caractérise leur degré et fréquence d'érosion et d'incision.

Il est important de garder en tête que les 4 composantes ne sont pas indépendantes. En effet, elles interfèrent largement les unes sur les autres, sans toutefois êtres redondantes [74].

L'évaluation de la qualité hydromorphologique de cours d'eau avec cet indice présente plusieurs avantages majeurs. Tout d'abord, l'analyse est effectuée au niveau des échelles du tronçon, de la station et des faciès autorisant un diagnostic détaillé du site étudié. Les résultats obtenus sont à comparer avec une situation de référence ce qui permet de mettre en lumière les altérations causées par des pressions anthropiques [74].

Cependant, cette méthode présente certains désavantages similaires à l'IAM tels que la subjectivité ainsi que des mesures chronophages. La composante d'hétérogénéité comprend une majorité de variables objectives, mais l'appréciation de l'attractivité l'est moins. Pour finir, la situation de référence reste une notion très délicate à définir et nécessite une étude approfondie du secteur étudié.

2.1.4 SMG : Système modulaire gradué

Cette méthode d'appréciation des cours d'eau en Suisse a été mise au point suite aux *Recommandations pour l'analyse des eaux superficielles en Suisse* publiées en 1982. Les objectifs visés concernent l'identification de déficits, les causes sous-jacentes et les mesures appropriées à mettre en place et finalement assurer le suivi de l'impact de ces mesures. Le présent système d'analyse est composé de différents modules concernant l'hydrodynamique et la morphologie, la biologie et des effets chimiques et toxiques. L'analyse de ces modules peut être faite à une certaine intensité d'investigation ainsi qu'à un périmètre d'étude. Les 3 niveaux d'investigation sont R (Région), C (Cours d'eau), et T (Tronçon). La figure 2.7 résume les divers modules d'étude ainsi que leur périmètre et degré d'investigation.

Niveau ↓	Hydrodynamique et morphologie		Biologie					Effets chimiques et toxiques	
	Hydrologie	**Ecomorphologie***	**Rives et végétation des rives**	**Plantes aquatiques et palustres**	**Algues**	**Macrozoobenthos**	**Poissons**	**Chimie des eaux**	**Ecotoxicologie**
R	Caractérisation du régime d'écoulement et recensement global des influences	Recensement des atteintes morphologiques à l'aide de quelques paramètres indicatifs, identification des perturbations générales, appréciation de l'état naturel par tronçon		Estimation de la fréquence des plantes aquatiques	Estimation de la fréquence des algues. Examen des diatomées	Recensement et appréciation simples sur la base des taxons identifiables sur le terrain	Sondages pour déterminer la liste des espèces	Détermination des pollutions anthropiques par sondage à l'aide de quelques paramètres	Sondages, 2 à 3 tests simples, dilution pour l'obtention de la concentration dite NOEC**
C	Relevé systématique et quantification grossière des influences	Analyse des insuffisances du réseau, élaboration de plans de mesures avec fixation de priorités		Cartographie des espèces présentes	Examen des diatomées	Comparaison des taxons présents avec des cours d'eau de référence	Recensement approfondi des espèces présentes	Analyse de nombreux paramètres de pollution	Contrôle saisonnier ou plus fréquent des rejets les plus importants
T	Quantification large et mesure des influences	P. ex. examen détaillé des zones alluviales		P. ex. relevé quantitatif des espèces et de leurs fluctuations	P. ex. études détaillées au niveau des espèces, y compris les fluctuations	P. ex. études détaillées au niveau des espèces, y compris les fluctuations	P. ex. études quantitatives	P. ex. analyses spéciales	Différents relevés toxicologiques et chimiques : cadastre des rejets

FIGURE 2.7 – Présentation du système modulaire à trois niveaux [50].

Chaque module peut-être utilisé indépendamment des autres, le système modulaire garantissant que les relevés dans les différents modules soient complémentaires et les résultats comparables [50]. Le choix de la méthode à utiliser dépend de l'objectif de l'étude. Tout d'abord, le niveau région (R) représente à une étude de quelques paramètres clés de tous les cours d'eau d'une région. Cela signifie donc une analyse peu approfondie ainsi que de faibles moyens mis en jeu pour l'analyse [50]. Cette méthode permet une mise en évidence des déficits évidents dans la zone étudiée. Ensuite, le niveau cours d'eau (C) correspond à l'étude d'un nombre plus élevé de paramètres de l'ensemble d'un cours d'eau et de ses affluents. Cela implique donc une analyse plus poussée et un niveau de moyen

intermédiaire pour l'analyse et permet d'aboutir à une analyse détaillée du réseau hydrographique. Finalement, le niveau tronçon (T) implique l'étude de certains tronçons d'un cours d'eau. Il s'agit d'analyses ciblées pour répondre à des questions de détails et implique donc des moyens importants mis en jeu ponctuellement. Cette méthode mène donc à des analyses approfondies de problèmes déterminés.

Module écomorphologique niveau C

Dans le cadre du projet Rivialis, la combinaison de module et de niveau d'investigation intéressante est la méthode concentrée sur l'écomorphologie étudiée au niveau du cours d'eau (C). La notion d'écomorphologie correspond à la totalité des caractéristiques structurelles d'un cours d'eau et de ses abords immédiats. Cela inclut la structure du lit, des rives et du chenal ainsi que la connectivité du cours d'eau [39].

Les objectifs de développement décrivent l'état écomorphologique optimal atteignable par le cours d'eau en tenant compte des restrictions [39]. La différence entre l'état actuel et l'objectif de développement est appelé potentiel de développement et est représenté à la figure 2.8.

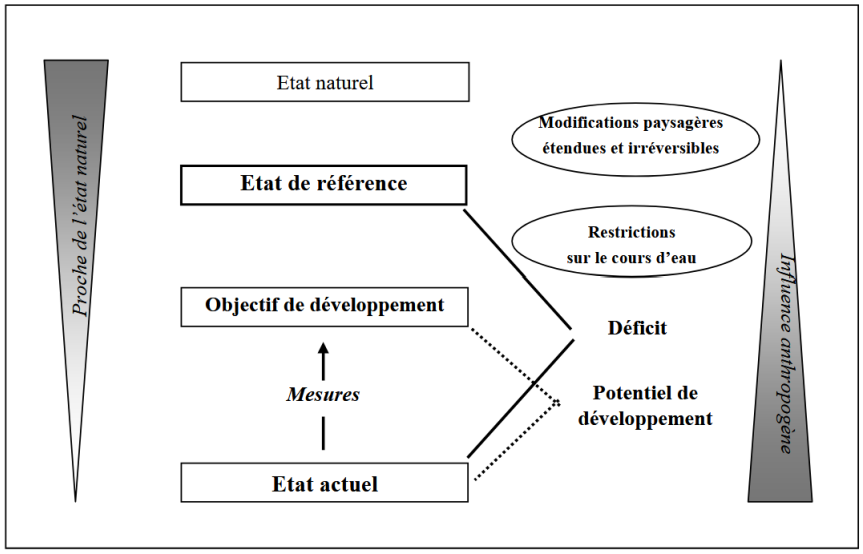


FIGURE 2.8 – Etat de référence par rapport à l'état naturel [39].

La méthode repose donc sur la détermination du déficit écomorphologique. Ce dernier est calculé par comparaison de l'état observé avec un état de référence qui correspond à un état qui s'inscrirait dans les conditions actuelles si toutes les pressions anthropiques cessaient sur les abords immédiats du cours d'eau [39]. Cet état de référence prend en compte des influences humaines étendues et irréversibles, et ne correspond donc pas à un cours d'eau naturel non impacté par l'homme.

La définition du déficit est basée sur l'analyse de 3 caractéristiques, représentées à la figure 2.9. Premièrement, la structure du cours d'eau est décrite comme facteur déterminant pour les habitats. Ensuite, l'espace du cours d'eau est un élément influençant les processus morphodynamiques et

constituant le cadre de la structure du cours d'eau. Finalement, la libre circulation représente la condition de connectivité écologique longitudinale des réseaux hydrographiques.

Caractéristiques du cours d'eau	**Structure**	**Espace**	**Connectivité longitudinale**
Critères	**- lit** **- pied de berge** **- chenal**	**- largeur** **- nature** (rives selon niveau C)	**- perturbations de la libre circulation**
Paramètres	- degré et - type d'aménagement du lit / pied de berge (selon niveau C) - paramètres de la structure du chenal	Largeur définie d'après: - espace minimal - biodiversité - bande de divagation	- hauteur de chute - profondeur d'affouillement - pente - rugosité - etc.

FIGURE 2.9 – Aperçu des caractéristiques du cours d'eau prises en compte [39].

A chaque caractéristique du cours d'eau est associée une valeur de déficit de I (correspond à l'état de référence du cours d'eau) à V (cours d'eau artificiel). La valeur de déficit à attribuer pour chaque élément analysé est déterminée via une grille d'évaluation, représenté à la figure 2.10.

I - II déficit nul ou faible	**III déficit moyen**	**IV déficit élevé**	**V déficit très élevé**
pas d'aménagement en dur	aménagement en dur du lit (indépendamment du type d'aménagement) < 10 %	aménagement en dur du lit (indépendamment du type d'aménagement) 10-30 % ou aménagement en dur perméable du lit > 30 %	aménagement en dur imperméable du lit > 30 %

FIGURE 2.10 – Grille d'analyse de la structure du lit et déficits associés [39].

Finalement, une valeur de déficit global est obtenue pour la structure du cours d'eau, l'espace du cours d'eau et pour la libre circulation. Pour la synthèse des déficits partiels, la valeur partielle la plus mauvaise détermine la valeur totale de la qualité écomorphologique du cours d'eau. En effet, cette méthode prend en compte la présence de facteurs limitants, qui réduisent donc la capacité fonctionnelle de tout le tronçon. Le procédé de synthèse des valeurs de déficits est illustré à la figure 2.11. Un exemple d'utilisation de cette méthode est représenté à la figure 2.12.

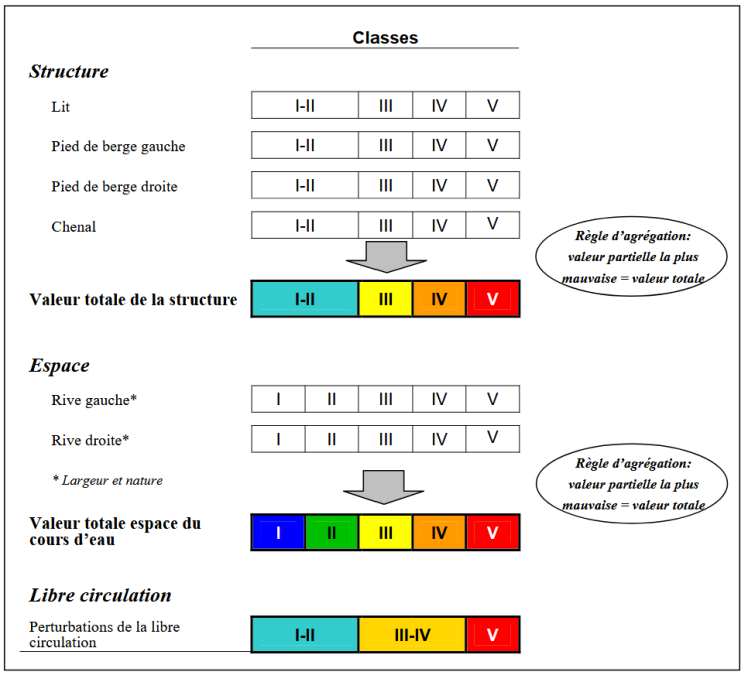


FIGURE 2.11 – Synthèse de l'analyse de déficit [39].

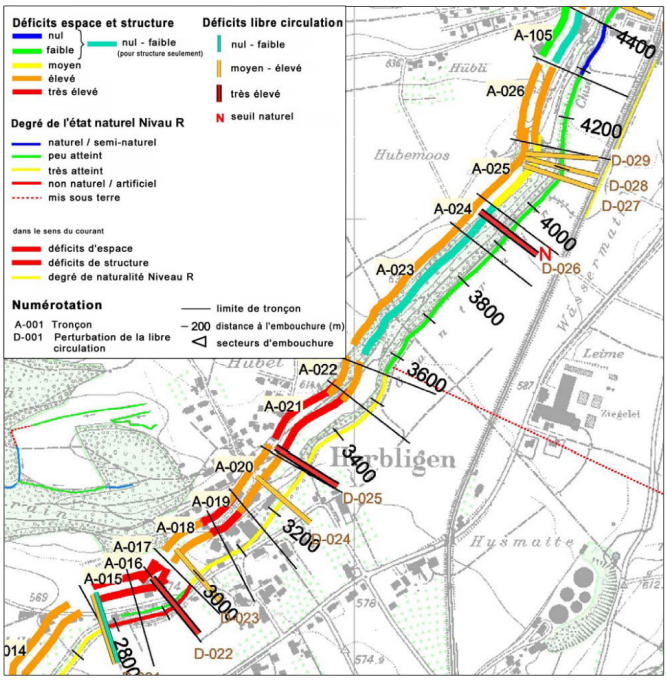


FIGURE 2.12 – Représentation des déficits. Exemple de représentation cartographique des déficits au niveau C sur le cours inférieur de la Chise (canton de Berne). Les déficits de structure et d'espace sont représentés comme des lignes parallèles au cours d'eau, les perturbations de la libre circulation comme des barres en travers du cours d'eau [39].

Pour finir, un avantage de cette méthode concerne l'analyse à différentes échelles spatiales (selon

les modules). Cela permet donc de mener une analyse selon le degré de précision souhaité.

Un autre avantage de cette méthode est que l'analyse du cours d'eau se fait à travers ses 3 caractéristiques qui le définissent : sa structure, son espace et sa connectivité longitudinale. Ceci permet de mettre en lumière une composante qui présenterait une qualité moindre par rapport aux autres, permettant ainsi d'orienter les projets de restauration.

Par contre, l'analyse de ces caractéristiques est basée sur des appréciations, ce qui confère au résultat un aspect plutôt qualitatif.

Finalement, la notion d'état de référence qui prend en compte les effets des pressions anthropiques irréversibles sur le cours d'eau peut s'avérer plus pertinente que la détermination du niveau de naturalité d'un cours d'eau. Cependant, la définition même de cet état ne semble ni triviale, ni objective.

2.1.5 Qualphy

Qualphy est un outil développé entre 1992 et 1996 par l'agence de l'eau Rhin-Meuse dans le but d'acquérir des connaissances sur l'hydromorphologie et d'en mesurer l'écart par rapport à une situation de référence [54].

Le principe de cette méthode repose sur la comparaison de chaque tronçon par rapport à une situation de référence. L'analyse est conduite pour les 40 paramètres principaux, et une cote allant de 0 (qualité nulle) à 100% est attribuée. Les 40 paramètres décrivent le lit majeur, mineur et les berges du cours d'eau. Finalement, une cote globale, correspondant à l'indice de milieu physique est attribuée au tronçon étudié en fonction de la pondération (dépendant de la typologie du cours d'eau étudié) [15]. Les 5 classes de qualité existantes sont reprises à la figure 2.13.

Les différentes typologies ainsi que les 40 paramètres étudiés sont disponibles aux figure D.1 et D.2 de l'Annexe D.

La qualité hydromophologique des cours d'eau wallons a été évaluée par cette méthode. Les résultats obtenus sont disponibles à la figure 2.14.

Note	Classe de qualité	Signification - interprétation
81 à 100 %	Qualité excellente à correcte	Le tronçon présente un état proche de l'état naturel qu'il devrait avoir, compte tenu de sa typologie (état de référence du cours d'eau).
61 à 80 %	Qualité assez bonne	Le tronçon a subi une pression anthropique modérée, qui entraîne un éloignement de son état de référence. Toutefois, il conserve une bonne fonctionnalité et offre les composantes physiques nécessaires au développement d'une faune et d'une flore diversifiées (disponibilité en habitats).
41 à 60 %	Qualité moyenne à médiocre	Le milieu commence à se banaliser et à s'écarter de façon importante de l'état de référence. Le tronçon a subi des interventions importantes (aménagements hydrauliques). Son fonctionnement s'y trouve perturbé. La disponibilité en habitats s'est appauvrie mais il en subsiste encore quelques éléments intéressants dans l'un ou l'autre des compartiments étudiés (lit mineur, lit majeur, berges).
21 à 40 %	Qualité mauvaise	Milieu très perturbé. En général, les trois compartiments (lit mineur, lit majeur et berges) sont atteints fortement par des altérations physiques d'origine anthropique. La disponibilité en habitats naturels devient faible et la fonctionnalité du cours d'eau est très diminuée.
0 à 20 %	Qualité très mauvaise	Milieu totalement artificialisé, ayant totalement perdu son fonctionnement et son aspectnaturel (cours d'eau canalisés).

FIGURE 2.13 – Interprétation des notes des cours d'eau selon la méthode Qualphy [30].

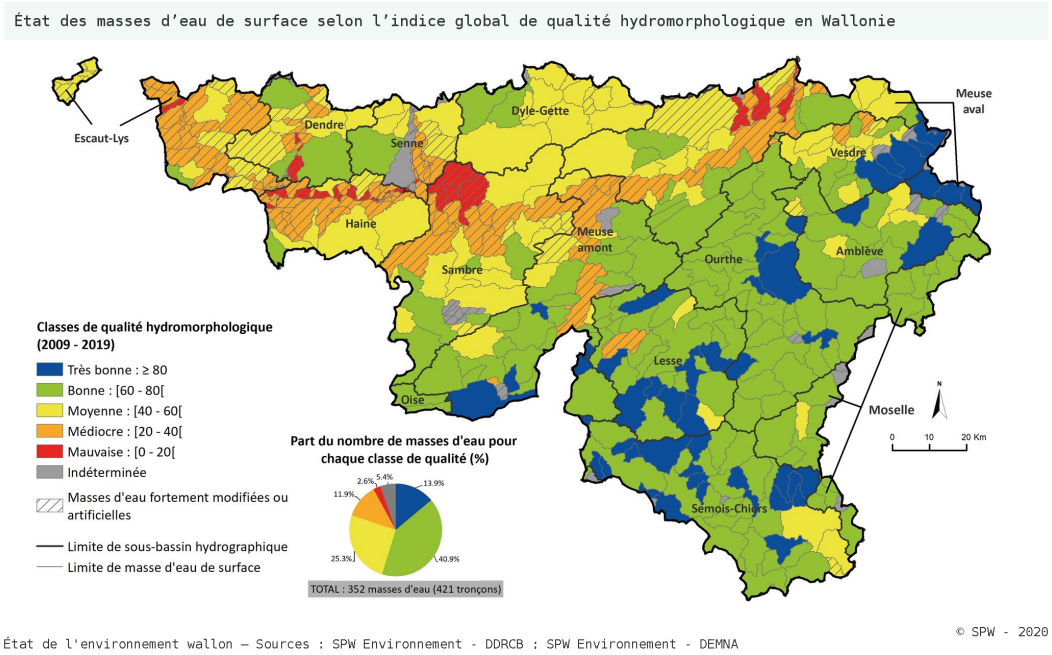


FIGURE 2.14 – Etat des masses d'eau de surface selon l'indice global de qualité hydromorphologique en Wallonie [78].

Cette méthode a été testée sur plusieurs sites belges et présente certaines qualités.

Tout d'abord, elle permet une approche globale grâce à l'analyse des 3 grandes composantes du cours d'eau : le lit majeur, les berges et le lit mineur [33]. Aussi, le classement normalisé en 5 classes aide à la communication des résultats et la comparaison entre tronçons [33]. Cet outil est utilisé par l'agence de l'eau Rhin-Meuse comme outil d'aide à la décision pour les projets de restauration [59].

Cependant, certains points négatifs sont à relever tels que l'aspect chronophage (estimation de

3,5 jours/personne/10km) de la méthode ainsi que l'évaluation qualitative de nombreux descripteurs, impliquant de la subjectivité [33].

2.1.6 MQI : morphological quality index

Cet indice a été développé en Italie afin de fournir un outil normalisé dans le cadre de la DCE [64]. La mise en place de cet indice poursuit un objectif triple : établir un diagnostic de l'altération morphologique, prioriser les actions de restauration et en assurer le suivi [65]. Cette méthode a été employée sur plus d'une centaine de tronçons en Europe (Italie, Autriche, Espagne, Roumanie, etc.) [11].

Les étapes décrivant la méthodologie à appliquer pour calculer le MQI sont décrites dans la figure 2.15. Tout d'abord, le cours étudié est découpé en tronçons homogènes. Ensuite, les 28 différentes composantes du cours d'eau sont analysées du point de vue de la fonctionnalité géomorphologique, l'artificialité et les changements morphologiques. Finalement, pour certains tronçons considérés comme représentatifs, une série de paramètres sont mesurés pour évaluer l'évolution de sa qualité morphologique.

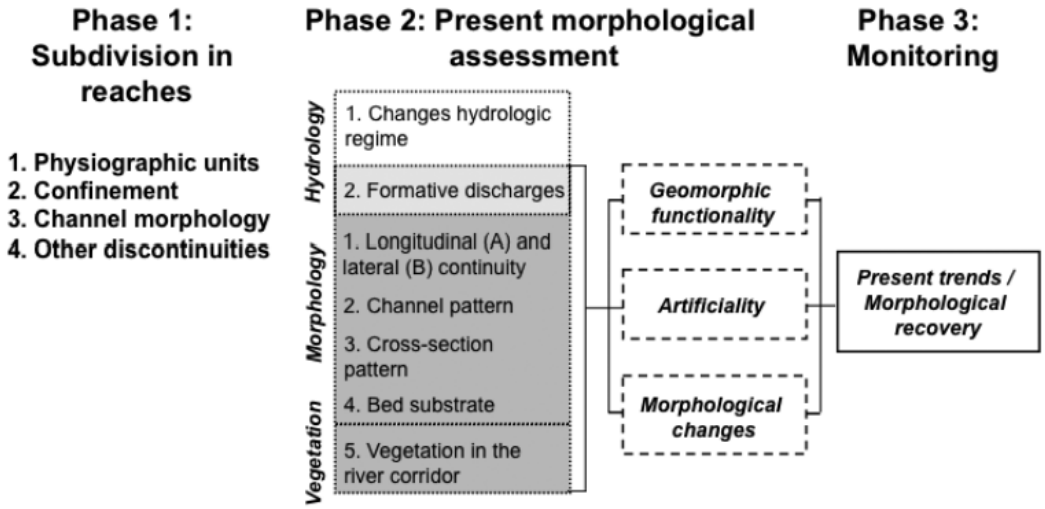


FIGURE 2.15 – Etapes à suivre pour le calcul du MQI [66].

La fonctionnalité géomorphologique permet d'analyser si le cours d'eau continue d'assurer les processus responsables de l'état sain d'une rivière se retrouvant dans un cours d'eau non altéré. Cela prend en compte des éléments tels que la mobilité des sédiments, l'érosion des berges, les inondations périodiques et les interactions avec la végétation. Ensuite, l'artificialité évalue la présence et la fréquence des interventions ou éléments artificiels, indépendamment de leur impact sur les processus naturels. Pour finir, les changement morphologiques se réfèrent à l'analyse des changements récents (100 dernières années) dans la morphologie du cours d'eau dûs aux perturbations humaines.

Ensuite, le niveau d'altération de chacun de ces 28 indicateurs est évalué et un niveau de confiance lui est attribué. Les 28 indicateurs ainsi que leurs scores sont disponibles à l'Annexe E. La valeur de l'indice est calculée à l'aide des équations 2.4 et 2.5. Finalement, les 5 classes de qualité définies sont représentées à la table 2.4.

$$MAI = \frac{S_{tot}}{S_{max}} \tag{2.4}$$

$$MQI = 1 - MAI \tag{2.5}$$

avec

MAI	Indice d'altération morphologique.
MQI	Indice de qualité morphologique.
S_{tot}	Somme des notes attribuées (témoignant de l'écart par rapport à un cours d'eau non altéré).
S_{max}	Ecart maximal possible pour la typologie de rivière.

	MQI $<$ 0.3	0.3 $<$ MQI $<$ 0.5	0.5 $<$ MQI $<$ 0.7	0.7 $<$ MQI $<$ 0.85	0.85 $<$ MQI
Qualité	Mauvaise	Faible	Modérée	Bonne	Forte

TABLE 2.4 – Classes de qualité définies pour MQI

Cet indice présente plusieurs qualités telles que l'analyse globale et détaillée du tronçon étudié. De plus, le score normalisé facilite les comparaisons dans le temps et entre sites.

Cependant, il nécessite une quantité importante de données, ce qui rend l'évaluation onéreuse et chronophage. Aussi, certains indicateurs restent subjectifs et nécessitent une personne experte pour les évaluer.

2.1.7 MMQI : modified MQI

Il s'agit d'une version adaptée du MQI mise au point pour les cours d'eau canadiens [43]. La pondération de certains paramètres a été adaptée afin de représenter au mieux la réalité des cours d'eau étudiés. En effet, ces cours d'eau présentent peu de structures artificielles et ce nouvel indice permet donc de réduire le poids des paramètres liés à ces structures. Ensuite, la qualité de l'habitat présente une pondération plus importante, comme visible en figure 2.16.

Indicators	Description	MQI	MMQI		
		Weighted scores	Weighted scores		
			Method A	Method B	Method C
F9: Variability of the cross section	Natural heterogeneity (absence of alterations)	0	0	0	0
	Limited alteration (≤33% of the reach)	3	6	11	8
	Significant alteration (>33% of the reach)	5	11	19	13
F10: Structure of the channel bed	Natural heterogeneity of channel bed	0	0	0	0
	Evident armouring or clogging	2	4	7	5
	Widespread armouring or clogging (>90% of the reach)	5	10	18	11
	Widespread substrate outcrops or alteration by bed revetments (>33% of the reach)	6	12	22	16
A13: Presence of stream incision	Absence or negligible presence of incision	N/A	0	0	0
	Presence of stream incision (≤50% of the reach)		4	4	4
	High presence of stream incision (>50% of the reach)		6	6	6
	Extremely high density of incision along the entire reach		12	12	12

FIGURE 2.16 – Comparaison du poids des paramètres F9, F10 et A13 entre le MQI et le MMQI. La méthode A du MMQI correspond à une situation sans barrages/déversoirs sur le tronçon étudié. La méthode B correspond à une absence de barrages/déversoirs sur le tronçon étudié et en amont. La méthode C convient à un tronçon qui ne présente aucun barrages/déversoirs en amont [43]

Le MMQI présente une meilleure corrélation au QHEI que le MQI, témoignant donc de la meilleure représentation des habitats et des meilleures considérations écologiques pour cette variante d'indice. Le QHEI est un indice développé aux Etats-Unis qui vise à évaluer qualitativement l'habitat dans les cours d'eau.

Cet exemple montre qu'un indice performant pour une catégorie de cours d'eau peut perdre en pertinence pour une typologie différente. Le choix de l'indicateur doit donc être adapté au contexte local, à l'échelle spatiale et à la durée de l'étude. L'application d'un outil aussi élaboré à n'importe quel milieu reste à faire avec prudence. Une phase préalable d'ajustement ou de recalibrage peut s'avérer nécessaire afin de garantir la représentation fidèle de l'indice à la réalité de terrain.

2.1.8 Méthodologie développée par l'OFB

L'Office français de la biodiversité (OFB) a mis au point cette méthodologie pour évaluer l'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant à l'échelle du linéaire. Cette méthode a été expérimentée dans plusieurs régions françaises (Côtes d'Armor, Finistère, Lore-Atlantique et Vendée) entre 2013 et 2019 afin de l'améliorer.

L'application de la méthodologie commence par un diagnostic réalisé sur 5 compartiments écologiques du cours d'eau : le lit mineur, la bande riveraine, les obstacles à la continuité écologique, la présence de réseau annexe et les rangs 0, représentés en figure 3.3. Le réseau annexe se concentre sur la présence d'éléments annexes tels que des drains ou des fossés. Les rangs 0, quant à eux, concernent les petits cours d'eau situés en amont du bassin versant du cours d'eau étudié. L'entièreté des paramètres étudiés est reprise à la figure 2.18.

L'étude de ces différents éléments se fait à l'échelle d'un segment. On considère qu'un segment est une entité dont la morphologie est homogène, obtenue grâce à l'examen des cinq facteurs sui-

vants : talweg, profil en long, tracé en plan, profil en travers et occupation des sols. Toute variation notable de l'un de ces critères conduit à la délimitation d'un nouveau segment. Par ailleurs, chaque confluence avec un autre cours d'eau justifie également la création d'un nouveau segment. La longueur d'un segment peut varier d'une dizaine de mètres à quelques centaines de mètres.

Le diagnostic est constitué de mesures sur le terrain et d'appréciation de différents éléments selon une attribution de classe qualitative : nul, faible, moyen, fort. Ce choix de classe est supporté par des photos, schémas et explications pour chaque élément à caractériser.

Ensuite, les données sont exploitées et permettent d'obtenir 4 indices (allant de 0 à 1) pour apprécier les altérations hydromorphologiques : l'indice d'artificialisation du lit mineur, indice de pression de la bande riveraine, indice de résilience et un indice relatif à la continuité écologique. L'indice de résilience permet de quantifier la capacité d'un cours d'eau à s'adapter à des modifications qui lui sont imposées.

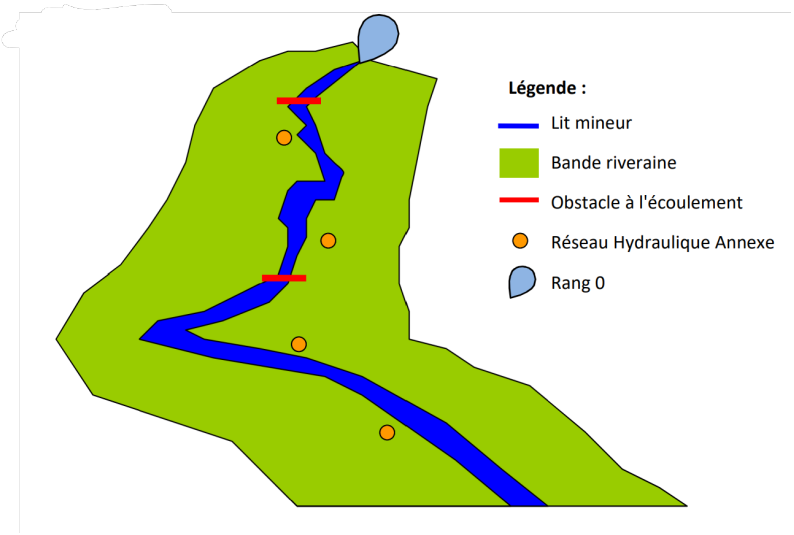


FIGURE 2.17 – Éléments constituant le diagnostic [41].

Compartiment	Description
Lit mineur	Type de réseau Forme de la vallée Largeur du fond de vallée à plat Positionnement par rapport au talweg Sinuosité Type d'écoulement Profil en travers simplifié (1) / Si cours d'eau de référence (3) Niveau d'encaissement Classes d'Evolution Morphodynamiques Granulométrie dominante et accessoire des radiers Colmatage des radiers et plats courants Matériaux des berges Erodabilité des berges Erosion des berges Apport solide Proportion des faciès d'écoulements Diversité d'habitats Rugosité du lit mineur Observations : spécificités (cours d'eau de référence, zone humide remblayée, etc.), photographies Nature d'intervention 1 et 2
Bande riveraine (analyse par rive ; 0-5m et 5-10m)	Type d'occupations des sols Description de la ripisylve (nature, épaisseur, continuité) Observations Nature d'intervention
Réseau hydraulique annexe (drains, fossés)	Présence de drains, fossés Nature de la connexion Préciser si impacts à connexion (morphologique, pollutions) Hauteur par rapport à la ligne d'eau Si fossés : profondeur et rugosité Observations, photographies
Obstacles à la continuité écologique	Type et sous-type Longueur, largeur de l'ouvrage Hauteur de chute, Fosse d'appel, Tirant d'eau Redan, Substrat Dispositifs de franchissement Usage Observations, photographies Nature d'intervention
Rangs 0	Type et sous-type de source Observations, photographies Nature d'intervention

FIGURE 2.18 – Paramètres descriptifs des différents compartiments étudiés [41].

Cette méthode présente plusieurs avantages. Pour commencer, l'analyse est faite sur chaque segment morphologiquement homogène, ce qui semble tout à fait pertinent pour orienter des travaux de restauration adaptés. De plus, elle est faite sur différents éléments composants le cours d'eau : lit mineur, bande riveraine, obstacles à l'écoulement, réseau hydraulique annexe et rang 0. Ceci permet de dériver 4 indices capables de mettre en lumière les éléments les plus altérés du tronçon étudié et ainsi orienter les projets de restauration à mettre en place.

Néanmoins, la majorité du diagnostic repose sur des appréciations in situ. Ceci implique donc une certaine subjectivité et des résultats qui peuvent dépendre de l'opérateur. Une importante partie du diagnostique repose sur des observations sur le terrain et le temps moyen de prospection est estimé à 5 km par jour [41].

2.2 Acquisition des données

Le calcul des indices détaillés en Section 2.1 nécessite au préalable de collecter une série de données caractérisant le tronçon étudié. Ces données peuvent être obtenues de 3 manières : grâce à des mesures et observations sur le terrain ; en récupérant des informations disponibles en ligne et accessibles publiquement ; ou encore en les déduisant de simulations numériques.

2.2.1 Mesures et observations in situ

Pour réaliser des mesures in situ, le cours d'eau est divisé en plusieurs transects. Un transect correspond à une ligne imaginaire le long de laquelle seront positionnés des points de mesure. La figure 2.19 représente un tronçon décomposé en 15 transects. Les points de mesure le long d'un transect sont représentés en figure 2.20. Les mesures effectuées à chacun de ces points permettent de caractériser précisément chaque transect. Afin d'obtenir une description fidèle et représentative du tronçon étudié, il est recommandé d'effectuer plusieurs transects le long du tronçon étudié.

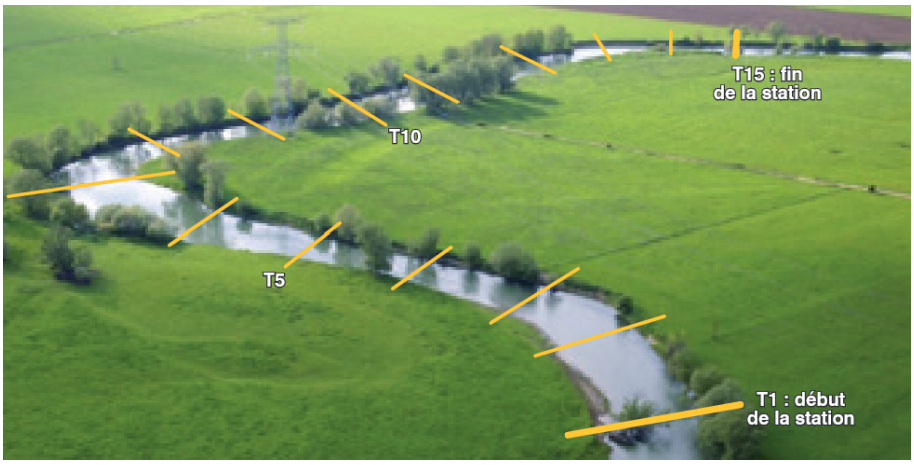


FIGURE 2.19 – Exemple de positionnement de quinze transects sur un site étudié [4].



FIGURE 2.20 – Positionnement des points de mesure sur un transect [4].

Dans cette section seront détaillées certaines mesures ou observations in situ pertinentes dans le cadre de la détermination de la qualité d'un cours d'eau. Cette présentation n'est bien évidemment pas exhaustive mais permet de donner une bonne idée du matériel et temps nécessaires pour diverses mesures et observations sur site.

Hauteur d'eau et vitesse d'écoulement

Plusieurs méthodes permettent d'estimer les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement dans un cours d'eau. Une méthode à la fois simple et adaptée aux petits cours d'eau est la règle à jauger. Il s'agit d'un outil simple et pratique, conçu pour mesurer la hauteur d'eau sans perturber l'écoulement lorsqu'il est placé dans le sens de l'écoulement, comme indiqué en figure 2.21. Placé perpendiculairement à l'écoulement, comme visible à la figure 2.21, il permet également d'estimer la vitesse de l'eau à l'aide d'une relation empirique basée sur la perte de charge mesurée entre l'amont et l'aval de l'échelle. Cette méthode permet ainsi d'obtenir rapidement, pour chaque point de mesure le long d'un transect, les valeurs de profondeur d'eau ainsi que la vitesse d'écoulement.

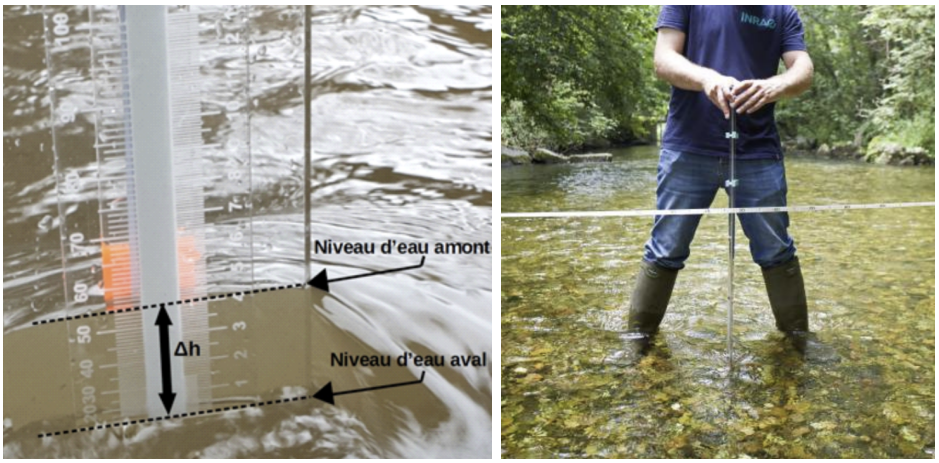


FIGURE 2.21 – Mesure de la vitesse de l'écoulement [22] (gauche) et de la hauteur d'eau (droite) avec la règle à jauger [37].

Granulométrie du lit mineur

Le lit mineur du cours d'eau est composé de différents éléments de taille et de forme variable. La composition du lit mineur est importante du point de vue hydromorphologique car elle va en définir la rugosité et donc la manière donc l'écoulement se produira. De plus, la diversité d'éléments constituant le lit participe à la création de nombreux habitats indispensables aux poissons tout au long de leur cycle de vie, ainsi qu'à leurs œufs et larves, comme déjà présenté à la figure 1.5.

Pour définir la granulométrie constituant le lit mineur du cours d'eau, la méthode de Wolman est adaptée au contexte des petits cours d'eau. Elle consiste à relever 100 éléments du lit de la rivière de manière aléatoire et à en mesurer l'axe intermédiaire, représenté à la figure 2.23.

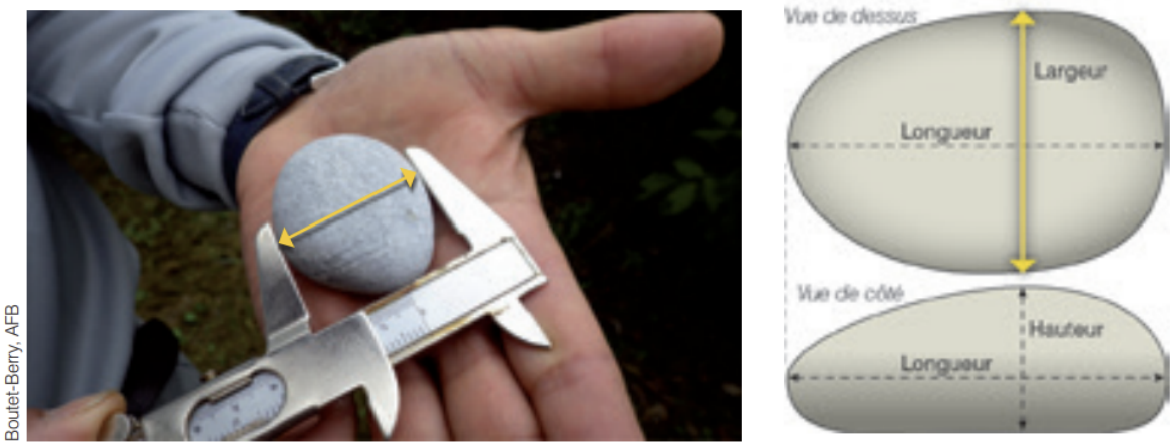


FIGURE 2.22 – Représentation des différents axes sur un élément. L'axe mesuré est celui indiqué en jaune [4].

A partir des échantillons mesurés, il devient possible de tracer la courbe granulométrique qui correspond au pourcentage cumulatif d'éléments composant le lit du cours d'eau. Un exemple de cette courbe est représenté en figure 2.23. Sur cette courbe peuvent être lus les différents quantiles. Par exemple, la flèche rouge indique la valeur du diamètre pour lequel 50% des éléments ont une taille inférieure à ce diamètre. Il s'agit du diamètre médian, noté d_{50}. De manière générale, d_x correspond au diamètre tel que x % des sédiments sont de taille inférieure.

La méthodologie complète de cette méthode figure à l'Annexe F.

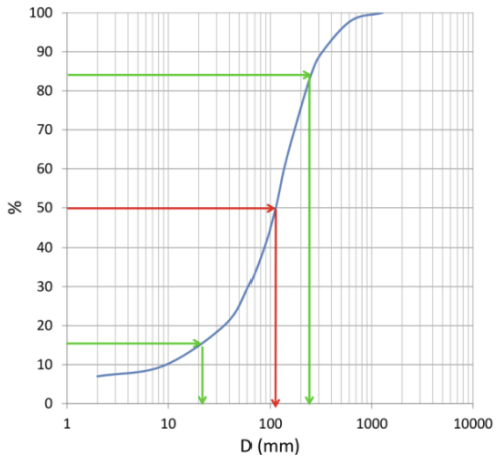


FIGURE 2.23 – Exemple de courbe granulométrique [76].

Observations

Certains éléments qui conditionnent la qualité d'un cours d'eau sont tout simplement à observer sur le terrain. Par exemple, la ripisylve, c'est à dire la formation végétale le long des berges peut, entre autres, être caractérisée par la hauteur des éléments qui la composent, comme indiqué en figure 2.24. La ripisylve peut aussi être caractérisée par sa continuité le long des berges.

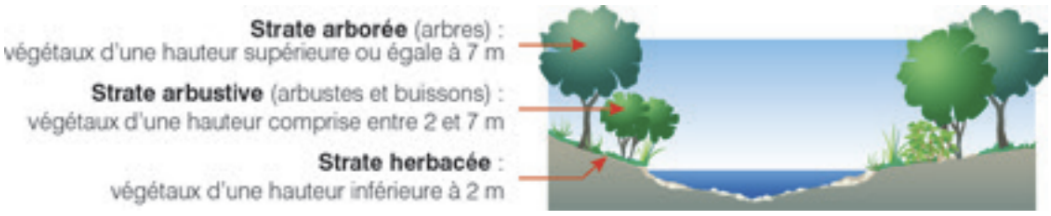


FIGURE 2.24 – Exemple de la stratification verticale de la végétation de la ripisylve [4].

Carhyce : un protocole standardisé d'acquisition de données

Afin d'homogénéiser la manière de mener des mesures et observations in situ, Carhyce, un protocole d'acquisition de données hydromorphologiques [73] a été mis au point. Il vise à caractériser de manière objective l'état et les pressions hydromorphologiques exercées sur les rivières par l'activité humaine, en intégrant différentes échelles de fonctionnement [4]. En effet, sur un tronçon étudié, des mesures concernant la géométrie hydraulique (transects, pente, débit), la description des habitats (berges et ripisylve) et la caractérisation de la granulométrie seront poursuivies. L'objectif de Carhyce est de proposer une méthodologie complète de mesures sur le terrain. Elle recommande donc le nombre de transects à faire et le nombre de points de mesures sur un transect en fonction des caractéristiques (longueur, largeur) du cours d'eau étudié.

Carhyce est fréquemment utilisé par diverses institutions et techniciens voulant obtenir un jeu de données complet sur l'hydromorphologie d'un tronçon de cours d'eau. Il présente en effet plusieurs atouts. Tout d'abord, il s'appuie sur un guide méthodologique complet, illustré et détaillé facilitant sa mise en œuvre. Ensuite, il repose sur une collecte de données standardisées et objectives, ce qui limite fortement le recours à l'expertise subjective et renforce la comparabilité des résultats.

2.2.2 Données disponibles en ligne

Il existe plusieurs bases de données regroupant des observations et des mesures réalisées dans le cadre de grandes campagnes de terrain. En Wallonie, certaines de ces bases sont accessibles gratuitement au public. Les informations qui y sont accessibles concernent plusieurs domaines variés, comme des cartes recensant les obstacles à la libre circulation des poissons ou les données d'occupation du sol à différentes échelles. Aussi, les Modèles Numériques de Terrain (MNT) de la Région wallonne, donnent une valeur d'altitude pour chaque maille de 0,5 mètre de côté sur l'ensemble du territoire. Le MNT est obtenu par couverture aéroportée de la technologie LiDAR (Light Detection and Ranging). Elle permet de déterminer la distance par la lumière. Un élément important à garder en tête est que le LiDAR s'arrête à la surface de l'eau, et donc le MNT fourni en réalité le niveau de la surface de l'eau et non celui du lit du cours d'eau.

En Wallonie, environ 200 stations limnimétriques sont réparties sur les cours d'eau non navi-

gables de catégorie 1 et 2, comme illustré à la figure 2.25. Ces stations enregistrent automatiquement la hauteur d'eau à intervalles réguliers. Les mesures sont ensuite converties en débits grâce à des courbes de tarage propres à chaque site, comme le montre la figure 2.26.

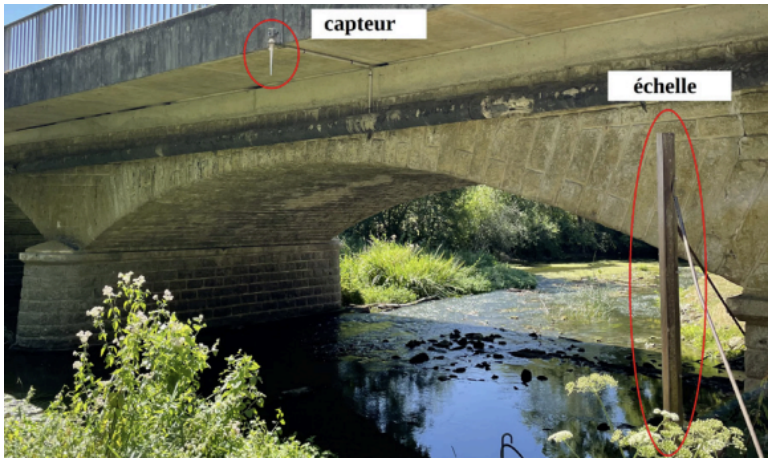


FIGURE 2.25 – Exemple de station hydrométrique sur l'Indrois à Genillé (DREAL CVL) [31].

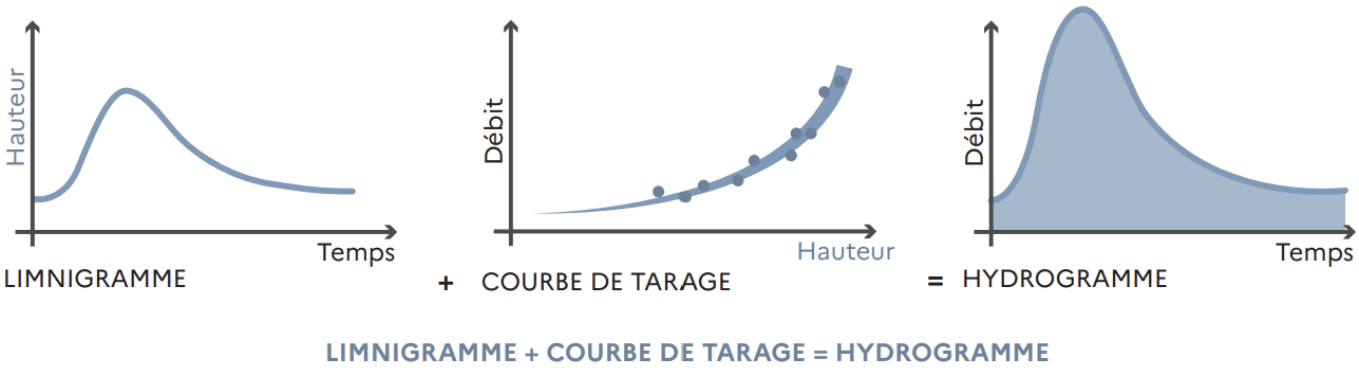


FIGURE 2.26 – Un hydrogramme est obtenu par conversion des hauteurs en débit au moyen d'une courbe de tarage (courbe de conversion représentant la relation entre hauteur et débit) [31].

Ces données accessibles en ligne sont particulièrement utiles lors des phases en amont d'une visite de terrain. Elles permettent de repérer à l'avance certains éléments clés du tronçon étudié et d'optimiser l'organisation des relevés, permettant ainsi un gain de temps le jour de la campagne. Par ailleurs, plusieurs éléments de diagnostic peuvent déjà être anticipés à partir de ces sources, fournissant un premier aperçu de l'état du cours d'eau avant visite du site.

2.2.3 Simulation numérique

Les simulations numériques contribuent à l'estimation des paramètres caractéristiques de l'écoulement tels que la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement sur l'ensemble d'un tronçon de cours d'eau. Ces simulations consistent à résoudre des équations qui décrivent l'écoulement, comme les

équations de Saint-Venant, sur un maillage représentant la géométrie du lit, avec des conditions frontières pertinentes en fonction du site étudié.

Ces modélisations numériques constituent une aide précieuse à plusieurs étapes du processus de détermination de qualité d'un cours d'eau. Pour commencer, en cas de données manquantes ou impossibles à mesurer dans certaines conditions ou à certains endroits du site, elles peuvent combler ces lacunes. Par ailleurs, la comparaison entre les résultats obtenus numériquement et les mesures de terrain permet de vérifier la cohérence du modèle ou de détecter d'éventuelles erreurs de mesure. Ensuite, elles rendent possible l'analyse du régime hydraulique sous différents scénarios. Enfin, elles facilitent le calcul de certains indices hydromorphologiques basés sur les valeurs statistiques des hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement, comme l'IHMD défini à la Section 2.1.1.

Dans le cadre du projet Rivialis, l'UCLouvain développe un outil de simulation (Watlab) qui résout les équations d'eau peu profonde via la méthode des volumes finis. Watlab permet de simuler des écoulements à surface libre en 1D ou 2D, en tenant compte des conditions frontières spécifiées.

2.2.4 Dans le cadre de Rivialis

Le projet Rivialis a pour ambition de développer un outil d'aide à la décision visant à simplifier et à accélérer le processus de restauration des petits cours d'eau en proposant un diagnostic fiable et peu coûteux. Dans le cadre de Rivialis, un diagnostic s'effectue en trois étapes représentées en figure 2.27. D'abord, **la collecte de données** permet de créer la carte d'identité du tronçon étudié. Ces données relatives au tronçon combinées à un modèle d'écoulement permet de **générer un jumeau numérique** reproduisant le comportement réel du cours d'eau. Ce jumeau sert de support à l'évaluation de l'état actuel du tronçon et à la simulation de divers scénarios de restauration. Finalement, la **qualité hydromorphologique** du cours d'eau sera **évaluée** sous différents projets de restauration. L'évaluation de la qualité de cours d'eau et la comparaison entre différents scénarios sera quantifiée par l'indice petit cours d'eau (IPCE).

La collecte de données repose sur des données publiques en ligne, les rapports scientifiques existants, des simulations numériques ou des mesures et observations du site. Rivialis vise à minimiser au maximum ces dernières afin de limiter les contraintes budgétaires et le temps nécessaire pour obtenir un diagnostic. Des relevés sur le terrain peuvent toutefois s'avérer nécessaires si les données sont indisponibles dans les sources citées précédemment, ou alors pour valider le modèle numérique créé.

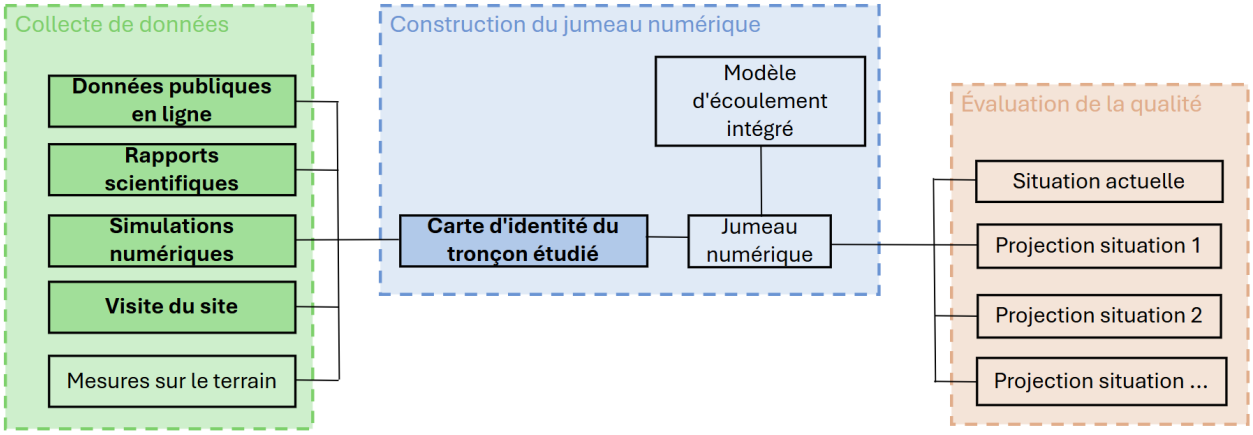


FIGURE 2.27 – Rivialis : processus de diagnostic de l'état d'un cours d'eau. Schéma fourni par Sandra Soares-Frazão.

2.3 Cahier des charges de l'indice petit cours d'eau

La revue de la littérature a permis d'analyser les différents éléments qui entrent en compte dans le calcul des indices hydromorphologiques existants. Le tableau récapitulatif 2.5 synthétise les paramètres intervenant dans le calcul des divers indices détaillés précédemment. Ce tableau met ainsi en évidence les variables récurrentes que l'IPCE devra, a minima, intégrer pour décrire fidèlement le cours d'eau.

Par ailleurs, ce tableau fait apparaître les principales composantes nécessaires au bon état d'un cours d'eau, telles que mentionnées en 1.2.3. Pour rappel, l'équilibre naturel du cours d'eau ne peut être assuré sans une configuration morphologique riche et hétérogène, les continuités écologiques longitudinale et transversale et un espace de mobilité pour le cours d'eau.

Dans le cadre de Rivialis, plusieurs exigences s'imposent.

Premièrement, l'IPCE doit être constitué de **métriques quantitatives** afin d'obtenir un score objectif et donc indépendant de l'opérateur. Cette évaluation quantitative permettra alors de comparer plusieurs scénarios de restauration pour un même cours d'eau. Cependant, l'analyse des indices existants montre qu'une objectivité totale est difficile à atteindre. En effet, la plupart requiert des appréciations in situ, inhérentes au domaine d'étude. La méthode doit être telle que la réplicabilité puisse être garantie sur les petits cours d'eau wallons.

Ensuite, il convient donc d'adopter une **méthode adaptée à l'échelle des petits cours d'eau belges**. L'analyse par segments homogènes semble pertinente car elle permet de mettre en lumière les segments les plus altérés et peut ensuite orienter les interventions ciblées. Adopter une échelle d'étude adaptée signifie ici que les paramètres utilisés pour évaluer la qualité du cours d'eau doivent être suffisamment fins pour refléter les processus propres à ces milieux. Typiquement, si des données accessibles en ligne sont intégrées dans le calcul, elles doivent être de résolution suffisamment élevée. En effet, certains processus comme l'érosion des berges se produisent à une échelle très locale. Il est donc essentiel de disposer de données capables de caractériser précisément ces phénomènes.

Afin de préserver un diagnostic à la fois rapide et peu coûteux, certaines composantes de l'IPCE doivent être renseignées au maximum au moyen de **données en ligne ou de simulations numériques**. Cependant, si des observations ou mesures in situ deviennent nécessaires, l'IPCE doit donc être accompagné d'un protocole de mesures rigoureux pour assurer une fiabilité et réplicabilité des mesures.

Enfin, l'IPCE devrait être idéalement **exhaustif** afin de garantir une caractérisation complète du cours d'eau. La méthode à adopter doit néanmoins trouver un compromis entre rapidité de diagnostic et fiabilité des résultats.

Ces exigences orienteront le choix des composantes de l'IPCE et les méthodes d'acquisition de

données les plus adaptés au projet Rivialis.

La méthode de l'OFB semble être la plus adaptée pour servir de point de départ à la création de l'IPCE. En effet, il s'agit de la méthode qui prend en compte la quasi-totalité des paramètres repris dans le tableau 2.5. De plus, l'analyse des sous-compartiments écologiques et les différents indices obtenus permettent de mettre en lumière les lacunes du cours d'eau, orientant ainsi les projets de restauration adaptés. Cependant, cette analyse presque exhaustive du cours d'eau repose majoritairement sur des estimations qualitatives. Hormis ce bémol, elle correspond en de nombreux points aux exigences et objectifs visés par Rivialis.

Le chapitre suivant décrira en détail cette méthode afin de pouvoir ensuite l'appliquer à un cas réel.

Composante du cours d'eau	Paramètre étudié	IHMD	IAM	Indice tronçon	SMG – écomorphologie (niveau C)	Qualphy	MQI et MMQI	Méthode de l'OFB
Lit mineur	Sinuosité			x		x	x	x
	Débit					x	x	x
	Largeur du lit				x	x	x	x
	Pente						x	x
	Profondeur d'eau	x	x	x	x	x	x	x
	Type de substrat - Granulométrie		x	x	x	x	x	x
	Vitesse d'écoulement	x	x	x	x	x	x	x
	Présence de caches			x	x			x
	Présence de zones de dépôt et d'érosion			x	x	x		x
	Présence de bois mort			x	x		x	x
	Écoulement dans/hors le talweg						x	x
	Présence de végétation aquatique					x		
Lit majeur	Occupation des sols					x		x
	Annexes hydrauliques					x		x
Berges	Nature des berges (naturelles, aménagements anthropiques)			x	x	x	x	x
	Végétation des berges					x		x
	Stabilité				x	x	x	x
	Érosion			x	x	x	x	x
Bande riveraine	Occupation des sols			x	x	x		x
	Continuité et nature de la ripisylve			x		x	x	x
	Profondeur			x	x	x	x	x
	Diversité			x	x	x		x
Continuité écologique	Continuité longitudinale (obstacles)			x	x	x	x	x
	Continuité latérale			x	x		x	
	Mobilité latérale du lit / restriction latérale du lit			x	x		x	x

TABLE 2.5 – Résumé des métriques principales nécessaires au calcul des différents indices.

Chapitre 3

Détail de la méthodologie choisie comme base pour établir l'IPCE

L'analyse des différents indices développés pour évaluer la qualité hydromorphologique d'un cours d'eau a permis d'identifier les composantes communes à ces différentes méthodes. Celles-ci sont résumées dans le tableau 2.5. Cela permet donc d'identifier quels paramètres devront à minima être intégrés dans l'IPCE.

Développer un indice de toute pièce pour évaluer la qualité d'un cours d'eau peut s'avérer difficile. C'est pourquoi dans ce travail, nous allons partir d'une des méthodes détaillées au chapitre précédant qui correspond le mieux aux exigences du projet Rivialis. Ces exigences ont été détaillées à la section 2.3.

La méthode développée par l'Office français de la biodiversité (OFB) a été identifiée [41]. En effet, elle permet un diagnostic poussé de l'état du cours d'eau en prenant en compte la presque totalité des paramètres du tableau 2.5 à travers différents compartiments : lit mineur, ripisylve et bande riveraine, obstacles à l'écoulement. Elle ne demande que peu de mesures in situ, mais nécessite toutefois un nombre important d'appréciations qualitatives suite à des observations in situ. De plus, cette méthode présente une analyse intéressante des compartiments du cours d'eau et permet de dériver des indices tout à fait pertinents dans le cadre du projet Rivialis : indice d'artificialisation du lit mineur, indice de pression dans la bande riveraine, indice de résilience du tronçon, indice d'obstacles à l'écoulement. En effet, l'analyse de ces indices peut orienter le choix des projets de restauration. C'est pour toutes ces raisons que cette méthodologie sera considérée comme base de l'IPCE.

Cette section vise à présenter cette méthodologie en détail. Ensuite, au prochain chapitre, elle sera appliquée à un cas concret afin d'en évaluer les atouts, d'identifier les limites et de proposer d'éventuelles améliorations pour l'IPCE.

3.1 Introduction

Il s'agit d'une méthodologie d'évaluation de l'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant à l'échelle du linéaire. Les cours d'eau en tête de bassin versant correspondent dans cette méthode aux cours d'eau de rang de Strahler 1 et 2, indiqués à la figure 3.1. Les rangs de Strahler sont utilisés pour classifier des types de cours d'eau. La surface unitaire d'une tête de bassin versant de rang de Strahler 1 ou 2 est de 1 à 2 km^2 pour les régions de Bretagne ou de Pays de la Loire [42]. Pour donner une comparaison avec les cours d'eau wallons, les cours d'eau concernés par le projet Rivialis sont les cours d'eau non navigables classés de troisième catégorie et les cours d'eau non navigables non classés, comme indiqué en figure 3.2. Les bassins versants de ces cours d'eau correspondent à environ 100 ha, ce qui équivaut à 1km^2. L'échelle d'étude de la méthodologie développée par l'OFB correspond donc à la même que celle de Rivialis.

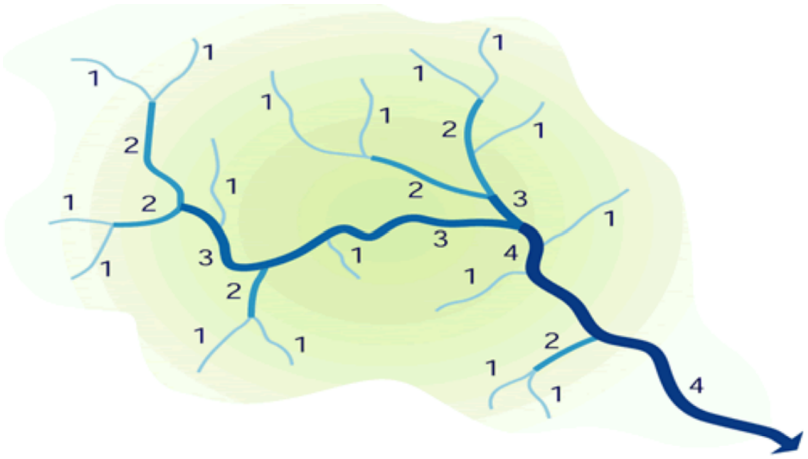


FIGURE 3.1 – Classification du réseau hydrographique selon l'ordre de Strahler [41].

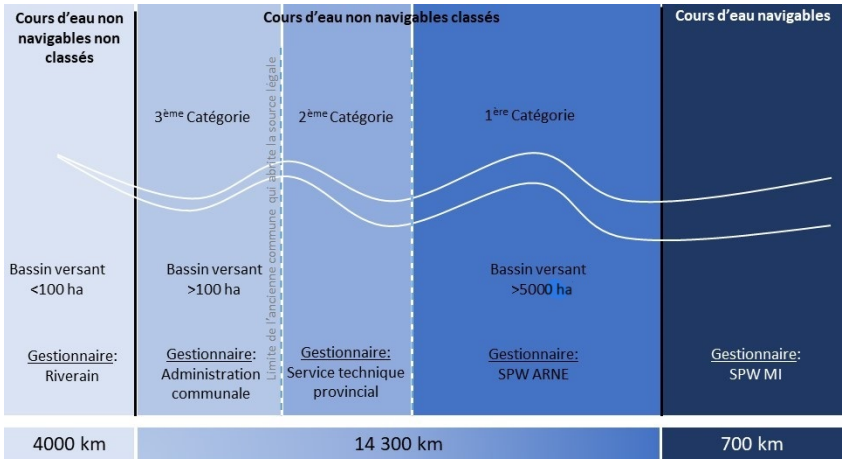


FIGURE 3.2 – Catégories de voies hydrauliques et cours d'eau en Wallonie [69].

Cette méthode a été expérimentée dans plusieurs régions françaises (Côtes d'Armor, Finistère,

Lore-Atlantique et Vendée) entre 2013 et 2019 afin de l'améliorer.

Le fait que cette méthode s'applique aux petits cours d'eau et que la majorité des éléments de diagnostic puissent être facilement obtenus par observations ou mesures in situ en fait une base solide pour le développement de l'IPCE dans le cadre du projet Rivialis.

L'application de la méthodologie commence par un diagnostic réalisé sur 5 compartiments écologiques du cours d'eau. Ensuite, les données sont exploitées et permettent d'obtenir 4 indices d'appréciation des altérations hydromorphologiques : l'indice d'artificialisation du lit mineur, l'indice de pression de la bande riveraine, l'indice de résilience et un indice relatif à la continuité écologique. Le diagnostic ainsi que l'exploitation des données sont détaillés dans les sections suivantes.

3.2 Diagnostic

Le diagnostic est réalisé sur 5 éléments distincts : le lit mineur, la bande riveraine et ripisylve, les obstacles à la continuité écologique, la présence de réseau annexe et les rangs 0. Ces éléments sont représentés en figure 3.3.

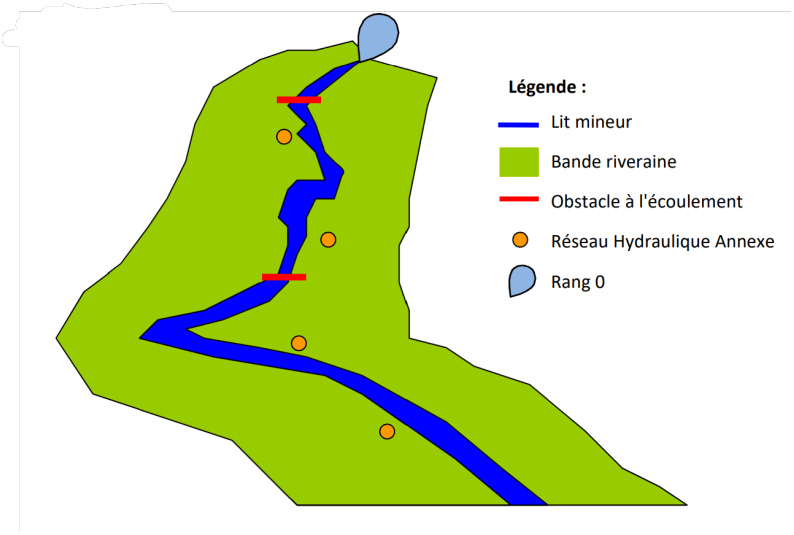


FIGURE 3.3 – Éléments constituant le diagnostic [41].

L'étude de ces différents éléments se fait à l'échelle d'un segment. On considère qu'un segment est une entité dont la morphologie est homogène, obtenue grâce à l'examen des cinq facteurs suivants : talweg, profil en long, tracé en plan, profil en travers et occupation des sols. Toute variation notable de l'un de ces critères conduit à la délimitation d'un nouveau segment, comme indiqué en figure 3.4. Par ailleurs, chaque confluence avec un autre cours d'eau justifie également la création d'un nouveau segment. La longueur d'un segment peut varier d'une dizaine de mètres à quelques centaines de mètres.



FIGURE 3.4 – Découpage en segments morphologiquement homogènes [41].

Le tableau 3.1 reprend la totalité des éléments étudiés lors du diagnostic et leur méthode d'acquisition. Cependant, dans cette section, seuls seront développés les éléments qui entrent ensuite en compte dans le calcul des 4 indices. Ils sont indiqués en gras dans le tableau 3.1.

Compartiment du cours d'eau	**Paramètre**	**Méthode d'acquisition**	**Indice d'artificialisation**	**Indice de pression dans la bande riveraine**	**Indice de résilience**	**Indice d'obstacles à l'écoulement**
Lit mineur	Type de réseau	Observation in situ				
	Forme de la vallée	Observation in situ				
	Largeur du fond de vallée à plat	Mesure in situ				
	Positionnement par rapport au talweg	Observation in situ	x			
	Pente	MNT			x	
	Sinuosité	Observation in situ	x			
	Type d'écoulement	Observation in situ				
	Largeur de plein bord	Mesure in situ			x	
	Hauteur de plein bord	Mesure in situ			x	
	Niveau d'encaissement	Observation in situ				
	Classe d'évolution morphodynamique	Observation in situ	x			
	Granulométrie dominante et accessoire sur radiers	Mesure in situ				
	Colmatage	Mesure in situ				
	Matériaux des berges	Observation in situ	x			
	Érodabilité des berges	Observation in situ			x	
	Érosion des berges	Observation in situ				
	Apport solide	Observation in situ ou expert			x	
	Proportion des faciès d'écoulement	Observation in situ				
	Diversité d'habitats	Observation in situ				
	Rugosité du lit mineur	Observation in situ	x		x	
Bande riveraine et ripisylve	**Type d'occupation du sol**	Observation in situ		x		
	Description de la ripisylve (nature et continuité)	Observation in situ		x		
Obstacles à la continuité écologique	**Type**	Observation in situ				x
	Longueur et largeur de l'ouvrage	Observation in situ				x
	Hauteur de chute	Observation in situ				x

TABLE 3.1 – Paramètres étudiés des différents compartiments nécessaires au calcul des indices.

3.2.1 Lit mineur

Plusieurs éléments caractérisant le lit mineur peuvent être analysés à l'échelle du segment.

Position par rapport au talweg

Tout d'abord, il s'agit de déterminer la position du cours d'eau au sein du talweg. Deux choix sont alors possibles : dans et hors. Une observation in situ est nécessaire pour déterminer ce premier

paramètre caractérisant le cours d'eau. Cette notion a été abordée à la section 1.3.1.3.

Sinuosité

Ensuite, la sinuosité du cours d'eau doit être appréciée par une observation in situ. Comme détaillé précédemment, la sinuosité a un impact sur la dynamique fluviale, les processus de dépôt-érosion et la présence de divers habitats, nécessaires pour la faune et flore. Ces éléments ont été mis en avant dans la section 1.3.1.1 qui traite des travaux de restauration qui visent à reméandrer un cours d'eau.

L'OFB propose une appréciation qualitative supportée par des schémas, comme visible en figure 3.5. La création de ces classes est basée sur les travaux de Malavoi et Bravard [45].

Type de sinuosité (pour le calcul de l'indice d'artificialisation)	Rectiligne	Sinuosité réduite par rapport à la sinuosité naturelle	Tracé naturel				
Classes de sinuosité	SI < 1,05	-	SI < 1,05	1,05 < SI < 1,15	1,15 < SI < 1,25	1,25 < SI < 1,5	SI > 1,5
Style fluviale	**Rectiligne**	**Limité (sinueux à très sinueux)**	**Rectiligne naturel[4]**	**Peu sinueux**	**Sinueux**	**Très sinueux**	**Méandriforme**
Schéma avec coefficient de sinuosité associé	SI = 1	-		SI = 1,06		 SI = 1,35	 SI = 1,72

FIGURE 3.5 – Type de sinuosité, classe de sinuosité et style fluvial associé [41].

Classe d'évolution morphodynamique

Ensuite, le tronçon étudié doit être assigné à une classe d'évolution morphodynamique par une observation in situ [41]. Cette notion a été théorisée par Simon en 1989 [70] et traduit du fait que suite à une perturbation, un cours d'eau peut présenter différents stages d'évolution morphodynamique. Il existe 6 classes qui correspondent chacune à une étape d'évolution d'un cours d'eau suite à des travaux hydrauliques [41], comme indiqué en figure 3.6. Les différentes étapes sont décrites ci-dessous.

1. Absence d'altération : le cours d'eau est en équilibre, il n'a pas subi de perturbation notable.
2. Chenalisé : le lit du cours d'eau a été modifié (par exemple rectifié), mais sans incision marquée.
3. Incisé : le lit s'est profondément creusé, souvent à la suite d'une chenalisation, ce qui provoque une déconnexion du lit mineur et des berges.
4. Incisé et élargi : après l'incision, les berges s'érodent latéralement et le lit s'élargit.

5. Accumulation et élargissement : les matériaux érodés s'accumulent dans le lit.
6. Quasi-équilibre : le cours d'eau retrouve un nouvel équilibre, avec un lit stabilisé.

Des schémas supplémentaires permettant de déterminer la classe d'évolution morphodynamique sont disponibles aux figures G.1 et G.2 de l'Annexe G.

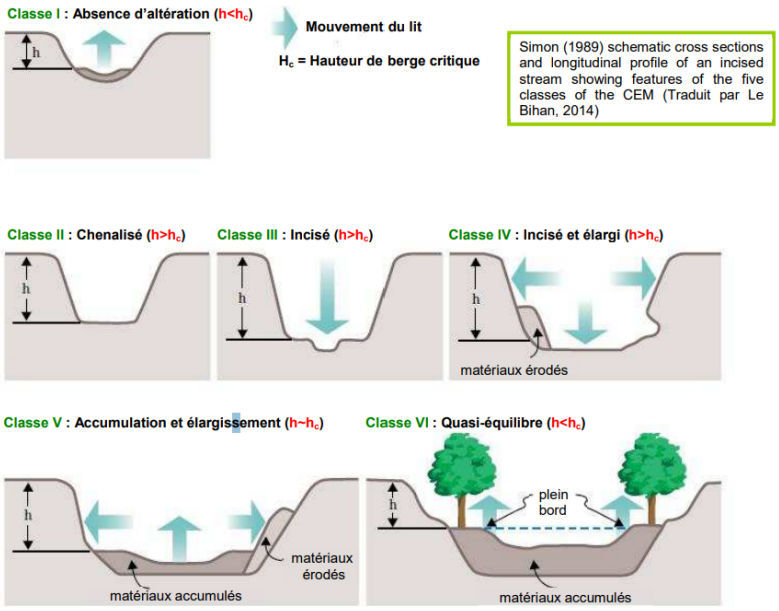


FIGURE 3.6 – Représentation des 6 classes d'évolution morphodynamique (CEM) d'un cours d'eau en réponse à des travaux hydrauliques [41]. La hauteur critique h_c correspond à la hauteur maximale qu'une berge peut atteindre avant de devenir instable : au-delà, son propre poids excède la résistance du sol et elle s'effondre par glissement ou rupture. Cette hauteur critique dépend de la hauteur de la berge, son angle d'inclinaison et les matériaux qui la composent. Elle est dérivée de la mécanique des sols.

Érodabilité des berges

L'OFB propose de caractériser l'érodabilité des berges par une appréciation parmi 4 classes : érodabilité nulle, faible, moyenne et forte. L'attribution d'une classe au site étudié est appuyée par des photos et descriptions disponibles à la figure 3.7. Une observation in situ est nécessaire.

Classe d'érodabilité	Description
Erodabilité nulle 	Il s'agit de berges rocheuses ou dont la granulométrie grossière, souvent héritée, fait que les particules ne peuvent plus être entrainées par le cours d'eau actuel.
Erodabilité faible 	Ce sont les berges argileuses (extrêmement cohésives) ou argilo-limoneuses (très cohésives) sur toute la hauteur de la berge. Malgré ce fort degré de cohésion, ces berges peuvent néanmoins être érodées, notamment après une période sèche qui permet la création de fentes de dessiccation. Celles-ci deviennent des zones de faiblesse facilitant l'effondrement gravitaire de la berge. NB : *La présence de végétation sur tout ou partie du talus de la berge peut être un indicateur d'une probable faible érodabilité.*
Erodabilité moyenne 	Ce sont les berges où le limon est dominant soit dans la texture des alluvions (limon-sableux, voire sable-limoneux), soit dans la stratigraphie (il occupe plus des 4/5ème de la hauteur de berges). C'est le cas aussi de berges de granulométrie initialement non cohésive mais qui peuvent être rendues plus ou moins cohésives par précipitation de carbonate de calcium (phénomène de cimentation).
Erodabilité forte 	Les sédiments sableux à caillouteux, dominent sur au moins le 1/4 inferieur de la berge (érodabilité forte), voire sur toute la hauteur (érodabilité très forte).

FIGURE 3.7 – Description des 4 classes d'érodabilité des berges selon l'OFB [41].

Potentiel d'apports solides

Pour continuer, le potentiel d'apports solides est à déterminer. Une évaluation qualitative est possible avec une appréciation en 4 classes (nul, faible, moyen et fort), mais l'OFB recommande de faire appel à un expert car il s'agit d'une notion complexe. En effet, ce potentiel d'apport solide se réfère à l'image 3.8, indiquant que les apports solides d'un cours d'eau sont multiples : érosion des berges, des affluents, du lit de la rivière ou encore des éléments solides provenant du bassin versant, mobilisés par les précipitations, transportés par ruissellement et ensuite redirigés vers le cours d'eau.

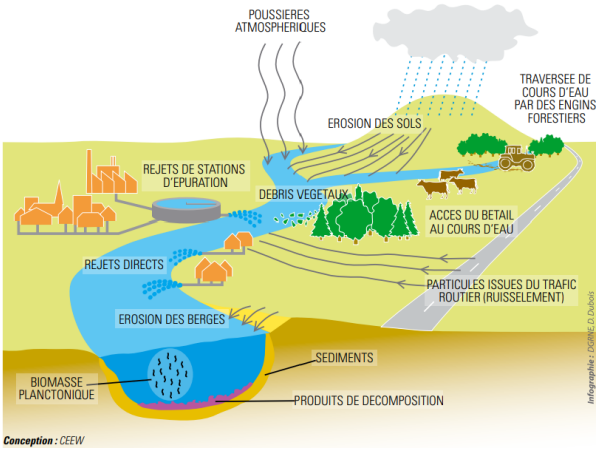


FIGURE 3.8 – Principales sources d'éléments solides qui alimentent un cours d'eau [44].

Rugosité

Enfin, la rugosité du lit mineur est à estimer par des observations in situ. L'OFB propose deux modalités pour cette estimation. Tout d'abord, une appréciation en 4 classes de la rugosité avec aide descriptive, comme indiqué en figure 3.9.

Rugosité du lit mineur	Valeurs K	Descriptif
Faible	K> 30	Cours d'eau rectiligne, recalibré avec une section homogène, peu d'encombres et une végétation basse.
Moyenne	20 < K < 30	Cours d'eau peu sinueux à rectiligne avec quelques irrégularités (portant sur le changement de section du lit mineur / les encombres / la végétation dans le lit mineur)
Forte	5 < K < 20	Cours d'eau sinueux à méandriforme, avec des changements de sections du lit mineur et la présence marquée de bois en rivières et/ou de végétation

FIGURE 3.9 – Estimation de la rugosité du lit mineur selon l'OFB [41].

Pour les opérateurs qui le souhaitent, l'OFB propose également une estimation de la rugosité par la méthode de Cowan, une méthode empirique qui vise à estimer le coefficient de rugosité sur base d'observation de différents éléments composants le lit (quantité d'éléments naturels participant à la rugosité du cours d'eau, quantité de végétation dans le lit, etc). Le détail de la détermination de la rugosité est repris à la Section 3.3.1.

3.2.2 Bande riveraine et ripisylve

L'étude de la bande riveraine est réalisée sur deux bandes de profondeur différente, 0–5 m et 5–10 m, afin de prendre en compte les éventuelles différences d'occupation du sol entre ces deux zones. Le type d'occupation du sol de la bande riveraine est à relever sur les rives droite et gauche et sur les profondeurs 0-5m et 5-10m. Cette démarche s'inspire du protocole de mesures Carhyce (introduit en section 2.2.1).

Ensuite, la ripisylve doit être caractérisée par sa nature (absente, naturelle, exotique ou plantée) et sa continuité (isolée, semi-continue ou continue).

3.2.3 Réseau hydraulique annexe

En cas de présence de réseau hydraulique annexe, il convient de le caractériser. Tout d'abord, le type de réseau (buse, drain, exutoire de plan d'eau, fossé, ruissellement direct ou talweg) doit être identifié. Ensuite, son type de connexion (directe ou indirecte) et la hauteur de l'exutoire par rapport à surface libre du cours d'eau sont décrits. Toute autre observation pertinente permettant

de décrire la situation actuelle est à ajouter. Cette description complète permet l'élaboration des scénarios de restauration adaptés au site étudié.

Cette section ne sera pas étudiée dans ce travail. Le lecteur est invité à se référer à la méthodologie complète de l'OFB pour obtenir des informations complémentaires concernant les éléments à décrire.

3.2.4 Obstacles transversaux anthropiques à l'écoulement

Dans la même idée que pour le réseau hydraulique annexe, une description complète des obstacles transversaux est demandée. Elle commence par une description du type d'obstacle (barrage, seuil, etc.). Ensuite, les longueurs, largeurs et hauteurs de chute sont à renseigner.

3.2.5 Rangs 0

Les rangs 0 sont les aires d'alimentation directes des cours d'eau [41]. Le rang 0 désigne dans cette méthode le bassin versant délimité à partir de l'amont du cours d'eau de rang 1, comme représenté à la figure 3.10.

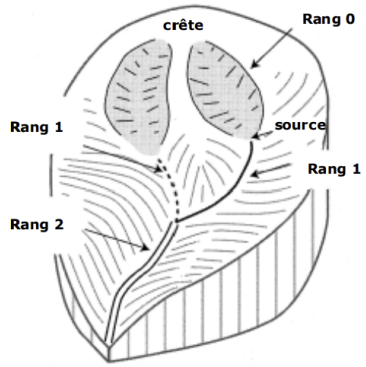


FIGURE 3.10 – Représentation de rang 0 [10].

Il s'agit d'un module optionnel qui ne sera pas considéré dans ce travail. En effet, l'objectif de ce mémoire est de développer un indice applicable à l'échelle de tronçons de cours d'eau. Le module sur les rangs 0 dépasse ce cadre. Toutefois, le lecteur peut se référer à la méthodologie de l'OFB afin d'obtenir des informations complémentaires sur le module.

3.3 Exploitation des données du diagnostic

L'intérêt de ce protocole est qu'il permet de fournir à la fois des éléments de diagnostic concernant l'état hydromorphologique du tronçon étudié ainsi que des éléments d'aide à la décision pour le choix des techniques de restauration [41]. Ces objectifs sont alignés avec ceux poursuivis par Rivialis, ce qui renforce la pertinence de l'application de cette méthode.

Cette section traite tout d'abord de l'analyse des données brutes afin d'en dériver des éléments intéressants décrivant le fonctionnement du cours d'eau étudié comme l'évaluation de la rugosité, l'analyse des profils en travers des segments étudiés et l'évaluation du débit à plein bord ainsi que de la puissance spécifique. Ensuite, les différents indices seront calculés.

3.3.1 Évaluation de la rugosité du lit mineur du cours d'eau

Comme détaillé dans le diagnostic, la rugosité du lit mineur peut être décrite par deux méthodes : une appréciation sur le terrain en trois classes, ou alors une évaluation à partir de la formule de Cowan (méthode empirique). La formule de Cowan permet d'obtenir une estimation de la rugosité avec la formule 3.1.

$$n = \left(n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4\right) m \tag{3.1}$$

Chacun des paramètres de cette formule correspond à un élément caractérisant l'écoulement, comme détaille à la table 3.2. Le détail des valeurs de ces paramètres est repris en Annexe G.

Paramètre de la formule de Cowan	**Description**
n_b	Évalue les matériaux des berges
n_1	Évalue le degré d'irregularité
n_2	Évalue l'homogénéité des profils en travers, variation de section
n_3	Évalue la quantité d'éléments naturels participant à la rugosité du cours d'eau
n_4	Évalue la quantité de végétation dans le lit
m	Lié à la sinuosité

TABLE 3.2 – Signification des paramètres intervenant dans la formule de Cowan.

3.3.2 Analyse des profils en travers des segments étudiés

Cette analyse permet de déterminer la largeur et la hauteur de plein bord pour une section du cours d'eau étudié, représentés à la figure 3.11.

Le plein bord désigne la situation juste avant débordement de l'écoulement dans la plaine alluviale ou le lit majeur [45]. C'est dans cette situation de quasi-débordement que s'écoule le débit de plein bord. La largeur de plein bord peut être déterminée à partir d'une coupe transversale du cours d'eau, comme visible en figure 3.12. La hauteur de plein bord est donc la hauteur d'eau correspondant à cette largeur.

La largeur de plein bord peu être mesurée in situ, un exemple est visible à la figure 3.13. Des exemples de détermination de largeur de plein bord de cas supplémentaires provenant du protocole Carhyce sont disponibles en Annexe H.

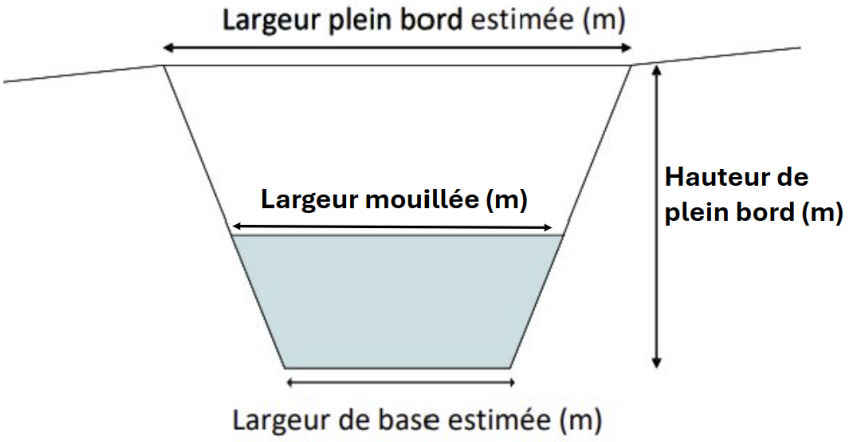


FIGURE 3.11 – Représentation de la situation à plein bord sur un transect [45].

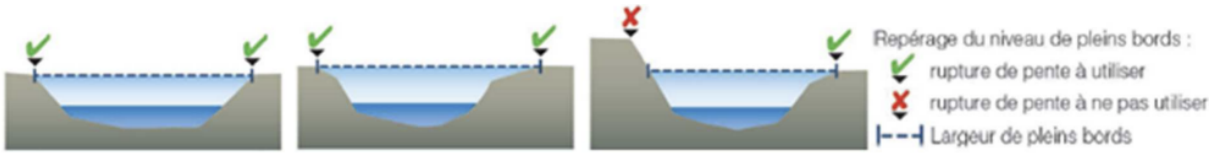


FIGURE 3.12 – Exemple de mesures de la largeur de plein bord [4].



FIGURE 3.13 – Exemple de mesure des caractéristiques d'un lit de plein bord pour une petite rivière dans le parc de Yellowstone (USA) [45].

Le largeur et la hauteur à plein bord représentent donc les conditions hydrauliques dans lesquelles s'écoule le débit à plein bord. Suite à de nombreux travaux sur le sujet, il est maintenant admis que le débit à plein bord est proche de la crue journalière de fréquence biennalle [45, 41]. Cette conclusion sera plus amplement discutée à la page 90. Ce résultat permet de prouver que le débordement de la rivière dans son lit majeur ou sa plaine alluviale est un indicateur de bon fonctionnement [45]. De plus, cela peut contribuer à définir les dimensions d'un nouveau lit lors d'un projet de restauration hydromorphologique [45].

L'OFB recommande de mesurer la largeur et hauteur de plein bord pour une section dite de référence. C'est à dire une section du cours d'eau considérée comme n'ayant pas subit de modification anthropique, et qui ne nécessite donc pas de restauration.

Déterminer la géométrie à plein bord sur une section de référence permet de déterminer la valeur du débit de plein bord s'écoulant en situation de cours d'eau naturel. La figure 3.14 illustre ceci. En situation artificielle, le cours d'eau débordera pour un débit plus faible que pour la situation naturelle. En effet, le cours d'eau canalisé ne peut accumuler une quantité d'eau supplémentaire, tandis que le cours d'eau naturel peut emmagasiner une quantité importante d'eau supplémentaire avant de déborder.

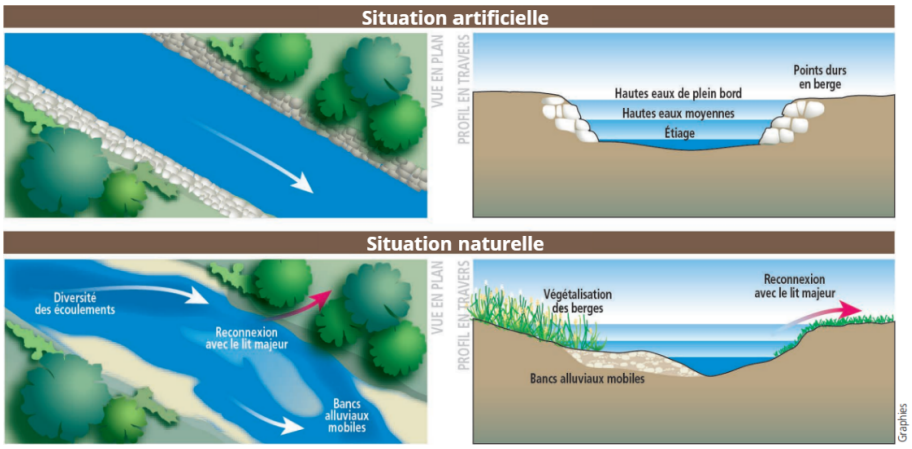


FIGURE 3.14 – Comparaison hydromorphologique entre un tronçon artificialisé et un tronçon naturel d'un cours d'eau, présentée en vue aérienne (gauche) et en coupe transversale (droite) [48].

3.3.3 Évaluation du débit de plein bord

Le débit de plein bord peut être déterminé sous l'hypothèse d'écoulement uniforme (hypothèse de Manning), indiqué à l'équation 3.2 uniquement sur les segments de référence [1].

$$Q_{pb} = \frac{A\, R_h^{2/3}\, i^{1/2}}{n} \tag{3.2}$$

1. L'OFB décrit cet état de référence comme correspondant à « un écosystème historique, pas ou peu perturbé, représentatif de son environnement naturel local ».

avec

A Aire mouillée de plein bord (m^2)

R_h Rayon hydraulique (m), défini par

$$R_h = \frac{\text{Airée mouillée de plein bord}}{\text{Périmètre mouillé de plein bord}}$$

Le périmètre mouillé et l'aire mouillée sont représentés à la figure 3.15.

i Pente de la ligne d'eau (m/m)

n Coefficient de rugosité (Manning) ($sm^{-1/3}$)

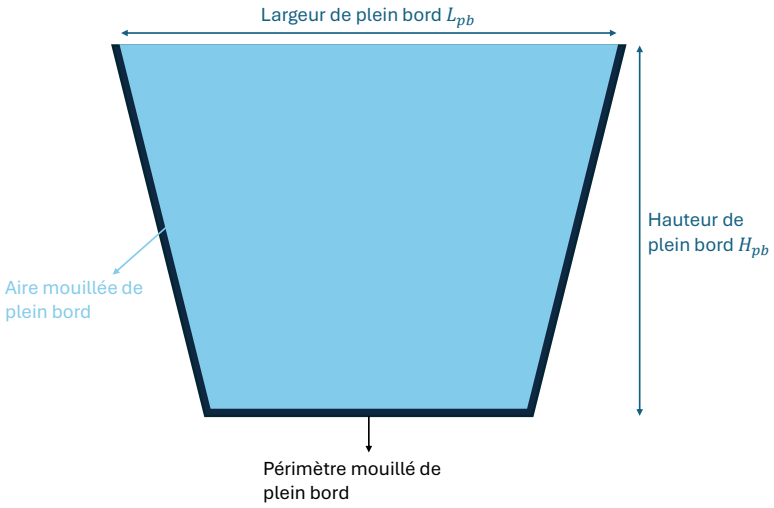


FIGURE 3.15 – Représentation de la situation à plein bord.

Comme plusieurs études scientifiques ont montré que le débit de plein bord d'un cours d'eau peut être assimilé à la crue journalière de fréquence biennalle [45, 41], si une station hydrométrique est présente sur le tronçon étudié, elle peut constituer un point de référence pertinent à la vérification des estimations effectuées.

3.3.4 Évaluation de la puissance spécifique

Cette section s'appuie sur le document de l'OFB concernant la puissance spécifique [51]. La puissance spécifique détermine la dynamique fluviale et conditionne les capacités d'ajustement du cours d'eau. De manière générale, lorsqu'elle se situe entre 25 et 35 W/m^2, le cours d'eau présente un potentiel de réajustements morphologiques.

Dans le cadre de projet de renaturation, la puissance spécifique décrit l'efficience des travaux, c'est-à-dire l'énergie humaine minimale à mobiliser pour avoir une réponse morphologique significative.

Ainsi, plus le cours d'eau est actif, moins les interventions à prévoir devront être lourdes pour améliorer son état hydromorphologique. Par exemple, un cours d'eau présentant une forte puissance spécifique, une dynamique de transport solide et une érodabilité moyenne des berges pourra souvent réagir positivement à des actions ciblées, comme la suppression d'aménagements perturbateurs (ex. : enrochements de berges). À l'inverse, un cours d'eau faiblement énergétique, avec peu de transport solide et des berges peu érodables, nécessitera généralement des aménagements plus lourds et accompagnés.

Bien qu'elle ne soit pas normalisée, cette typologie constitue un outil utile pour appuyer le diagnostic hydromorphologique et orienter les choix de restauration.

La puissance spécifique de plein bord peut être calculée sur les sections de référence à partir de l'équation 3.3.

$$\omega = \frac{i\, Q_{\text{pb}}\, \rho\, g}{L_{\text{pb}}} \tag{3.3}$$

avec

ω Puissance spécifique à plein bord (W/m^2)

i Pente de la ligne d'eau (m/m)

Q_{pb} Débit de plein bord (m^3/s)

ρ Masse volumique de l'eau (kg/m^3)

g Accélération gravitationnelle (m/s^2)

L_{pb} Largeur de plein bord (m)

3.3.5 Indice d'artificialisation du lit mineur

Cet indice est calculé à partir de la formule 3.4 à l'échelle du segment. Les éléments étudiés dans le diagnostic se voient attribuer une valeur de 0, 0.5 ou 1. Cette conversion de note est indiquée dans le tableau 3.3.

Un cours d'eau présentant un indice d'artificialisation de 0 correspond à un cours d'eau de référence. Un état de référence signifie ici que la morphologie du segment considéré est pas ou peu altérée, ne nécessitant pas de travaux de renaturation de [41]. La valeur maximale de l'indice est 1, représentant un cours d'eau enterré ou un plan d'eau en barrage.

$$\text{IA_SEGM_lm} = \frac{\sum\left(I_{\text{talweg}} + 2\, I_{\text{sinuosite}} + 2\, I_{\text{cem}} + I_{\text{rugosite}} + I_{\text{couverture}}\right)}{7} \tag{3.4}$$

Valeurs intermédiaires au calcul de l'indice d'artificialisation du lit mineur	**Note**
Valeurs de l'indice intermédiaire "Talweg"	
– dans le talweg	0
– en dehors du talweg	1
Valeurs de l'indice intermédiaire "Sinuosité" (coef. 2)	
– tracé naturel (rectiligne naturel, sinueux à méandriformes)	0
– limité par rapport à la sinuosité naturelle	0,5
– rectiligne[13]	1
Valeurs de l'indice intermédiaire "Classe d'Évolution Morphodynamique" (coef. 2)	
– Classe 1	0
– Classe 6 (évolution naturelle ou lit emboîté suffisamment large)	0,5
– Classe 2, 3, 4, 5	1
Valeurs de l'indice intermédiaire "Rugosité"	
– coefficient de rugosité $K : 5 < K < 20$	0
– coefficient de rugosité $K : 20 < K < 30$	0,5
– coefficient de rugosité $K : K > 30$	1
Valeurs de l'indice intermédiaire "Protection des berges – Enterrement"	
– absence de protection de berges	0
– présence de protection de berges de type génie végétal	0,25
– présence de protection de berges sur les berges du lit mineur	0,5
– présence de protection de berges sur les berges et le fond du lit mineur	0,75
– 100% d'enterrement (par couverture, busage, drainage ou comblement)	1

TABLE 3.3 – Valeurs intermédiaires au calcul de l'indice d'artificialisation du lit mineur. Le coefficient de rugosité $K = 1/n$.

3.3.6 Indice de pression dans la bande riveraine

Plus la valeur de cet indice est proche de 1 et plus la pression exercée sur la bande riveraine est importante [41]. L'OFB a attribué des scores allant de 0 à 1 correspondant aux différents types d'occupation du sol possibles, comme indiqué à la table 3.4

Occupation du sol	**Note**
Milieux forestiers (dont fourrés)	
– sans drainage	0,1
– avec drainage	0,2
Surfaces enherbées (dont prairie et prairie humide)	
– avec ripisylve	0,3
– sans ripisylve	0,4
– avec drainage et/ou avec piétinement	0,5
Terres labourables / Forêt de résineux / Peupleraie	
– non drainées avec ripisylve	0,6
– non drainées sans ripisylve / forêt de résineux ou peupleraie non drainée	0,7
– drainées avec ripisylve	0,8
– drainées sans ripisylve / forêt de résineux ou peupleraie drainée	0,9
Zones industrielles, résidentielles, mosaïque urbaine et plan d'eau en barrage	1

TABLE 3.4 – Valeurs pour le calcul de l'indice de pression au sein de la ripisylve

Il convient ensuite pour chaque rive (gauche et droite) et tranche de profondeur (0-5m et 5-10m) d'attribuer un score à l'occupation du sol.

Une moyenne entre les rives et profondeurs donne la valeur de l'indice à l'échelle du segment, comme exprimé à l'équation 3.5.

Finalement, la moyenne sur le linéaire du tronçon étudié donne la valeur de l'indice final,

exprimé en 3.6.

$$\text{IP_SEGM_briv} = \frac{\text{Occ sol RG} + \text{Occ sol RD}}{2} \tag{3.5}$$

$$\text{IP_TRONC_bvir} = \frac{\sum_x \left(\text{IP_SEGM}_{x,\text{bvir}} \times L_x\right)}{L_{\text{total troncon}}} \tag{3.6}$$

3.3.7 Indice de résilience par tronçon

Cette indice représente la capacité probable de réajustement morphologique. Cet élément clé déterminera si des travaux de renaturation pourront avoir un impact sur la qualité hydromorphologique du cours d'eau. Cette indice représente en quelque sorte la force dont le cours d'eau dispose afin de se réajuster morphologiquement après une modification. Une valeur d'indice proche de 0 traduit d'une capacité d'ajustement nulle, tandis qu'une valeur proche de 1 indique une capacité d'ajustement maximale, et donc que la restauration peut être menée passivement. Cela signifie que la rivière est capable de s'auto-réguler.

Cet indice est déterminé à partir des valeurs des 4 composantes suivantes : puissance spécifique, érodabilité des berges, potentiel d'apports solides et emprise disponible.

La puissance spécifique correspond à l'énergie disponible pour le transport de l'eau et des sédiments. Elle détermine la dynamique fluviale et conditionne les capacités d'ajustement du cours d'eau.

L'érodabilité des berges traduit la sensibilité des berges à l'érosion sous l'effet de l'écoulement.

Le potentiel d'apports solides traduit de la quantité d'éléments solides susceptibles d'aller dans la rivière et donc participer à la dynamique du processus de dépôt-érosion. Ce potentiel d'apport solide provient principalement du fond du lit mineur, des berges, des affluents et du bassin versant [48]. L'OFB préconise une estimation de cet apport solide par un expert.

L'emprise disponible témoigne de la largeur disponible pour les travaux de restauration potentiels et indique donc où il serait possible d'intervenir (lit mineur, lit majeur ou bande riveraine). Par exemple, la modalité *uniquement inférieure à la largeur du lit* correspond à des travaux de restauration dans le lit mineur (exemple : recharge granulométrique, création de banquettes). Elle dépend de l'occupation des sols, des usages et des contraintes supplémentaires comme la présence de route, plan d'eau ou remblais importants [41].

Les valeurs obtenues pour chacun de ces paramètres sont ensuite converties en note de 0 à 1. La conversion des scores est disponible au tableau 3.5.

Finalement, l'indice de résilience est calculé par une moyenne pondérée de chacun de ces facteurs, comme indiqué en 3.7.

Tableau relatif à la détermination des notes individuelles		**Note**	**Indice**
Puissance spécifique à l'aval du tronçon	< 10	0,0	N_a
	10–30	0,3	
	30–100	0,7	
	≥ 100	1,0	
Érodabilité des berges à l'échelle du tronçon	nulle	0,0	N_b
	faible	0,3	
	moyenne	0,7	
	forte	1,0	
Potentiel d'apports solides (granulométrie)	nul	0,0	N_c
	faible	0,3	
	moyen	0,7	
	fort	1,0	
Emprise disponible à l'échelle du tronçon	$<$ 1 largeur de lit	0,0	N_d
	1 à 3 largeurs de lit	0,3	
	3 à 10 largeurs de lit	0,7	
	$>$ 10 largeurs de lit	1,0	

TABLE 3.5 – Valeurs pour le calcul de l'indice de résilience par tronçon.

$$\text{IResil_TRONC} = \frac{\sum\left(N_a + N_b + N_c + N_d\right)}{4} \tag{3.7}$$

3.3.8 Indice sur les obstacles à l'écoulement

Les obstacles à l'écoulement interrompent la continuité écologique en empêchant les flux biologiques et de sédiments. Pour les cours d'eau présentant un nombre de tronçons élevé, il est préconisé de calculer la densité des ouvrages (nombre d'obstacles par km) ainsi que le taux de fractionnement, correspondant au rapport entre la somme des hauteurs de chute artificielle et le linéaire du cours d'eau (dénivelé artificiel/longueur).

3.4 Les impacts sur la santé mentale et le bien-être : mémoire Oíkos

Lisa Piorka, étudiante en dernière année de médecine travaille sur l'impact bénéfique que les cours d'eau (naturels) peuvent avoir sur la santé mentale et le bien-être en général. A travers une revue de la littérature (Annexe A), elle a mis en avant certaines caractéristiques des cours d'eau qui sont ressenties comme bénéfiques ou donnant une sensation de bien-être.

L'impact des cours d'eau sur la santé mentale peut avoir une portée plus large que celle de ce travail. Dans la construction de divers lieux de soins de santé (hôpital, maison de repos, etc.), cet élément peut être pris en compte pour améliorer le bien-être des patients.

Dans le cadre de projets de restauration de cours d'eau, il est intéressant de mettre en avant que certains aspects considérés comme bénéfiques pour la santé mentale vont dans le même sens que la qualité hydromorphologique du cours d'eau. Le projet de renaturation remplirait alors un objectif double. Toutefois, d'autres s'y opposent.

Premièrement, la présence de berges naturelles ainsi que de ripisylve et bande riveraine boisées et diversifiées favorise la sensation de bien-être aux abords d'un cours d'eau. Cet élément va dans le sens de la qualité hydromorphologique. En effet, une bande riveraine ainsi qu'une ripisylve fournies et constituées de différentes strates de végétation sont nécessaires pour un cours d'eau sain. Par ailleurs, les berges naturelles constituent une source de sédiments qui alimente les processus d'érosion et de dépôt, permettant ainsi au cours d'eau d'ajuster sa morphologie. Aussi, des berges naturelles et une ripisylve fournie vont créer des structures naturelles au niveau des berges (sous-berges, chevelu racinaire, blocs rocheux, etc.), servant de lieu d'accueil aux poissons pour qu'ils s'y reposent ou pondent leurs œufs.

Ensuite, le son d'une rivière est perçu comme plus relaxant que le bruit d'une chute d'eau. Cet élément aligne aussi santé mentale et qualité hydromorphologique. En effet, la présence de chute d'eau causée par un seuil est une caractéristique d'un cours d'eau altéré car cela va interrompre la continuité écologique ainsi que les flux de sédiments et biologiques. Ceci impacte donc l'équilibre dynamique du cours d'eau.

Un élément bénéfique pour la santé mentale mais s'opposant à la qualité d'un cours d'eau est la transparence et la couleur bleue des cours d'eau. Cette couleur a été démontrée comme étant la moins excitante au regard du système nerveux. En ce qui concerne la transparence du cours d'eau, il a été démontré que la capacité à voir le fond d'un cours d'eau constitue un indicateur d'une bonne qualité de l'eau, aux yeux de riverains non experts. De plus, une eau perçue comme de bonne qualité tend à rendre le cours d'eau plus attrayant. Cependant, une rivière naturelle transporte des sédiments et donc ne peut être transparente.

Enfin, d'autres éléments tels que le scintillement et le reflet de la lumière à travers la surface d'eau procurent également une sensation de bien-être.

Chapitre 4

Application de la méthode proposée à un cas d'étude

La méthode détaillée au chapitre précédent constitue le point de départ du développement de l'indice petit cours d'eau. Afin de déterminer les avantages et limites de cette méthode, et de proposer des améliorations, elle sera appliquée à l'Orneau, un cours d'eau qui traverse Gembloux.

L'application se fera selon deux modalités. D'une part, la méthodologie de l'OFB sera appliquée strictement sur site. D'autre part, l'Orneau sera caractérisé à distance, en s'appuyant uniquement sur des données publiques accessibles en ligne et sur des simulations numériques. En effet, un des objectifs visés par le projet Rivialis est de fournir un diagnostic rapide, fiable et peu coûteux. Les mesures et observations sur le terrain sont donc à éviter au maximum.

Chaque approche sera ensuite analysée de façon critique afin d'évaluer la pertinence et la fiabilité des résultats obtenus et de mettre en évidence les limites du protocole ainsi que le choix des variables retenues pour le calcul des indices.

4.1 Aperçu du site étudié

L'Orneau est une rivière belge affluente de la Sambre dont le tronçon étudié se situe à Gembloux. Ce dernier s'étend sur une longueur de 14.5 mètres en amont duquel se trouvent un pont et un affluent, comme illustré en figure 4.1. Le tronçon étudié a été divisé en deux segments, dû à un changement de matériau au niveau de la berge gauche, tel que représenté en figure 4.2. Des vues réelles de la situation sont disponibles à la figure 4.3. Enfin, les berges ainsi que la bande riveraine et la ripisylve du tronçon étudié sont représentées aux figures 4.4 et 4.5 respectivement. Aussi, lors de la visite sur le terrain, une certaine quantité de bois mort en rivière a été observée, ainsi que la présence de canards et de grenouilles.

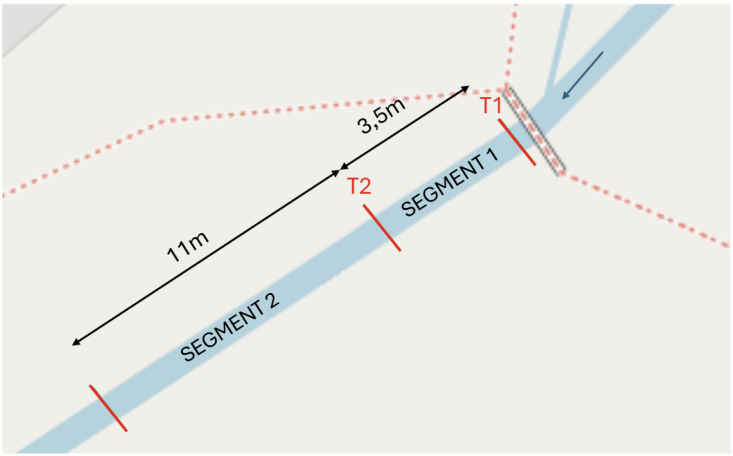


FIGURE 4.1 – Vue aérienne du tronçon étudié.

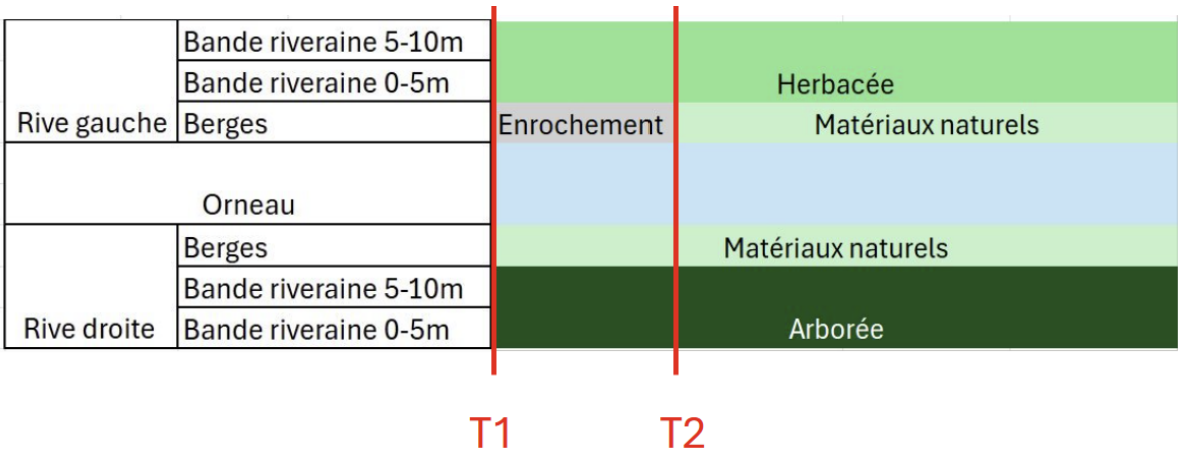


FIGURE 4.2 – Représentation schématique du tronçon étudié.



FIGURE 4.3 – Vues d'ensemble du tronçon étudié.

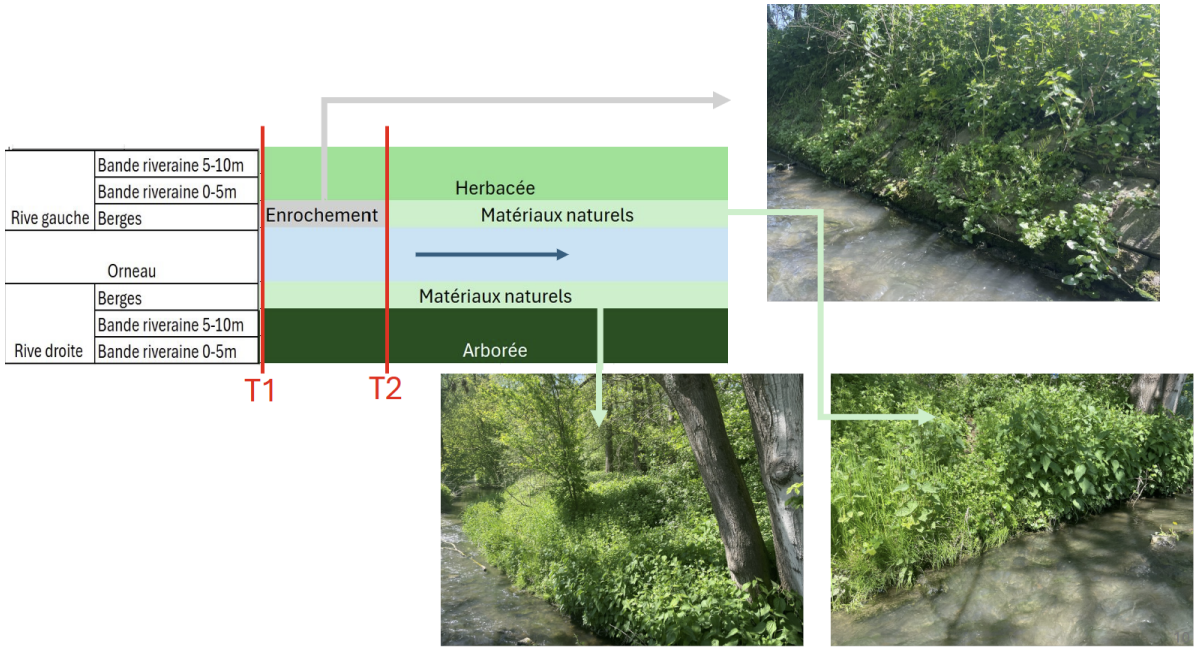


FIGURE 4.4 – Berges du tronçon étudié.

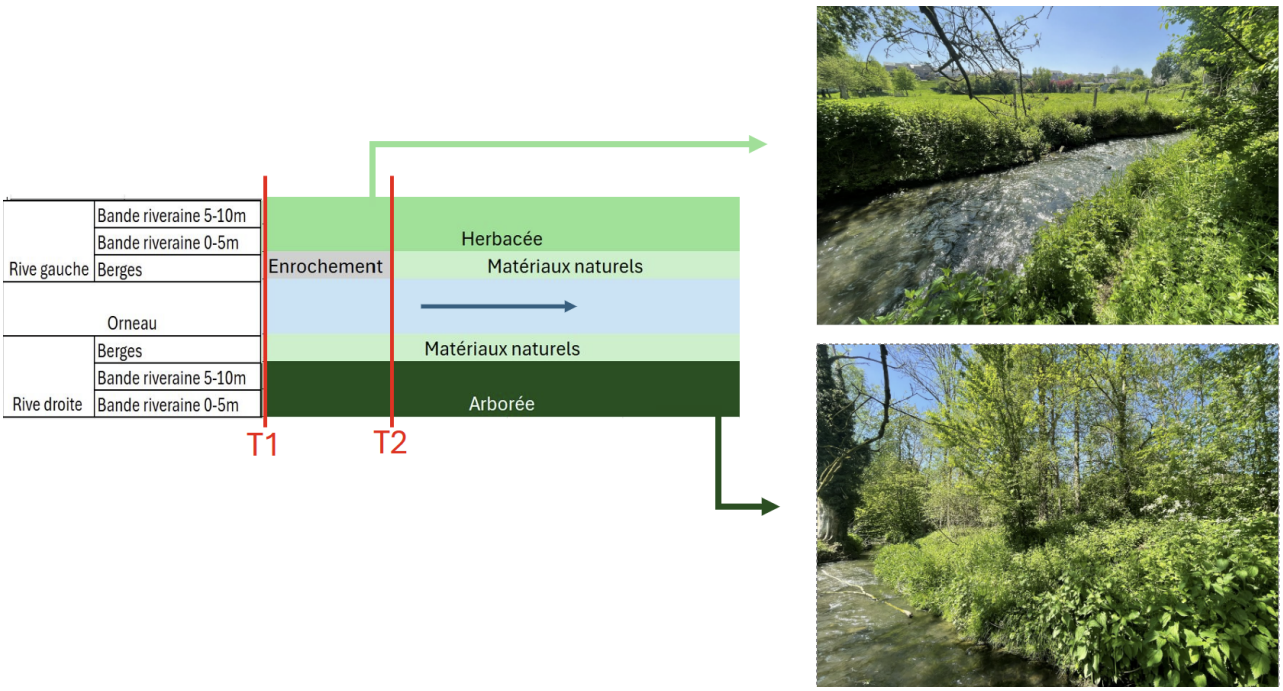


FIGURE 4.5 – Bande riveraine et ripisylve du tronçon étudié.

4.2 Application de la méthode in situ

Sur site, la méthodologie précédemment détaillée a été appliquée. La table 4.1 reprend les différents paramètres du diagnostic ainsi que leur méthode d'acquisition. La table 4.2, quant à elle, reprend les valeurs des paramètres ainsi que des indices calculés pour chaque segment.

Compartiment du cours d'eau	**Paramètre**	**Acquisition**
Lit mineur	Positionnement par rapport au talweg	Observation
	Pente	MNT
	Sinuosité	Observation
	Hauteur de plein bord	Mesure
	Largeur de plein bord	Mesure
	Classe d'évolution morphodynamique	Observation
	Granulométrie dominante et accessoire	Mesure (Wolman)
	Colmatage	Observation
	Matériaux des berges	Observation
	Érodabilité des berges	Observation
	Érosion des berges	Observation
	Apport solide	Observation
	Proportion des faciès d'écoulement	Observation
	Diversité d'habitats	Observation
	Rugosité du lit mineur	Observation (Cowan)
Bande riveraine	Type d'occupation du sol [0–5 m] et [5–10 m]	Observation
	Description de la ripisylve : nature et continuité	Observation
Obstacles	Type	Observation
	Longueur et largeur de l'ouvrage	Mesure
	Hauteur de chute	Mesure

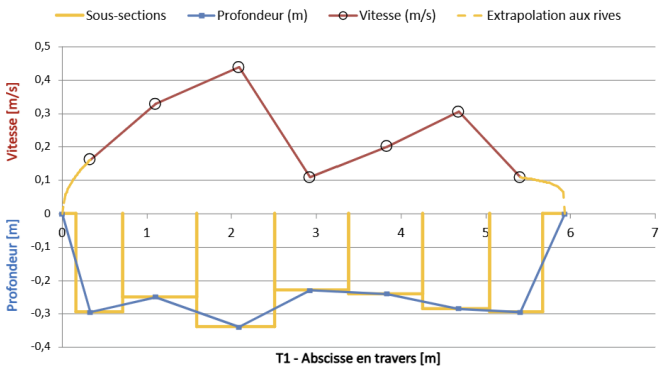
TABLE 4.1 – Paramètres étudiés sur l'Orneau

Lors de la visite sur le terrain, les hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement des transects 1 et 2 ont été déterminées avec la règle à jauger et sont représentées à la figure 4.6. Ces mesures ont permis de déterminer le débit s'écoulant le jour de la visite (17/03/2025) Q = 0,385 m^3/s.

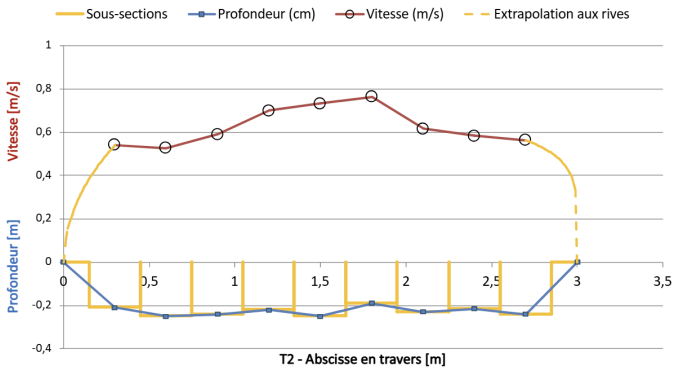
La caractérisation de la granulométrie a été effectuée avec la méthode de Wolman. De cette analyse peuvent être déduits les diamètres caractéristiques correspondant aux percentiles de la distribution cumulative. Un diamètre caractéristique d_x correspond au diamètre pour lequel $x\%$ de l'échantillon sont plus petits.

Un autre moyen de caractériser un échantillon est avec $\sigma_G = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ qui mesure la dispersion de la taille des grains. Une valeur de σ_G élevée (supérieure ou égale à 2) correspond à une distribution granulométrique étendue, tandis qu'une valeur de σ_G inférieure à 1 indique une courbe granulométrique resserrée, et donc que les éléments qui la composent sont de diamètre semblable

[76]. La figure 4.7 montre que la granulométrie du lit de l'Orneau est étendue.

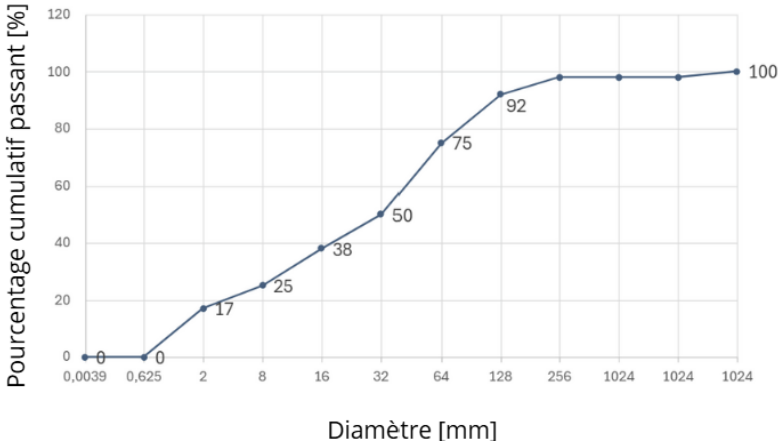


(a) Transect 1.



(b) Transect 2.

FIGURE 4.6 – Caractérisation des vitesses d'écoulement et hauteurs d'eau aux transects 1 et 2 [36].



(a) Courbe granulométrique pour l'Orneau.

Paramètre	Valeur
d_{16} [mm]	1,91
d_{50} [mm]	32
d_{84} [mm]	97,88
d_{90} [mm]	120,47
σ_G [-]	7,14

(b) Paramètres granulométriques.

FIGURE 4.7 – Distribution granulométrique et paramètres granulométriques du lit mineur de l'Orneau.

Compartiment du cours d'eau	Paramètre	Segment 1	Segment 2
Lit mineur	Positionnement par rapport au talweg	Dedans	Dedans
	Pente	0,00411	0,00411
	Sinuosité	Peu sinueux	Peu sinueux
	Hauteur de plein bord [m]	1,47	1,33
	Largeur de plein bord [m]	8,88	7,50
	Classe d'évolution morphodynamique	1	1
	σ_G [/]	7,14	7,14
	Colmatage	Classe 4	Classe 4
	Matériaux des berges RG	Enrochement	Matériaux naturels
	Matériaux des berges RD	Matériaux naturels	Matériaux naturels
	Érodabilité des berges RG	Nulle	Faible
	Érodabilité des berges RD	Faible	Faible
	Érosion des berges RG	Nulle	Faible
	Érosion des berges RD	Nulle	Nulle
	Potentiel d'apport solide	0,3	0,3
	Proportion des faciès d'écoulement	100% plat	50% plat + 50% mouille
	Diversité d'habitats	Importante	Importante
	Rugosité du lit mineur n $[s\,m^{-1/3}]$ (Cowan)	0,083	0,067
	Débit de plein bord [m³/s]	8,41	6,16
	Puissance spécifique de plein bord [W/m²]	38,54	33,12
Bande riveraine et ripisylve	Occupation du sol [0–5 m] RG	Champs/herbes	Champs/herbes
	Occupation du sol [5–10 m] RG	Champs/herbes	Champs/herbes
	Nature ripisylve RG	Absente	Absente
	Continuité ripisylve RG	Absente	Absente
	Occupation du sol [0–5 m] RD	Arbres/Arbustes	Arbres/Arbustes
	Occupation du sol [5–10 m] RD	Arbres/Arbustes	Arbres/Arbustes
	Nature ripisylve RD	Arbres/Arbustes	Arbres/Arbustes
	Continuité ripisylve RD	Semi-continue	Semi-continue
Obstacles	Type	/	/
	Longueur et largeur de l'ouvrage	/	/
	Hauteur de chute	/	/
Indices	Artificialisation du lit mineur	0,054	0
	Pression dans la bande riveraine	0,250	0,1
	Résilience	0,363	0,4
	Obstacles à l'écoulement	0	0

TABLE 4.2 – Paramètres étudiés sur l'Orneau.

Analyse du diagnostic

L'application rigoureuse de la méthode proposée par l'OFB à l'Orneau permet de révéler plusieurs limites et points à clarifier au sein de celle-ci.

Tout d'abord, la méthode s'appuie sur de nombreux paramètres dont l'appréciation est qualitative (nul, faible, moyen, fort). Cette caractérisation qualitative nécessite une documentation plus fournie et enrichie d'exemples concrets et variés afin d'aider l'utilisateur dans le choix d'une catégorie et limiter ainsi au maximum la subjectivité. En effet, le choix des photos proposées à l'utilisateur risquent d'influencer le choix. Il est donc important de proposer des photos recouvrant

un large spectre de situations afin limiter l'influence involontaire sur le choix final et assurer ainsi une meilleure fiabilité et reproductibilité des résultats.

La détermination de la pente doit se faire à partir du MNT et avec précaution. En effet, la pente est très sensible à la distance sur laquelle elle est calculée, comme représenté en figure 4.8. Au départ, la pente a été déterminée par régression linéaire uniquement le long du tronçon étudié (en vert). La valeur de pente obtenue est de 2%, ce qui semble être une valeur bien trop importante par rapport au profil du cours d'eau étudié. Ensuite, la pente a été déterminée sur une distance de 100 mètres encadrant le tronçon étudié. La valeur obtenue est 4,11‰(en bleu) et correspond mieux à la situation étudiée. La pente moyenne sur l'ensemble du tronçon de 100 mètres est gardée pour les calculs, car cette pente globale offre une représentation plus fidèle du comportement général du cours d'eau.

Cet exemple illustre que la détermination de la pente doit être faite avec un esprit critique et précaution. De plus, elle intervient dans le calcul du débit de plein bord et de la puissance spécifique. Une surestimation de la pente implique donc une surestimation du débit de plein bord et de la puissance spécifique de plein bord, pouvant mener à des erreurs de dimensionnement lors de projets de restauration.

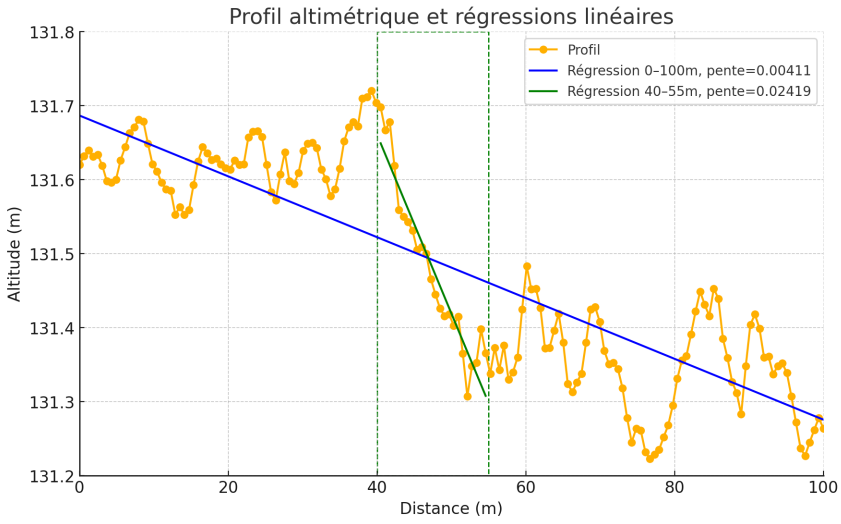


FIGURE 4.8 – Profil altimétrique de l'Orneau issu du MNT.

La méthodologie de l'OFB évalue la sinuosité de manière qualitative, alors qu'il est possible de lui attribuer un score quantitatif à partir du MNT. Ce score se calcule comme le rapport entre la longueur du talweg, c'est-à-dire la distance parcourue entre deux points du cours d'eau (tracé orange à la figure 4.9), et la distance à vol d'oiseau entre ces mêmes points (tracé noir).

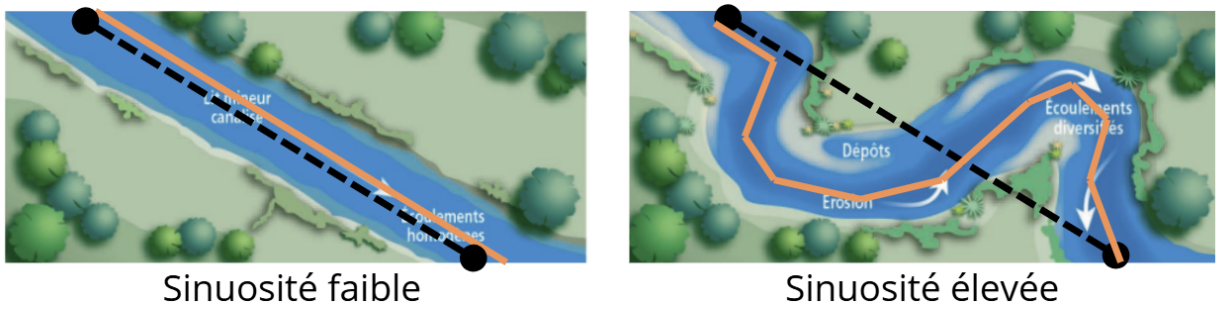


FIGURE 4.9 – Représentation de sinuosité faible et élevée [49].

La classe d'évolution morphodynamique semble être une notion assez complexe pour des utilisateurs non spécialisés. Les annexes, photos et explications à ce sujet sont trop limitées au sein du document fourni par l'OFB. De plus, cette notion ne peut être déterminée ni par simulation numérique ni par des données facilement accessibles en ligne.

Il est difficile de trouver une notion parfaitement équivalente à celle-ci, mais l'OFB présente également le ratio entre la largeur de plein bord et la hauteur de plein bord L_{pb}/H_{pb} [41]. La description de ce ratio par l'OFB est détaillé ici. Pour les segments de référence, ce ratio traduit de l'activité géodynamique du cours d'eau. Ainsi, les cours d'eau à dynamique plutôt active, caractérisés par un processus actif de dépôts et érosions présentent des rapports L_{pb}/H_{pb} plutôt forts (équivalents ou supérieurs à 20) [4].

De plus, il fournit également une information indirecte sur la cohésion des berges car plus celles-ci sont cohésives, plus les cours d'eau sont étroits et profonds et inversement [45]. Ce ratio illustre l'intensité des travaux hydrauliques pour les segments altérés.

Remplacer la notion de classe d'évolution morphodynamique par ce ratio pour le futur IPCE permettrait de garantir une plus grande fiabilité des résultats. De plus, la largeur et la hauteur de plein bord sont déjà déterminées dans le diagnostic de l'OFB, donc leur ratio peut être exploité sans ajouter de démarche supplémentaire. Cette proposition sera détaillée en page 91.

Ensuite, l'érodabilité des berges et le potentiel d'apports solides sont assez difficiles à estimer. Cela conduit à une incertitude dans l'attribution de catégories, compromettant ainsi potentiellement la fiabilité globale du diagnostic. Des exemples supplémentaires de photos et de descriptions sont nécessaires afin de garantir une fiabilité des résultats.

Concernant le potentiel d'apport solide, des formules empiriques ont été proposées pour déterminer la contribution du bassin versant à l'apport solide. Le modèle RUSLE, exprimé à l'équation 4.1 permet calculer les pertes de sol annuelles moyennes suite à une érosion sous l'action des pluies [2].

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot P \cdot C \tag{4.1}$$

avec

A : Perte en terre moyenne et annuelle, exprimée en tonnes/ha/an

R : Facteur d'érosivité de la pluie

K : Sensibilité à l'érosion des sols ou érodabilité

LS : Facteurs topographiques (longueur et pente)

P : Facteur de gestion du sol (pratiques agricoles)

C : Facteur de couverture végétale

Malgré les diverses tentatives visant à dériver des formules permettant une évaluation quantitative des apports solides issus des bassins versants, elles restent très empiriques et difficiles à transposer au cadre de ce mémoire. En effet, elles reposent sur de nombreux paramètres, dont certains sont difficilement accessibles ou ne peuvent être mesurés de manière suffisamment fiable.

La détermination du coefficient de rugosité par la méthode de Cowan se révèle relativement simple mais nécessite une certaine prudence, car il s'agit d'une ancienne loi empirique. Elle permet toutefois une bonne première indication sur la rugosité ou permet de confirmer des estimations. La différence de valeur du coefficient de rugosité entre les deux tronçon se justifie uniquement par la différence de matériau constituant les berges, représenté par le coefficient n_b. Ainsi, la berge en blocs de la rive gauche du tronçon 1 présente un coefficient de rugosité $n_{b,blocs} = 0,055$ s.m$^{-1/3}$ alors que les autres berges, constituées principalement de terre ou d'argile, affichent $n_{b,terre/argile} = 0,0285$ s.m$^{-1/3}$. Le coefficient final pondéré par les longueurs de chaque segment est donc $n_{tot} = 0,071$ s.m$^{-1/3}$.

Plusieurs études ont testé la fiabilité des résultats offerts par Cowan. Il en ressort qu'il présente une erreur moyenne de 12% sur les petits cours d'eau peu végétalisés, mais que l'erreur peut aller jusque 25% dans des tronçons fortement végétalisés [21]. La solution proposée serait d'ajuster le facteur n_4 pour la typologie des cours d'eau étudiés [81].

Il est aussi possible de dériver le coefficient de rugosité à partir de la granulométrie du lit. Les relations de Meyer-Peter et Müller, et de Strickler sont respectivement indiquées aux équations 4.2 et 4.3.

$$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} = 0,085 \ sm^{-1/3} \tag{4.2}$$

$$n = \frac{D_{50}^{1/6}}{21.1} = 0,084 \ sm^{-1/3} \tag{4.3}$$

Ces valeurs corroborent les résultats offerts par la formule de Cowan. La valeur du coefficient de rugoisté n utilisé pour le reste des calculs sera celui de Cowan, car il s'agit de celui recommandé par l'OFB.

Ensuite, la conversion des scores appliquée pour le calcul de l'indice d'artificialisation du lit mineur et l'indice de résilience, comme indiquée aux tables 3.3 et 3.5 peut s'avérer trop rigide

et induire un manque de nuance dans le résultat. Cette constatation renforce l'intérêt d'intégrer davantage d'indicateurs quantitatifs afin de garantir un diagnostic plus précis et fiable.

Enfin, certains éléments du diagnostic ne sont pas exploités dans les indices calculés. Par exemple, la diversité des faciès (voir Section 1.2.3) fait partie du diagnostic mais n'est pas intégrée au calcul des indices. Pour rappel, la diversité de faciès représente l'hétérogénéité de la morphologie du lit mineur. Un faciès d'écoulement est un type de zone d'eau reconnaissable par sa profondeur, sa vitesse et sa turbulence. Par exemple, un radier est peu profond et rapide, une mouille est profonde et lente, et un plat est moyennement profond et calme. Aussi, cette notion évaluée de manière qualitative dans la méthode de l'OFB, la rendant peu fiable.

Une alternative à cette appréciation serait de calculer l'indice hydromorphologique de la diversité (IHMD), décrit à la section 2.1.1. Pour rappel, cet indice se base sur les valeurs statistiques des profondeurs d'eau et vitesses d'écoulement du segment étudié. La valeur minimale possible de l'IHMD est 1, indiquant un cours d'eau chenalisé. Tandis qu'une valeur de l'IHMD supérieure ou égale à 10 traduit d'un cours d'eau naturel dont la dynamique hydromorphologique est fortement développée. Un avantage de cet indice est qu'il est facilement déterminable via simulation numérique. De plus, l'IHMD peut être intéressant dans la simulation de différentes situations projetées dans le cadre de Rivialis. En effet, les projets de restauration permettent, entre autres, d'améliorer l'hétérogénéité du cours d'eau. Ceci se traduit donc par une augmentation de la valeur de l'IHMD.

Malgré ces limites, la méthodologie de l'OFB présente un avantage notable en proposant un diagnostic à travers différents indices. En effet, la séparation en indices clairement définis (lit mineur, la bande riveraine, les obstacles à l'écoulement et la résilience du tronçon) facilite l'identification spécifique des zones nécessitant une intervention. Ensuite, l'indice de résilience du tronçon, dépendant de la puissance spécifique, semble être tout à fait pertinent. En effet, la puissance spécifique définit en quelque sorte l'énergie disponible pour la réadaptation naturelle du cours d'eau aux changements. Dès lors, l'analyse de l'indice de résilience couplée aux constats d'altération de certains compartiments écologiques permet d'orienter efficacement les futurs projets de restauration.

Analyse des résultats

La classification selon la méthode de l'OFB qualifie le tronçon étudié de cours d'eau naturel. Ceci rejoint globalement les observations de terrain, notamment la présence de bois mort, de canards et de grenouilles. Pourtant, la rive gauche du segment 1 n'est pas naturelle, comme indiqué en figure 4.4, révélant une certaine discordance entre le diagnostic et la configuration réelle.

Ce faible score s'explique par la structure même de la méthode qui est fondée sur des classes d'appréciation. Ce mode d'évaluation facilite son application par des critères simples et rapides à évaluer, mais il ne permet pas une analyse suffisamment fine et nuancée de la qualité hydromor-

phologique.

Cette observation souligne l'importance de fonder le diagnostic sur des indicateurs quantitatifs. Avoir des résultats objectifs permet une comparaison fiable entre différents segments et projets de restauration envisagés pour un site, ainsi que pour assurer un suivi après travaux.

4.3 Application de la méthode à distance

Pour rappel, le projet Rivialis a pour objectif de simplifier le processus concernant les projets de renaturation. Cela commence par la détermination de la qualité hydromorphologique du cours d'eau à l'état initial. Ensuite, en simulant plusieurs scénarios de renaturation, un indice de qualité actualisé peut être calculé pour chaque situation projetée. Ce processus fournit des informations essentielles à la prise de décision.

Rivialis vise à rendre les projets de restauration accessibles en proposant un diagnostic rapide et fiable. Cela mène donc à établir le diagnostic au maximum à partir de données accessibles en ligne et de simulations sur le jumeau numérique, afin de minimiser au maximum les mesures sur le terrain nécessaires.

De plus, la méthode de l'OFB présente certaines lacunes concernant l'aspect qualitatif des résultats. La détermination des paramètres à distance permettrait aussi de répondre à ce problème. Dans ce contexte, il est donc nécessaire de tester l'applicabilité de cette méthode exclusivement à partir de données accessibles en ligne et simulation numérique. Le tableau 4.9 à la page 100 reprend les éléments du diagnostic déterminés à distance.

4.3.1 Lit mineur

Débit

Afin d'être capable de faire une modélisation numérique de l'écoulement, en plus de l'altitude de chaque point fournie par le MNT, il est nécessaire d'appliquer des conditions frontières. La condition frontière en amont correspond au débit du cours d'eau. Si le cours d'eau étudié est équipé d'une station limnimétrique, alors le débit peut directement être déduit des données accessibles sur le site de l'hydrométrie de Wallonie. Si ce n'est pas le cas, le débit peut être estimé en comparant les débits des stations en amont et en aval du cours d'eau étudié, et en estimant les contributions des affluents le long du tracé.

Pour le cas de l'Orneau, il n'existe pas de station au droit du tronçon étudié, comme indiqué en figure 4.10. Les débits mesurés aux stations amont et aval le 17/03/2025 sont repris à la table 4.3.

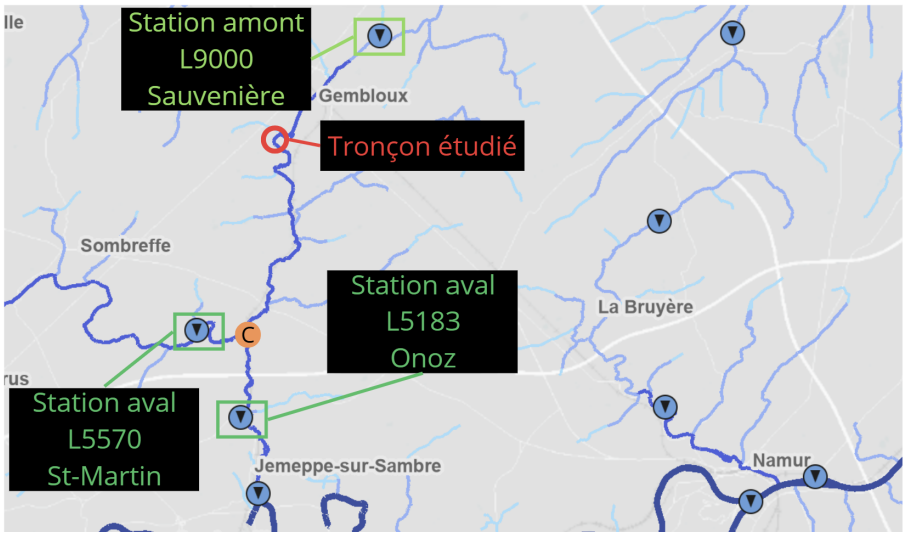


FIGURE 4.10 – Stations hydrométriques disponibles pour estimation du débit de l'Orneau sur le tronçon étudié.

Station	Débit mesuré [m^3/s]
Sauvenière	0,20
Saint-Martin	0,24
Onoz	1,18

TABLE 4.3 – Débits mesurés le 17/03/2025 aux stations de Sauvenière, Saint-Martin et Onoz.

Le débit au niveau du point C sur la figure 2.25 est considéré comme égal à Q_C = 1,18 - 0,24 = 0,94 m^3/s. La distance entre la station de Sauvenière et le site étudié de l'Orneau est de 4,13 km, et la distance entre le site étudié de l'Orneau et le point C est de 7,84 km. Le débit au niveau du site étudié est déterminé par approximation linéaire : Q = 0,45 m^3/s.

Si l'estimation du débit au niveau du tronçon étudié semble trop peu fiable, il est alors nécessaire d'effectuer des mesures sur site, via une règle à jauger par exemple.

Positionnement par rapport au talweg, pente et sinuosité

Ces éléments sont à déterminer à partir du MNT du tronçon étudié. Mais comme détaillé précédemment, leur résultat est à exploiter prudemment afin d'éviter principalement une surestimation de la pente (voir figure 4.8). La sinuosité est particulièrement faible, car elle est étudiée sur un tronçon de cours d'eau très court. Les valeurs de ces éléments sont reprises dans la table 4.4.

Paramètre	Valeur
Position par rapport au talweg	Dedans
Pente	0,00411
Sinuosité	1,008

TABLE 4.4 – Paramètres déterminés via le MNT.

Rugosité

A défaut de connaître la granulométrie du cours d'eau ou de pouvoir appliquer la formule de Cowan, le coefficient de rugosité doit être estimé à partir de la littérature. Des tables reprenant les différentes valeurs de coefficient de rugosité en fonction du type de surface et de son état ont été établies par Chow en 1959 [19]. Les tables 4.5 et 4.6 reprennent ces éléments et sont utilisées pour estimer le coefficient de rugosité de l'Orneau. Dans ce cas de figure-ci, le type de cours d'eau est estimé à partir du MNT et de photos aériennes, et le coefficient de rugosité est considéré comme $n = 0,050\ sm^{-1/3}$ (indiqué en gras dans la table 4.6).

Il est utile de souligner que l'estimation du coefficient de rugosité sur base des tables proposées par Chow nécessitent également de connaître un minimum d'informations sur le lit mineur. Dans l'estimation faite ici, il y a forcément une part d'influence dûe aux visites sur le terrain faites au préalable.

Or, une estimation fiable du coefficient de rugosité est nécessaire car le calcul du débit de plein bord ainsi que de la puissance spécifique en dépendent.

Des études futures devraient permettre de dégager soit une valeur récurrente du coefficient de rugosité pour un type de cours d'eau donné, soit au moins un intervalle de confiance, adapté aux petits cours d'eau belges.

	Walls			
Lined or constructed channels	**Perfect**	**Good**	**Medium**	**Bad**
Cement – neat surface	0,010	0,011	0,012	0,013
Cement – mortar	0,011	0,012	0,013	0,015
Wood – planed, untreated	0,010	0,012	0,013	0,014
Concrete lined channels	0,012	0,014	0,016	0,018
Masonry – cemented rubble	0,017	0,020	0,025	0,030
Stone paving	0,013	0,014	0,015	0,017
Brick – glazed	0,011	0,012	0,013	0,015
Earth, straight, and uniform	0,018	0,022	0,023	0,025
Dragline-excavated or dredged	0,025	0,028	0,030	0,033
Earth bottom and rubble sides	0,028	0,030	0,033	0,035

TABLE 4.5 – Coefficients de rugosité pour différents revêtements de canaux [19].

Natural streams – main channel	**Walls**			
	Perfect	**Good**	**Medium**	**Bad**
Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0,025	0,028	0,030	0,033
+ stones and weeds	0,030	0,033	0,035	0,040
Meanders, some pools and shoals, clean	0,035	0,040	0,045	0,050
+ lower stages, ineffective slopes and sections	0,040	0,045	**0,050**	0,055
+ some stones and weeds	0,033	0,035	0,040	0,045
+ more stones	0,045	0,050	0,055	0,060
Sluggish reaches, weedy, deep pools	0,050	0,060	0,070	0,080
Very weedy reaches, deep pools, underbrush	0,075	0,100	0,125	0,150

TABLE 4.6 – Coefficients de rugosité pour cours d'eau naturels [19].

La rugosité peut également être déterminée par simulation inverse. Si le débit du cours d'eau et la hauteur d'eau correspondante sont connus, il faut faire plusieurs simulations numériques en faisant varier le coefficient de rugosité jusqu'à obtenir la valeur de hauteur d'eau correspondante au débit injecté en condition frontière en aval. Cette approche suppose toutefois la disponibilité d'une relation débit-hauteur rigoureuse, d'une bathymétrie (représentation précise de la géométrie du lit du cours d'eau) très précise du lit et l'hypothèse d'un écoulement uniforme.

Dans le cadre de Rivialis, une estimation du coefficient de rugosité s'avère préférable, car elle concilie fiabilité et rapidité du diagnostic. En effet, la simulation inverse requiert un volume de données détaillées et un nombre important de simulations.

Géométrie de plein bord

La géométrie de plein bord peut être déterminée à partir de coupe transversale du MNT, en la déterminant de la même manière que sur site. Des exemples de mesures sont représentés à la figure 4.11. Les figures 4.12 et 4.13 représentent les coupes transversales et géométries de plein bord des transects 1 et 2 respectivement.

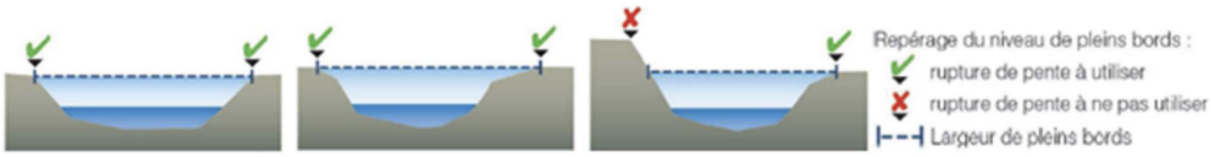


FIGURE 4.11 – Exemple de mesures de la largeur de plein bord [4].

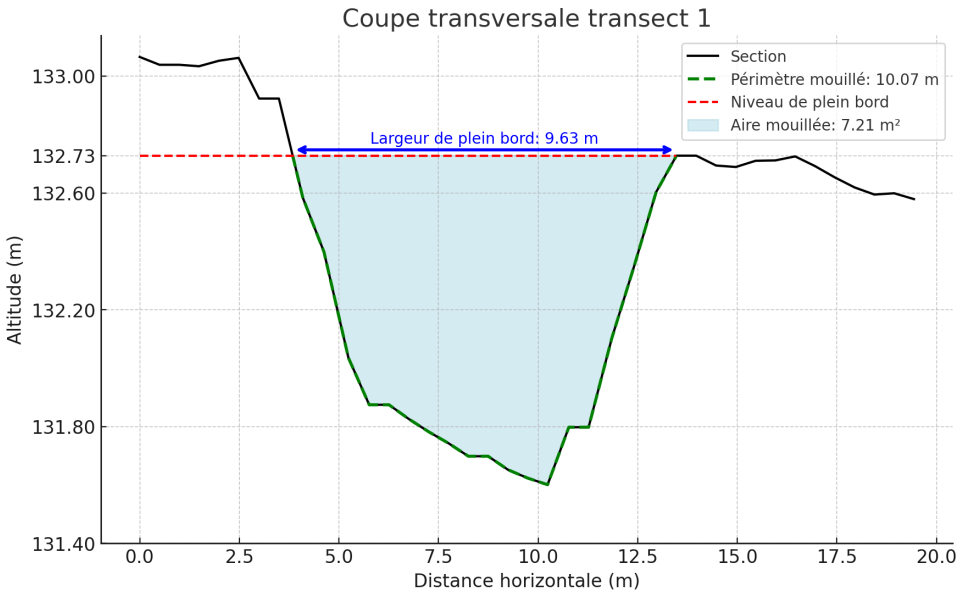


FIGURE 4.12 – Géométrie de plein bord au transect 1.

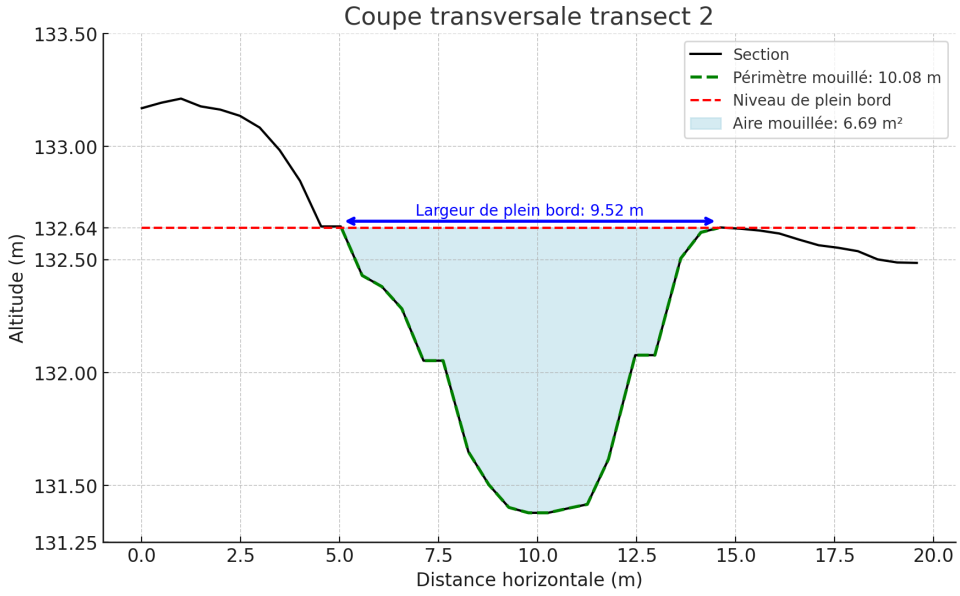


FIGURE 4.13 – Géométrie de plein bord au transect 2.

Le tableau 4.7 présente les dimensions de plein bord mesurées in situ et extraites du MNT pour les deux transects. Les mesures obtenues à partir du MNT correspondent assez bien avec les mesures faites sur le terrain.

Cependant, la différence entre la mesure in situ et à distance peut être dûe à différents éléments. Premièrement, les ondes du LiDAR s'arrêtent en réalité à la surface de l'eau, et donc ne prennent pas en compte le potentiel niveau d'eau sous la surface. De plus, la détermination de la géométrie de plein bord via MNT peut s'avérer plus précise qu'in situ. En effet, les mesures sur le terrain

peuvent être biaisées par la présence de végétation ou des imprécisions de mesure. La détermination de la géométrie de plein bord à partir du MNT permet d'objectiver cette géométrie.

Globalement, le MNT fournit des valeurs pertinentes pour représenter fidèlement la géométrie du cours d'eau à plein bord.

Ensuite, le débit de plein bord peut être évalué sous l'hypothèse d'un écoulement uniforme (hypothèse de Manning) via la formule indiquée à l'équation 4.4.

$$Q_{pb} = \frac{A\, R_h^{2/3}\, i^{1/2}}{n} \tag{4.4}$$

avec

A Aire mouillée de plein bord (m^2)

R_h Rayon hydraulique (m), défini par

$$R_h = \frac{\text{Aire mouillée de plein bord}}{\text{Périmètre mouillé de plein bord}}$$

i Pente de la ligne d'eau (m/m)

n Coefficient de rugosité (Manning) ($sm^{-1/3}$)

Transect	**Paramètre**	**In situ**	**MNT**
T1	Largeur de plein bord [m]	8,88	9,63
	Débit de plein bord [m^3/s]	8,41	7,10
	Puissance spécifique de plein bord [W/m^2]	38,54	29,75
T2	Largeur de plein bord [m]	7,50	9.52
	Débit de plein bord [m^3/s]	6,16	6,53
	Puissance spécifique de plein bord [W/m^2]	33,12	27,6

TABLE 4.7 – Comparaison des mesures in situ et issues du MNT.

Le débit et la puissance spécifique de plein bord obtenus à distance sont également comparables avec ceux obtenus in situ.

La valeur du coefficient de rugosité choisi a également un impact sur les résultats. Le coefficient de rugosité n choisi pour l'évaluation à distance est $n_{distance} = 0{,}050\ sm^{-1/3}$ alors que le coefficient de rugosité déterminé in situ par la méthode de Cowan (et confirmé par l'analyse granulométrique) est $n_{in\ situ} = 0{,}071\ sm^{-1/3}$.

Cet exemple souligne l'importance de choisir soigneusement la rugosité, puisque sa valeur influe fortement sur les calculs de débit de plein bord et de puissance spécifique de plein bord.

Une autre approche pour déterminer le débit de plein bord consiste à simuler successivement plusieurs débits et à identifier celui qui provoque le débordement. Une fois le débit de plein bord déterminé, la géométrie est déduite. Cette méthode exige toutefois une estimation précise du coefficient de rugosité et une bathymétrie détaillée du cours d'eau. C'est pourquoi elle n'a pas été explorée dans ce travail.

Par ailleurs, plusieurs études se sont consacrées à la détermination de la période de retour caractéristique du débit de plein bord. En effet, si la période de retour du débit de plein bord est connue, il est alors possible d'en estimer la valeur, à condition de connaître les périodes de retour pour différents débits sur le site étudié. Cette estimation s'avère également utile pour valider les résultats issus des modélisations.

Une étude menée par Jean Van Campenhout et al. [77] a justement porté sur la caractérisation de la période de retour du débit de plein bord pour des cours d'eau wallons. Cette caractérisation a été établie à partir de données annuelles et de données partielles, permettant ainsi d'obtenir une période de retour inférieure à une année. L'étude concerne 76 stations hydrographiques wallonnes, divisées en 8 groupes distincts définis selon les régions, la géologie locale et la surface du bassin versant. Le débit de plein bord est déterminé sur les cours d'eau considérés comme naturels. Il en ressort que les séries annuelles fournissent une valeur moyenne de période de retour du débit de plein bord de 1,5 ans pour 59 stations.

Cependant, cette étude a permis de mettre également en avant une variabilité régionale dans les périodes de retour des débits de plein bord. Par exemple, les cours d'eau de la région Ardennes présentent une période de retour de 0,6 ans pour le débit de plein bord, tandis que les cours d'eau de la région du Condroz présentent une période de retour de 2,6 ans.

Ces résultats nourrissent la réflexion autour de l'IPCE, en fournissant une référence régionale pour évaluer si le débit de plein bord déterminé sur un cours d'eau étudié se rapproche du comportement attendu pour des cours d'eau comparables.

Classe d'évolution morphodynamique

Comme détaillé en Section 3.2.1, cette notion ne peut être appliquée dans un diagnostic à distance. De plus, même in situ, elle est difficile à objectiver.

Une solution est de remplacer cette notion par le ratio de la largeur de plein bord sur la hauteur de plein bord L_{pb}/H_{pb}. Ce ratio apporte des informations sur l'activité géodynamique du cours d'eau ainsi que sur la cohésion des berges. Ces éléments ont déjà été détaillés en page 80.

La littérature a permis de déterminer les limites des classes à attribuer aux ratios. Premièrement, des études menées par l'ONEMA (Office national de l'eau et des milieux aquatiques) en Bretagne et dans les Pays de la Loire ont montré que les cours d'eau naturels présentent rarement des ratios de forme L_{pb}/H_{pb} inférieurs à 3 [41]. Ensuite, Malavoi et Bravard [45] indiquent que les cours d'eau à dynamique plutôt active, caractérisés par des processus érosifs latéraux importants

et des apports solides assez élevés présentent un rapport L_{pb}/H_{pb} supérieur ou égal à 20.

Sur base de ces éléments, quatre classes ont été créées, inspirées de l'échelle utilisée dans la méthode développée par l'OFB. Elles sont présentées à la table 4.8. Pour rappel, ce paramètre intervient dans le calcul de l'indice d'artificialisation du lit mineur. Une valeur de ce ratio inférieure à 3 indique dès lors un cours d'eau altéré et le score normalisé correspondant est 1. A contrario, un cours d'eau présentant un ratio supérieur ou égal à 20 est considéré comme naturel et se voit donc attribué un score nul. Les ratios de la géométrie de plein bord pour les transects 1 et 2 déterminés à distance sont respectivement 8,52 et 7,56.

Ces intervalles de classes restent pour l'instant une proposition afin de permettre de calculer l'indice d'artificialisation du lit mineur. Une décomposition en classes plus pertinente pourra être effectuée dans des travaux futurs.

Ratio L_{pb}/H_{pb}	Score normalisé
< 3	1
3 - 8	0,7
8 - 20	0,3
> 20	0

TABLE 4.8 – Proposition de classes et score normalisé pour le ratio L_{pb}/H_{pb}.

Caractérisation des berges

A partir de données disponibles en ligne, il est très difficile de caractériser les berges ainsi que les matériaux qui les constituent. Ceci va avoir un impact sur le calcul des indices. Premièrement, l'indice d'artificialisation du lit mineur dépend en partie de « la protection des berges ». Il sera donc calculé sans prendre en compte cet élément.

Ensuite, la présence de végétaux le long des berges a un impact important sur leur érodabilité. En effet, des berges munies de structures végétales seront protégées du point de vue de l'érosion, ceci influençant donc le potentiel d'apport solide au cours d'eau.

Diversité d'habitats

Cette notion devrait pouvoir être modélisée numériquement à partir des différentes vitesses d'écoulement et des hauteurs d'eau, ainsi que de la composition des berges. Il faut aussi tenir compte du substrat. Cette information est difficile à simuler, et nécessite donc une collecte de données sur le terrain. Cette notion n'a pas pu être déterminée par des données disponibles en ligne à ce stade du travail. Des travaux futurs sont nécessaires.

Potentiel d'apport solide

Le potentiel d'apport solide intervient dans le calcul de l'indice de résilience du tronçon. Cet élément est important à quantifier car il va définir si le cours d'eau dispose d'une charge solide suffisante pour maintenir son équilibre dynamique et assurer les processus de dépôt et d'érosion.

Le bassin versant est une première source d'apport solide au cours d'eau. En effet, la pluie et son ruissellement sur le sol peuvent entraîner des éléments solides jusqu'au cours d'eau. Ensuite, l'érosion des berges constitue également un élément principal de l'apport en sédiment du cours d'eau. Enfin, le transport des éléments solides du lit de la rivière par charriage constitue la dernière source d'apport solide considéré dans ce travail.

Tout d'abord, le potentiel d'apport solide du bassin versant peut être estimé à partir de la carte de sensibilité des sols à l'érosion, indiquée à la figure 4.14 en page 96. Le SPW a qualifié la sensibilité à l'érosion selon des mailles de 10x10m (couche ratser) à partir de l'équation révisée de perte de sol universelle (R.U.S.L.E) (préalablement détaillée en page 81). Il s'agit d'un modèle mondialement utilisé pour calculer le taux d'érosion annuel moyen des sols à l'aide de 5 facteurs. Le SPW détaille ces facteurs comme ceci :

1. La sensibilité du sol (érodibilité- Facteur K). Ce paramètre dépend notamment de la texture du sol et du taux de matières organiques ;
2. La topographie (longueur de pente et inclinaison- Facteur LS). Ce paramètre est important car une parcelle longue mais de pente moyenne peut être globalement aussi sensible à l'érosion qu'une parcelle plus courte sur pente forte. Il prend également en considération la position de la parcelle au sein du bassin versant et intègre le flux d'eau en provenance des parcelles situées en amont ;
3. L'agressivité de la pluie (érosivité - Facteur R). Ce paramètre est notamment lié à l'intensité de la pluie, généralement exprimée en litres par seconde et par mètre carré ou en millimètres par heure ;
4. La couverture du sol. Un sol bien couvert sera mieux protégé à la fois de l'impact de gouttes de pluie et des flux de ruissellement ;
5. Les éventuels aménagements antiérosifs.

Cette carte ne permet pas de quantifier de manière absolue le potentiel d'apport solide du bassin versant, mais permet une première estimation. La quantification du potentiel d'apport solide du bassin versant fera l'objet de travaux futurs.

L'érosion des berges ainsi que le transport d'éléments solides par charriage le long du lit mineur participent également à l'apport solide du cours d'eau.

L'écoulement au sein du lit mineur exerce une contrainte de cisaillement sur le lit ainsi que le long des berges. Elle est déterminée en considérant un écoulement uniforme et est définie par la relation 4.5. Si la contrainte exercée sur le lit ou sur les berges du cours d'eau excède une certaine valeur critique, alors les éléments solides sont mis en mouvement, et participent ainsi à l'apport solide.

$$\tau_0 = \rho g R_h i \tag{4.5}$$

avec

ρ Masse volumique de l'eau (kg/m^3)

g Accélération gravitationnelle (m/s^2)

R_h Rayon hydraulique (m)

i Pente

Shields [13] a défini une relation adimensionnelle telle qu'exprimée en 4.6 [17]. Si ce rapport atteint une certaine valeur critique τ_c, alors les éléments sont mis en mouvement.

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) g D} \tag{4.6}$$

avec

τ_0 Contrainte de cisaillement (N/m^2)

ρ_s Masse volumique des éléments solides (kg/m^3)

ρ Masse volumique de l'eau (kg/m^3)

g Accélération gravitationnelle (m/s^2)

D Diamètre des éléments solides (m)

Plusieurs études ont visé à déterminer cette valeur τ_c. Parmi l'une d'elles, une étude menée par François Petit et al. [61], a passé en revue la littérature pour en extraire les valeurs caractéristiques proposées avant d'évaluer le critère de Shields sur 14 cours d'eau (et 18 sites d'étude au total) situés principalement dans les Ardennes belges.

Il en ressort que la moyenne de cette valeur critique s'élève à 0,040 mais elle présente cependant une forte variabilité. En effet, les grandes rivières présentent des valeurs plus faibles jusqu'à 0,025. Alors que les plus petits cours d'eau ou les rivières de sinuosité élevée, présentent des valeurs plus importantes, pouvant dépasser 0,050.

Les résultats de cette étude pourront être intégrés dans de futurs travaux qui viseront à quantifier l'apport solide du cours étudié.

Une méthodologie similaire permet de déterminer la contrainte de cisaillement critique le long ds berges.

Une connaissance de la contrainte critique de cisaillement couplée à une connaissance de la granulométrie du lit de la rivière permet de quantifier le mouvement des éléments solides par charriage.

En revanche, pour quantifier l'érosion des berges, la connaissance des matériaux les constituant est essentiel. En effet, des berges végétalisées seront beaucoup moins sensibles à l'érosion, car les structures végétales vont jouer un rôle de protection face à l'érosion. Aussi, des berges en sable seront plus sensibles à l'érosion que des berges constituées d'argile.

Le potentiel d'apport solide issu du bassin versant, des berges et du lit n'a pas pu être quantifié dans le cadre de ce travail. Le score de l'indice de résilience obtenu devra être interprété en gardant à l'esprit que le potentiel d'apport solide et l'érodabilité des berges ont été estimés.

Il serait nécessaire d'élaborer une échelle d'appréciation en fixant des seuils pour distinguer un apport insuffisant, optimal ou excessif, de manière à garantir une recharge sédimentaire suffisante et garantissant l'équilibre du cours d'eau. Ces éléments devront être quantifiés dans des travaux futurs.

IHMD

L'indice hydromorphologique de la diversité quantifie le degré de diversité morphologique d'un tronçon donné. Ce score dépend des paramètres statistiques de vitesse d'écoulement et de hauteur d'eau (voir Section 2.1.1). Sa valeur minimale est 1, correspondant à une situation totalement homogène tandis qu'une valeur supérieure ou égale à 10 décrit un cours d'eau naturel.

Déterminé par simulation numérique sur le tronçon étudié de l'Orneau, il présente un score de 4,72. Cette valeur semble cohérente avec ce qui a été observé sur site.

Pour enrichir le diagnostic du cours d'eau, l'IHMD est intégré à l'indice d'artificialisation du lit mineur. Pour ce faire, le score de l'IHMD doit être normalisé de façon à ce que 0 reflète un état naturel et 1 une situation artificielle. Une proposition apparaît en 4.7. Elle est appelée à évoluer au fil des travaux futurs et des retours d'expérience.

$$\textbf{Score normalisé(IHMD)} = \begin{cases} 1, & \text{si IHMD} = 1, \\ 0, & \text{si IHMD} \geq 10, \\ 1 - \dfrac{\text{IHMD}}{10}, & \text{si } 1 < \text{IHMD} < 10. \end{cases} \tag{4.7}$$

Pour l'Orneau, l'IHMD de 4,72 correspond donc à un score normalisé de 0,528 qui sera ensuite intégré au calcul global de l'indice d'artificialisation du lit mineur.

4.3.2 Bande riveraine et ripisylve

La profondeur et le type d'occupation du sol de la bande riveraine peuvent être estimés à partir de le combinaison des cartes IGN, de l'occupation du sol et de vue satellite, comme représenté à la figure 4.14 en page 96. Par ailleurs, la carte IGN se trouve être plus précise que la vue aérienne et la carte d'occupation du sol. Par exemple, en vue aérienne, il n'est pas vraiment possible de caractériser la ripisylve. Dans ce cas d'étude, la ripisylve des deux rives pourrait être assimilée comme arborée et arbustive, mais la carte IGN montre que la rive gauche n'est que recouverte d'herbe, ce qui confirme l'absence de ripisylve de ce côté.

De plus, d'après CartoWeb.be, les cartes IGN sont actualisées tous les deux mois, cette fréquence de mise à jour garantit donc une fiabilité pour estimer l'occupation des sols.

La combinaison des cartes IGN, d'occupation du sol et de la vue aérienne permet d'estimer l'occupation des sols et la profondeur de la bande riveraine, mais ne peut totalement affirmer le type de ripisylve ainsi que sa continuité.

4.3.3 Obstacles à l'écoulement

Il existe une carte du SPW qui recense les obstacles à la circulation des poissons. Elle est représentée à la figure 4.14. Pour le site de l'Orneau, aucun obstacle n'est mentionné.

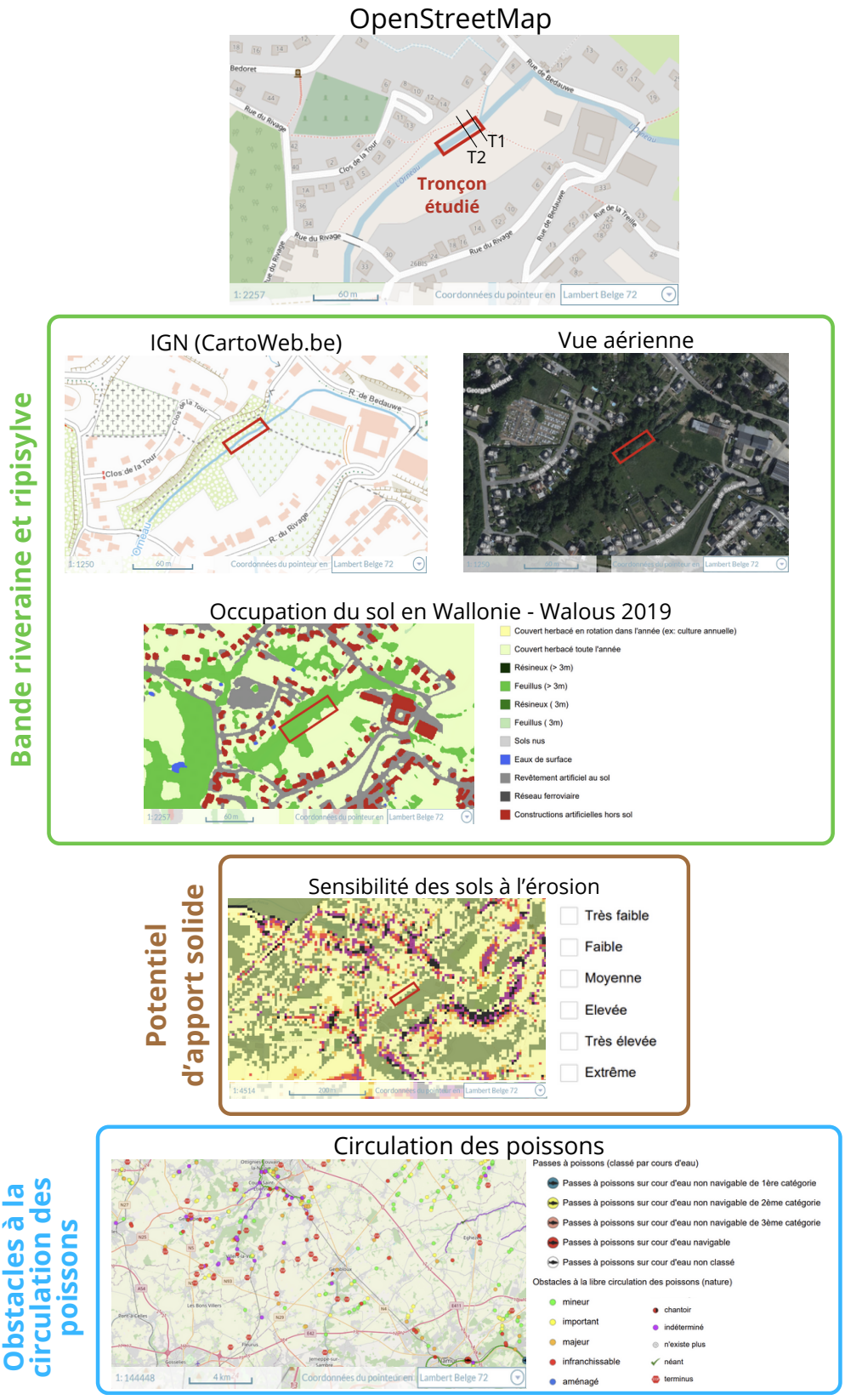


FIGURE 4.14 – Détail des cartes accessibles en ligne utiles au diagnostic.

4.4 Analyse de l'évaluation de l'Orneau à distance et comparaison des résultats

Le tableau 4.9 en page 100 reprend les différents éléments qui composent le diagnostic du segment 1 du site étudié ainsi que la méthode d'acquisition appliquée in situ et à distance. Les différents indices sont aussi calculés sur l'ensemble du tronçon étudié. Les méthodes d'acquisition possibles sont les suivantes : Observation (O), Mesure (M), Estimation (E), ND (Non-déterminé), SN (Simulation numérique), MNT et EC (Estimation à partir de cartes reprises à la figure 4.14 en page 96).

Le diagnostic à distance n'a pas pu être complété de manière exhaustive. En effet, les informations relatives à la granulométrie, les matériaux des berges et leur érosion, le potentiel d'apport solide et la diversité d'habitats n'ont pas pu être déterminées dans ce travail. Le potentiel d'apport solide et l'érodabilité des berges ont donc été estimés comme faibles pour le calcul de l'indice de résilience du tronçon. Concernant l'indice d'artificialisation du lit mineur, la protection des berges n'a pas été considérée.

Ensuite, d'autres éléments du diagnostic ont nécessité de faire des hypothèses fortes telles que la détermination du coefficient de rugosité n, et la présence de ripisylve aux abords des berges.

Malgré le fait que certains éléments n'ont pas pu être déterminés, le diagnostic à distance présente divers avantages par rapport au diagnostic in situ. Par ailleurs, la notion de classe d'évolution morphodynamique n'était pas applicable à distance, et elle a donc été remplacée par le ratio L_{pb}/H_{pb}, qui permet une évaluation quantitative. L'IHMD participe également au calcul de l'indice d'artificialisation du lit mineur et décrit quantitativement la diversité des faciès d'écoulement. Enfin, la détermination de la géométrie de plein bord sur base du MNT semble plus objective que des mesures in situ, car elle ne peut pas être influencée par la présence de végétation ou une géométrie complexe du terrain.

En ce qui concerne l'exploitation du diagnostic en ligne, la même méthodologie de conversion des scores en valeurs normalisées a été appliquée. Cette conversion est présentée aux tables 3.3 et 3.5 aux pages 68 et 70. Ceci implique donc que les indices calculés selon les modalités in situ et à distance devraient présenter des ordres de grandeur comparables.

Toutefois, l'indice d'artificialisation du lit mineur déterminé à distance est plus élevé que celui déterminé in situ. Cela est dû au fait que la classe d'évolution moprhodynamique (dont le score normalisé était de 0 pour le diagnostic in situ) a été remplacée par le ratio L_{pb}/H_{pb} (dont le score normalisé est 0,3 sur le segment 1 et 0,7 sur le segment 2). L'IHMD a également été intégré au diagnostic à distance avec un score normalisé de 0,528. De plus, le calcul de la sinuosité à partir du MNT contribue à lui attribuer un score normalisé de 0,5.

Par ailleurs, la séparation en classes proposée par l'OFB diminue la nuance possible dans le

diagnostic. Par exemple, la puissance spécifique de plein bord déterminée à distance pour le segment 1 est de 29,75 W/m². Or, la limite entre deux classes de la table 3.5 est 30 W/m². La classe de 10 à 30 W/m² correspond à un score normalisé de 0,3 ; alors que la classe supérieure comprend un intervalle de 30 à 100 W/m² et correspond au score de 0,7. Dans ce cas-ci, le score le plus critique a été choisi : 0,3. Le même problème s'est présenté dans le choix de la classe concernant la rugosité du lit mineur. En effet, la rugosité estimée dans le diagnostic à distance est $n = 0.050\ sm^{-1/3}$. Cette valeur de rugosité est équivalente à $K = 20$, correspondant à la limite entre deux classes (voir table 3.3 page 68). Ici, la catégorie la plus critique a également été choisie.

Ces exemples illustrent que lorsque la valeur d'un paramètre étudié se situe à la limite de deux catégories, la conversion des notes en score normalisé peut changer de manière significative le poids de ce paramètre dans le calcul final de l'indice.

Des travaux futurs permettraient d'adapter cette division en classes, ou alors la rendre « plus continue », comme celle proposée pour l'IHMD afin de permettre plus de souplesse et de nuance dans le résultat final.

Finalement, le diagnostic final pourrait être représenté par un graphique en étoile, afin de faciliter la communication des résultats et identifier clairement les éléments les plus altérés du cours d'eau. Un exemple de ce style de représentation est indiqué en figure 4.15.

Ce type de graphique est aussi pertinent pour le suivi après travaux. En comparant le profil avant et après interventions, il illustre clairement les améliorations hydromorphologiques, comme représenté en figure 4.16. Aussi, lorsqu'il s'agit de comparer plusieurs scénarios de restauration, cette représentation visuelle met immédiatement en lumière les compartiments du cours d'eau les plus impactés par chaque projet.

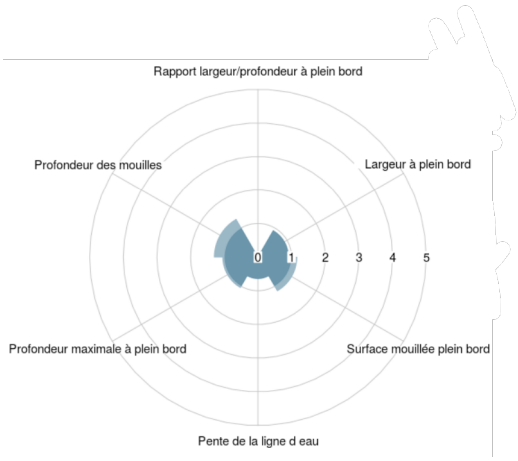


FIGURE 4.15 – Exemple de graphique en étoile appliqué à l'IMG (indice issu du protocole Carhyce) [67].

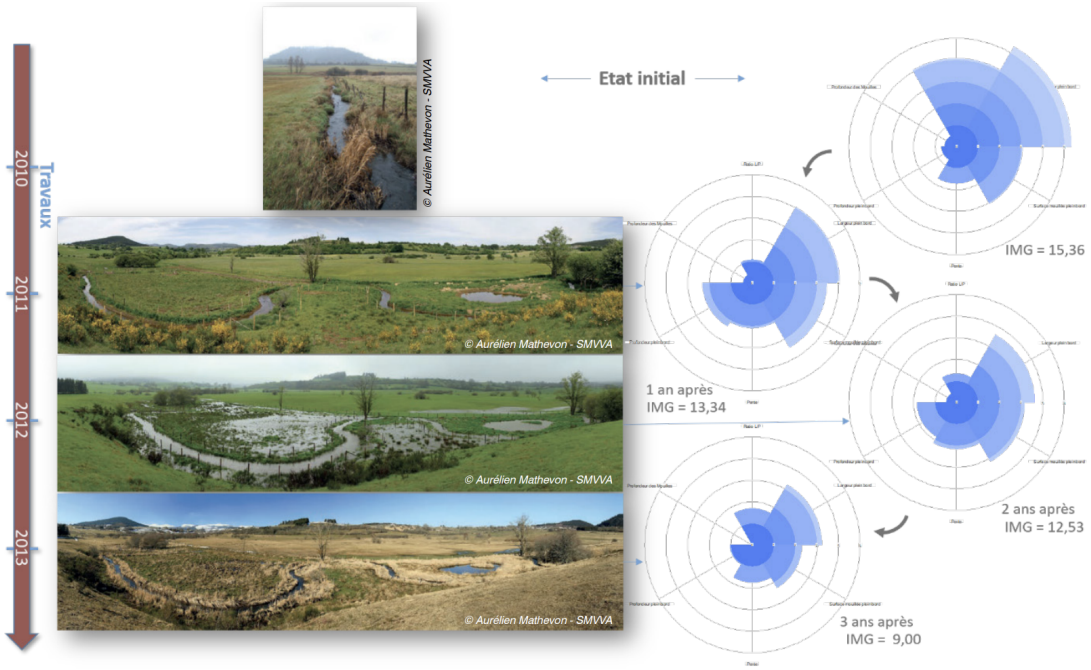


FIGURE 4.16 – Évolution de la qualité hydromorphologique d'un cours d'eau après renaturation [67]. Plus le graphe est concentré vers le centre, meilleure est la qualité hydromorphologique du cours d'eau.

Dans le cadre de l'étude de la qualité hydromorphologique de l'Orneau, l'indice d'artificialisation du lit mineur peut être représenté comme à la figure 4.17. Cette représentation confirme le fait que l'analyse in situ en suivant la méthode de l'OFB autorise peu de nuance dans le diagnostic.

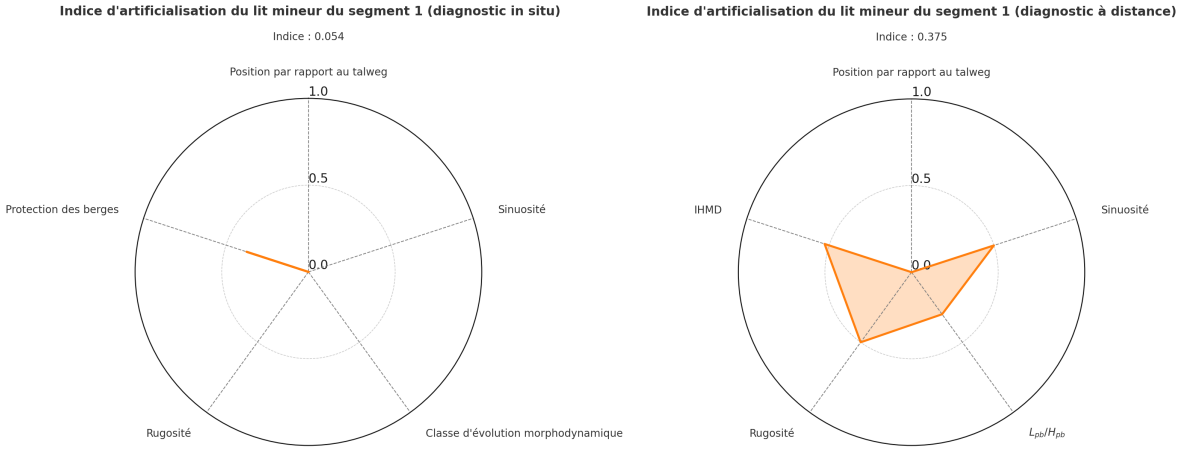


FIGURE 4.17 – Représentation visuelle de l'indice d'artificialisation du lit mineur pour le diagnostic in situ et à distance.

Composante du cours d'eau	Paramètre étudié	In situ		À distance	
		Méthode d'acquisition	Résultat	Méthode d'acquisition	Résultat
Lit mineur	Positionnement par rapport au talweg	O	Dedans	MNT	Dedans
	Pente	MNT	0,00411	MNT	0,00411
	Sinuosité	O	Peu sinueux	MNT	1,008
	Classe d'évolution morphodynamique	O	Classe 1	Ratio L_{pb}/H_{pb}	8.52
	Largeur de plein bord (m)	M	8,88	MNT	9,63
	Granulométrie (σ_G)	M (Wolman)	7,14	ND	/
	Colmatage	O	Classe 4	ND	/
	Matériaux des berges	O	Matériaux naturels (RD) et enrochement (RG)	ND	/
	Érodabilité des berges	O	Faible (RD) et nulle (RG)	ND	/
	Érosion des berges	O	Nulle	ND	/
	Potentiel d'apport solide	E	faible	EC	faible
	IHMD	ND	/	SN	0,528
	Diversité d'habitats	O	Importante	ND	/
	Rugosité du lit mineur n ($sm^{-1/3}$)	O (Cowan)	0,083	E (Chow)	0,050
	Débit de plein bord (m^3/s)	Déduit	8,41	Déduit	7,10
	Puissance spécifique de plein bord (W/m^2)	Déduit	38,54	Déduit	29,75
Bande riveraine et ripisylve	Occupation des sols RG [0-5m]	O	Champs/herbes	EC	Herbes
	Occupation des sols RD [0-5m]	O	Arbres/Abrustres	EC	Forêt
	Occupation des sols RG [5-10m]	O	Champs/herbes	EC	Herbes
	Occupation des sols RD [5-10m]	O	Arbres/Abrustres	EC	Forêt
	Nature et continuité de la ripisylve RG	O	Absente	EC	Absente
	Nature et continuité de la ripisylve RD	O	Arbres/Abrustres, semi-continue	EC	Arbres, continue
	Emprise à l'échelle du tronçon	O	1 à 3 largeur(s) du lit	EC	1 à 3 largeur(s) du lit
Obstacles	Type	O	Absence d'obstacles	EC	Absence d'obstacles
	Longueur et largeur de l'ouvrage	O	/	/	/
	Hauteur de chute	O	/	/	/
Indices sur l'ensemble du site étudié	Artificialisation du lit mineur	/	0,027	/	0,432
	Pression dans la bande riveraine	/	0,136	/	0,3
	Résilience à l'échelle du tronçon	/	0,381	/	0,3
	Obstacles à l'écoulement	/	0	/	0

TABLE 4.9 – Comparaison des résultats et méthodes d'acquisition pour l'établissement du diagnostic de l'Orneau in situ et à distance.

Chapitre 5

Discussion

Pour appliquer la méthodologie de l'OFB à distance, il a été nécessaire d'adapter certains éléments du diagnostic. Ce dernier est basé sur l'analyse du lit mineur, de la bande riveraine et la ripisylve ainsi que des obstacles à l'écoulement. De ce diagnostic sont dérivés 4 indices : l'indice d'artificialisation du lit mineur, l'indice de pression dans la bande riveraine, l'indice de résilience et l'indice d'obstacles à l'écoulement.

Cette décomposition de l'analyse en différents indices est une idée pertinente pour le futur IPCE, car elle permet de cibler clairement les altérations du cours d'eau et donc d'orienter vers des projets de restauration adaptés.

Toutefois, cette méthode comporte certaines lacunes et limitations, qui sont décrites ci-dessous. Dans le diagnostic in situ de l'OFB, plusieurs paramètres nécessitent une appréciation qualitative. Ceci peut conduire à des résultats moins fiables, subjectifs et dépendants de l'opérateur. Pour appliquer cette méthode à distance et rendre la caractérisation possible, plusieurs éléments ont dû être adaptés.

Tout d'abord, dans la caractérisation du lit mineur, l'appréciation des classes d'évolution morphodynamique a été remplacée par l'évaluation du ratio de la largeur de plein bord sur la hauteur de plein bord. D'une part, l'assignation d'une classe d'évolution morphodynamique au cours d'eau n'était pas évidente sur le terrain, surtout pour des opérateurs non expérimentés. Ensuite, cette notion ne pouvait être analysée à partir de simulation numérique ou de données accessibles en ligne. Le ratio par lequel elle a été remplacée permet également une caractérisation plus fiable car il ne dépend uniquement de la géométrie à plein bord qui peut être déterminée à partir du MNT.

Ensuite, l'application de cette méthode a aussi montré la nécessité de rester critique face aux données issues du MNT. En effet, par exemple, une estimation erronée de la pente peut conduire à une surestimation du débit de plein bord et donc également de celle de la puissance spécifique de plein bord. Cela mènerait à des projections de travaux de restauration inadaptés.

En ce qui concerne le diagnostic relatif à la bande riveraine, il peut être assez bien estimé par les cartes IGN, d'occupation du sols et les vues satellites accessibles en ligne, mais ne peut

caractériser de manière totalement fiable la ripisylve.

Par ailleurs, l'évaluation de l'indice de résilience a été limitée par l'absence d'une analyse approfondie de l'érodabilité des berges et du potentiel d'apport solide. En conséquence, le score de résilience proposé doit être interprété avec prudence, n'ayant pas été calibré ni confronté à des données empiriques.

Enfin, l'ajout de l'indice hydromorphologique de la diversité dans le diagnostic permet de prendre en compte la diversité des faciès d'écoulement. Il est déterminé à partir de simulation numérique sur Watlab. Le calcul de cet indice requiert une estimation précise du coefficient de rugosité du lit mineur, ainsi que des données fiables sur le débit et une bathymétrie détaillée.

En ce qui concerne la conversion du diagnostic en score normalisé, la délimitation des classes en l'état permet peu de nuance. De plus, le changement de pondération d'une classe à l'autre impacte significativement le poids du paramètre dans le calcul de l'indice.

Dans ce travail, seule la qualité hydromorphologique du cours d'eau a été étudiée et certains aspects biologiques ou physico-chimiques pourraient enrichir l'évaluation globale.

La détermination de la qualité hydromorphologique de l'Orneau à distance est possible et donne des résultats relativement proches de ceux obtenus à partir de mesures et observations sur le terrain. Cependant, certains éléments n'ont pas pu être déterminés à distance dans le cadre de ce travail. Il s'agit principalement du potentiel d'apport solide et de l'érodabilité des berges.

Contrairement au diagnostic in situ, la méthode de caractérisation du cours d'eau à distance ne nécessite plus d'évaluation qualitative. Toutefois, elle requiert de faire certaines hypothèses fortes concernant l'érodabilité des berges et le potentiel d'apport solide, ainsi que pour le coefficient de rugosité du cours d'eau. Dans ce contexte, il a donc été essentiel de trouver un équilibre entre la précision de l'analyse et la fiabilité du diagnostic, tout en veillant à ce que celui-ci puisse être obtenu rapidement et à moindre coût.

A ce stade du travail, des visites sur le terrain sont toujours nécessaires pour caractériser les berges et leur érosion sous l'écoulement, ainsi que pour déterminer le potentiel d'apport solide. A terme, les visites sur le terrain devraient être limitées uniquement à des observations afin de vérifier le modèle numérique, et confirmer les hypothèses établies. Dans certains cas, si des observations sur site sont nécessaires, elles pourraient être rendues fiables, faciles et rapides, à condition qu'une documentation complète et détaillée soit fournie à l'utilisateur.

La compréhension des limites de la méthode actuelle facilite l'identification des pistes d'amélioration et oriente les travaux futurs nécessaires à son perfectionnement.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Ce travail avait pour objectif d'explorer des pistes pour le développement d'un indice de qualité hydromorphologique, l'Indice Petit Cours d'Eau (IPCE). Cet indice est nécessaire dans le cadre du projet Rivialis, une application d'aide à la décision permettant d'évaluer tant l'état initial que les scénarios de restauration projetés. La mise au point de ce projet fait suites aux recommandations de la DCE.

L'application se veut accessible en proposant un diagnostic fiable et rapide. Pour ce faire, une grande partie des données caractéristiques du cours d'eau doivent être récoltées à distance (données accessibles en ligne, documents scientifiques ou modélisations numériques).

Le défi principal du projet Rivialis consiste à trouver un juste équilibre entre caractérisation complète du cours d'eau tout en proposant un diagnostic rapide et fiable.

Avant de mettre au point l'IPCE, une revue de la littérature a d'abord permis d'analyser 8 indices de qualité existants. Cette revue a permis d'identifier les paramètres du cours d'eau considérés dans le calcul des indices, le contexte dans lequel ils s'appliquent, la méthode d'acquisition, ainsi que le traitement des données. De cette revue de la littérature est ressortie la méthodologie développée par l'Office Français de la Biodiversité (OFB). Le fait que son domaine d'application concerne les cours d'eau de même taille que ceux visés par le projet Rivialis et son approche modulaire ont permis de considérer cette méthode comme point de départ pour la création de l'IPCE.

Pour mieux comprendre le mode de fonctionnement de cette méthode, ses avantages et ses limites, elle a été appliquée sur l'Orneau, un cours d'eau à Gembloux. Elle a tout d'abord été appliquée in situ, pour analyser la facilité de la mise en pratique de la méthode, ainsi que ses limites. Ensuite, toujours dans le but de proposer un diagnostic fiable, accessible et rapide, cette méthode a aussi été appliquée à distance. Le diagnostic a ainsi été fait sur base de données accessibles en ligne, d'hypothèses ou alors de simulations numériques sur Watlab.

L'application de cette méthode selon ces deux modalités a permis tout d'abord de comparer les résultats obtenus in situ et à distance. Il en résulte que l'analyse à distance indique un score

de qualité plus faible que l'analyse in situ. Aussi, l'analyse à distance, uniquement basée sur des éléments quantitatifs, conduit à un diagnostic plus nuancé.

Cependant, certains éléments initialement présents dans la méthode de l'OFB ont dû être adaptés pour pouvoir l'appliquer à distance. C'est le cas par exemple de la notion de classe d'évolution morphodynamique qui a été remplacée par le ratio de largeur de plein bord sur la hauteur de plein bord.

Cette méthode offre ainsi la possibilité d'évaluer la qualité d'un cours d'eau à distance, contrairement à la plupart des indices existants qui requièrent généralement des mesures ou des observations sur le terrain.

Bien que l'IPCE ne puisse remplacer l'expertise humaine, il constitue une base décisionnelle solide pour hiérarchiser les tronçons prioritaires, simuler l'impact des restaurations et simplifier les études préalables. Les résultats encourageants obtenus sur l'Orneau démontrent qu'un diagnostic fiable peut être établi à distance, avec des validations sur site ponctuelles pour affiner les hypothèses et confirmer les résultats obtenus.

Ce travail pose les fondations d'un outil évolutif, appelé à s'enrichir au cours des essais sur le terrain, retours d'expériences et travaux futurs. Plusieurs perspectives d'amélioration se dégagent à l'issue de ce travail.

Ce travail s'inscrit dans le projet des mémoires Oíkos. La suite du travail de Lisa Piorka permettra de confirmer l'impact de certains éléments du cours d'eau sur la santé mentale et le sentiment de bien-être en général.

Ensuite, des protocoles plus rigoureux pour quantifier le potentiel d'apport solide et l'érodabilité des berges devront être établis. Ces deux paramètres pourraient être estimés par des simulations numériques ou exploités à partir de données accessibles en ligne. Cette partie nécessitera tout d'abord une collecte de données sur le terrain, afin de définir clairement différentes classes d'intensité. Cette collecte de données est nécessaire tant pour proposer une décomposition en classes de scores pertinente que pour dégager certaines valeurs typiques des cours d'eau. Par exemple, connaître l'intervalle de valeur typique correspondant à la rugosité du lit mineur pour les petits cours d'eau permettrait d'éviter de faire de trop grosses hypothèses.

La méthode proposée doit être testée sur différents cours d'eau. Tout d'abord à distance, pour évaluer ce qui peut être dérivé à partir de données accessibles en ligne, d'hypothèses et de simulations numériques. Cela permettra d'identifier les points critiques (manque de données, imprécisions du MNT, etc.). Ensuite, des visites sur site seront nécessaires pour valider les projections et ajuster les réglages de l'indice.

Par ailleurs, des indicateurs biologiques ou physico-chimiques pourraient être intégrés à l'IPCE, afin d'offrir un diagnostic encore plus complet.

De plus, le développement d'une version bêta de l'application Rivialis permettra de conduire des tests en conditions réelles.

Bibliographie

[1] Philippe Adam. *Arasement d'un grand seuil en ville de Tulle et réaménagement des berges de la Corrèze, France*. Bulletin n° 1, pp. 39-44. Ingenieurbiologie / Génie biologique. Avr. 2013. URL : https://www.biotec.fr/wp-content/uploads/2018/06/5-Ingenieurbiologie-Bulletin-1-2013-Pages-39-44.pdf.

[2] Agence de l'eau Rhin-Meuse. *Annexe 5 – Modèle RUSLE*. https://cdi.eau-rhin-meuse.fr/GEIDEFile/Annexe_5_MODELE_RUSLE.pdf?Archive=237315705559&File=annexe_5_MoDeLe_RuSLe_pdf. consulté le 18/05/2025. 2011.

[3] Agence française pour la biodiversité. *Le retour du cours d'eau dans son talweg*. Recueil Hydro – Fiche Restauration 8 (n° 28). Agence française pour la biodiversité. 2018. URL : https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/RecueilHydro_28-intro-retour_2018v8_R8.pdf.

[4] Baudoin et al. "Carhyce - Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau. Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau propectables à pied. Agence française pour la biodiversité. Collection Guides et protocoles." In : (2017).

[5] Degiorgi et al. "Méthode standard d'analyse de la qualité de l'habitat aquatique à l'échelle de la station : l'IAM". In : (2002).

[6] Lamouroux et al. "Physical habitat modeling and ecohydrological tools 265-268". In : *Water for the environment* (2017).

[7] Maria Alp et al. "Restaurer la continuité écologique des cours d'eau : que sait-on et comment passer collectivement à l'action ?" In : (2024). DOI : https://doi.org/10.4000/12ppa.

[8] Comité de Bassin Adour-Garonne. *La rivière dans tous ses états, les enjeux de l'hydromorphologie, mai 2016*. URL : https://www.gesteau.fr/sites/default/files/ged_00000000.pdf. (consulté le 09/05/2025).

[9] Syndicat du Bassin Hers Girou. *Renaturation complète*. URL : https://www.hersgirou.fr/renaturation-complete.

[10] Lee BENDA et al. "Geomorphology of Steepland Headwaters : The Transition From Hillslopes to Channels". In : *Journal of the American Water Resources Association* 41.4 (2005), p. 835-851. DOI : 10.1111/j.1752-1688.2005.tb03773.x.

[11] S. BIZZI et al. "Customizing the Morphological Quality Index to Evaluate Eastern-Mediterranean Streams". In : *Science of the Total Environment* 853 (2022), p. 159847. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2022.159847. URL : https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159847.

[12] Łukasz BOREK. "Hydromorphological Index for Rivers as an Indicator of Land Use Impact on Watercourses in Southern Poland". In : *Journal of Hydrology : Regional Studies* 50 (2023), p. 101546. DOI : 10.1016/j.ejrh.2023.101546. URL : https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101546.

[13] John M. BUFFINGTON et David R. MONTGOMERY. "Effects of Hydraulic Roughness on Surface Textures of Gravel-Bed Rivers". In : *Water Resources Research* 35.11 (1999), p. 3507-3521. DOI : 10.1029/1999WR900138.

[14] S.E. BUNN et A.H. ARTHINGTON. "Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity". In : *Environmental Management* 30 (2002), p. 492-507. DOI : 10.1007/s00267-002-2737-0.

[15] Christophe BURTON. *Analyse de l'état hydromorphologique de la Senne, du Canal et de la Woluwe en Région de Bruxelles-Capitale et inventaire des obstacles à la migration des poissons — Rapport 1 : revue bibliographique et synthèse des méthodes existantes*. Rapport technique 16EXP262v01. Étude réalisée par MeryTherm Bureau d'Étude (MTBE sa) pour Bruxelles Environnement. Bruxelles, Belgique : Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (Bruxelles Environnement), juin 2016. URL : https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Rapport1.pdf.

[16] Christophe BURTON. *Analyse de l'état hydromorphologique de la Senne, du Canal et de la Woluwe en Région de Bruxelles-Capitale et inventaire des obstacles à la migration des poissons — Rapport 2 : Diagnostic et propositions d'aménagement*. Rapport technique 16EXP262v02. Étude réalisée par MTBE sa pour Bruxelles Environnement. Bruxelles, Belgique : Bruxelles Environnement — Leefmilieu Brussel, juin 2016. URL : https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Rapport2.pdf.

[17] Soksan CHHUN. "Étude de la stabilité des berges de rivière soumises à la marée". Soutenue le 10 décembre 2013. Thèse de doctorat. Rennes, France : INSA de Rennes, 2013. URL : https://theses.hal.science/tel-00957294/file/These_Chhun_s_facile.pdf.

[18] Philippe CHILEBORGNE. *Hydromorphologie des cours d'eau*. consulté le 11/05/2025. 2017. URL : http://physchileborgne.free.fr/cours/3.Hydromorphologie_2017.pdf (visité le 11/05/2025).

[19] Ven Te CHOW. *Open-Channel Hydraulics*. New York : McGraw-Hill, 1959.

[20] B. Cluer et C. Thorne. "A stream evolution model integrating habitat and ecosystem benefits". In : *River Research and Applications* 30.2 (2012), p. 135-154. DOI : 10.1002/rra.2631.

[21] William F. Coon. *Estimation of Roughness Coefficients for Natural Stream Channels with Vegetated Banks*. U.S. Geological Survey, 1995. URL : https://pubs.usgs.gov/of/1993/0161/report.pdf.

[22] Guillaume Dramis et al. "Outils pour améliorer la mesure du débit minimum biologique des petits cours d'eau". In : *Sciences Eaux & Territoires* 42 (2023). consulté le 16/05/2025, p. 7-11. DOI : 10.20870/Revue-SET.2023.42.7293. URL : https://revue-set.fr/article/view/7293.

[23] EauFrance. URL : https://www.eaufrance.fr/.

[24] Diego Fernández, José Barquín et Paul J. Raven. "A Review of River Habitat Characterisation Methods : Indices vs. Characterisation Protocols". In : *Limnetica* 30.2 (2011), p. 217-234. DOI : 10.23818/limn.30.17. URL : https://doi.org/10.23818/limn.30.17.

[25] FISH-PASS. *Inventaire piscicole par pêche électrique et détermination de l'IPR*. URL : https://www.cotes-darmor.gouv.fr/contenu/telechargement/40173/282645/file/12_RN164_DAE_VoletB_DLE_VA_partie7sur9_.pdf. (consulté le 25/02/2025).

[26] J. F. Friedkin. *A Laboratory Study of the Meandering of Alluvial Rivers*. Rapp. tech. Vicksburg, Mississippi : U.S. Waterways Experiment Station, 1945.

[27] Manuel Garcin. *Gestion du passif de l'activité minière : guide méthodologique, 2018*. URL : https://www.researchgate.net/figure/Transport-solide-par-charriage-et-suspension-adapte-de-Naaim-Bouvet-Richard-2015-C_fig2_329643312. (consulté le 10/05/2025).

[28] Walter Gostner et Anton J. Schleiss. "Der hydromorphologische Index der Diversität – «eine Messlatte für das ökologische Potenzial von Hochwasserschutzprojekten»". Allemand. In : *Wasser Energie Luft* 103.4 (2011). Article introducing the Hydro-Morphological Index of Diversity (IHMD), p. 327-336. DOI : 10.5169/seals-941828. URL : https://doi.org/10.5169/seals-941828.

[29] Walter Gostner et al. "The Hydro-morphological Index of Diversity : A Tool for Describing Habitat Heterogeneity in River Engineering Projects". In : *Hydrobiologia* 712.1 (2013), p. 43-60. DOI : 10.1007/s10750-012-1288-5. URL : https://doi.org/10.1007/s10750-012-1288-5.

[30] Greenwin. "RIVIALIS - Application de gestion simplifiée de la renaturation des petits cours d'eau". In : ().

[31] Groupe de travail national sur les étiages (GT Étiages). *Donnée d'étiage hydrométrique*. https://www.eaufrance.fr/sites/default/files/documents/plaquette_hydrom_etiage.pdf. consulté le 17/05/2025. Oct. 2024.

[32] Prénom Guffens. *Indices de qualité hydromorphologique applicables au projet Rivialis*. Rapport technique. Projet Rivialis. GreenWin, 2024.

[33] F. Guyon et J. Moy. "Validation et adaptation de l'outil QUALPHY d'évaluation de la qualité physique des cours d'eau aux masses d'eau wallonnes". In : *Journée d'étude « Monitoring et Gestion physique des cours d'eau wallons »*. Gembloux, Belgique, 2004, p. 58-62. URL : https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/9981/1/leboeuf.pdf.

[34] Fédération de Haute-Saône pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique. "Restauration écomorphologique du Ruisseau le Clos Champ Tenon - Etat initial avant travaux". In : (2016).

[35] Hydrosphère. "Etude de restauration de la continuité écologique au droit du Domaine de Nonville sur la rivière du Lunain". In : *Bassin du Loing* (Septembre 2022).

[36] INRAE RiverLY. *Feuille de calcul pour règles à jauger*. https://riverhydraulics.riverly.inrae.fr/outils/instrumentation/regles-a-jauger. Fichier Excel téléchargé en mai 2025 pour les représentations des mesures de hauteurs et vitesses d'eau. 2023.

[37] INRAE RiverLY. *Règles à jauger*. https://riverhydraulics.riverly.inrae.fr/outils/instrumentation/regles-a-jauger. consulté le 16/05/2025. 2024.

[38] D.Salgues J.R.Malavoi. *Arasement dérasement de seuils, 2010.* URL : https://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/references_bibliographiques/arasement-derasement-seuils-aide-definition-cahier_des_charges_2011_009.pdf. (consulté le 10/05/2025).

[39] OFEV - Office fédéral de l'environnement. "Ecomorphologie Niveau C (Cours d'eau). Berne". In : (2006).

[40] E. W. Lane et W. M. Borland. "River-Bed Scour During Floods". In : *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 119.1 (1954). Paper No. 2712, p. 1069-1089. DOI : 10.1061/TACEAT.0007046.

[41] M. Le Bihan. *Méthodologie d'évaluation de l'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant à l'échelle linéaire*. Guide. Version V2.4. Office Français de la Biodiversité, Direction Régionale Bretagne, 1er mai 2023, p. 40.

[42] M. Le Bihan, A. Dupont et B. Martin. "Titre de l'article ou du rapport". In : *Nom du Journal ou Organisme* 12.3 (2020), p. 45-60.

[43] J. LEMAY et al. "Can the Morphological Quality Index (MQI) be Used to Determine the Ecological Status of Lowland Rivers ?" In : *Geomorphology* 395 (2021), p. 108002. DOI : 10.1016/j.geomorph.2021.108002.

[44] Emmanuel MAES. *Les sédiments et les matières en suspension dans l'eau (Indicateur EAU 5)*. Service public de Wallonie. 2007. URL : https://etat.environnement.wallonie.be/files/live/sites/eew/files/Publications/Rapport%20analytique%202006-2007/Chap10/6_SedimentsMatEnSusp/EAU_05.pdf.

[45] Bravard MALAVOI. "Eléments d'hydromorphologie fluviale, p.11." In : (2010).

[46] CNPF Hauts-de-France NORMANDIE. *Les fonctions écologique set économiques des ripisylves*. URL : https://hautsdefrance-normandie.cnpf.fr/nos-actions/la-biodiversite-et-les-ecosystemes-forestiers/ripisylves. (consulté le 09/05/2025).

[47] Thierry OBERDORFF et al. "Development and validation of a fish-based index for the assessment of 'river health' in France". In : *Freshwater Biology* 47.9 (2002), p. 1720-1734. DOI : 10.1046/j.1365-2427.2002.00884.x.

[48] OFB. *La suppression des contraintes latérales - Recueil d'expériences sur l'hydromorphologie , 2018.* URL : https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/RecueilHydro_25-intro-suppression_2018v8_R5.pdf. (consulté le 10/05/2025).

[49] OFB. *Le reméandrage - recueil d'expériences sur l'hydromorphologie, 2018.* URL : https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/RecueilHydro_27-intro-remeandrage_2018v8_R7.pdf. (consulté le 10/05/2025).

[50] des forêts et du paysage OFEFP - OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT. "Système modulaire gradué - Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Berne." In : (1998).

[51] OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ. *Typologie des cours d'eau pour l'application de la méthode d'évaluation de l'hydromorphologie des petits cours d'eau*. https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/15_conn11_typol_vbat.pdf. consulté le 18/05/2025. 2021.

[52] OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ. *Typologie des faciès d'écoulement : clé de détermination pour des largeurs de cours d'eau allant jusqu'à 100 m (d'après J. R. Malavoi et Y. Souchon, 2002)*. Plate-forme d'Appui Technique pour la Biodiversité, Office français de la biodiversité. 2017. URL : https://patbiodiv.ofb.fr/fiche-methodologique/travaux-rivieres/typologie-facies-decoulement-cle-determination-largeurs-cours-deau-allant-jusqua-100-m-dapres-732.

[53] Agence française pour la biodiversité d'après OIEau. *Transit sédimentaire libre circulation des organismes, 2019.* URL : https://www.eaufrance.fr/sites/default/files/2019-04/continuite-ecologique-transit-sedimentaire-et-libre-circulation-des-organismes-oieau-20190118.png. (consulté le 10/05/2025).

[54] ONEMA. "Les outils de connaissance de l'hydromorphologie des cours d'eau français". In : (Novembre 2012).

[55] ONEMA. "Méthode d'évaluation de la qualité hydromorphologique des cours d'eau - Etat initial et suivis après restauration hydromorphologique". In : (2009).

[56] Onema. *L'indice poissons rivière (IPR) - Notice de présentation et d'utilisation.* URL : https://oai-gem.ofb.fr/exl-php/document-affiche/ofb_recherche_oai/OUVRE_DOC/59505?fic=PUBLI/R7/2.pdf. (consulté le 25/02/2025).

[57] Onema. *l'intérêt et l'importance d'une hydromorphologie non perturbée, 2010.* URL : https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/RecueilHydro_5-interet_vbat.pdf. (consulté le 10/05/2025).

[58] Onema. *La dynamique fluviale, à l'origine de la biodiversité des du bon état écologique, novembre 2012.* URL : https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/RecueilHydro_3-dynamique-fluviale.pdf. (consulté le 09/05/2025).

[59] Onema. *Les outils de connaissance de l'hydromorphologie des cours d'eau français*. Rapp. tech. Voir pp. 3 – 6 pour la description et l'historique de QUALPHY. Paris, France : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, nov. 2012. URL : https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/14_conn10_outils_vbat.pdf.

[60] Organisation des Nations Unies (ONU). *Les Objectifs de développement durable : 17 objectifs pour transformer notre monde*. Consulté le 11/05/2025. 2025. URL : https://www.un.org/fr/exhibit/odd-17-objectifs-pour-transformer-notre-monde.

[61] François Petit et al. "Dimensionless critical shear stress in gravel-bed rivers". In : *Geomorphology* 250 (2015), p. 308-320. ISSN : 0169-555X. DOI : https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.008. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X15301446.

[62] *Qualité biologique des cours d'eau et étangs bruxellois*. Fiche indicateur « Eau 16 » EAU 16. Mise à jour de mai 2022. Bruxelles, Belgique : Bruxelles Environnement — Leefmilieu Brussel, mai 2022, p. 24. URL : https://environnement.brussels/media/7403/download?inline.

[63] *Qualité physico-chimique des eaux de surface*. Fiche méthodologique (FM SW) REE1114. Rapport sur l'État de l'Environnement Bruxellois 2011-2014 ; mise à jour janvier 2020. Bruxelles, Belgique : Bruxelles Environnement — Leefmilieu Brussel, jan. 2020, p. 8. URL : https://environnement.brussels/sites/default/files/ree1114_fm_sw_physicochimie_fr.pdf.

[64] M. RINALDI et al. "A Method for the Assessment and Analysis of the Hydromorphological Condition of Italian Streams : The Morphological Quality Index (MQI)". In : *Geomorphology* 180–181 (2013), p. 96-108. DOI : 10.1016/j.geomorph.2012.09.009. URL : https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.009.

[65] M. RINALDI et al. *Guidebook for the Evaluation of Stream Morphological Conditions by the Morphological Quality Index (MQI) and Related Tools*. Rapp. tech. ISPRA & REFORM Project, 2016. URL : https://www.reformrivers.eu/system/files/Rinaldi%20et%20al%202016%20MQI_final_Aug16.pdf.

[66] Massimo RINALDI et al. "The Morphological Quality Index (MQI) for Stream Evaluation and Hydromorphological Classification". Anglais. In : *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* 1 (2011). DOI : 10.4408/IJEGE.2011-01.O-02. URL : https://rosa.uniroma1.it/rosa02/engineering_geology_environment/article/view/961/825.

[67] Marlène ROLAN-MEYNARD et al. *Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau*. Collection « Guides et protocoles ». ISBN 978-2-37785-063-4. Agence française pour la biodiversité. Mai 2019. URL : https://www.afbiodiversite.fr.

[68] Stanley A. SCHUMM. *The Fluvial System*. New York : John Wiley & Sons, 1977, p. 338.

[69] SERVICE PUBLIC DE WALLONIE. *Gestion des cours d'eau en Wallonie*. consulté le 11/05/2025. 2025. URL : https://hydrometrie.wallonie.be/home/en-savoir-plus/gestion-des-cours-deau-en-wallonie.html (visité le 11/05/2025).

[70] Andrew SIMON. *A Model of Channel Evolution in Modified Alluvial Streams*. Water Resources Investigations Report 89-4044. Washington, D.C. : U.S. Geological Survey, 1989.

[71] Konstantinos STEFANIDIS et al. "Disentangling the Main Components of Hydromorphological Modifications at Reach Scale in Rivers of Greece". In : *Hydrology* 7.2 (2020). 14 p., p. 22. DOI : 10.3390/hydrology7020022. URL : https://doi.org/10.3390/hydrology7020022.

[72] SYBTB. *Fonctionnement des cours d'eau*. URL : https://www.sybtb.fr/le-territoire/fonctionnement-des-cours-deau/#:~:text=La%20rivi%C3%A8re%20%3A%20cours%20d'eau,%C3%A9lev%C3%A9%20et%20une%20longueur%20importante.. (consulté le 09/05/2025).

[73] V. TAMISIER et al. "Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français d'outremer (Carhyce). Spécificités, modalités d'application et valorisation des données Carhyce pour la construction d'un outil d'aide à la gestion des cours d'eau, 128 p." In : *Rapport scientifique CNRS (LGP-LADYSS) Université de Paris Panthéon Sorbonne* (2017). 128 p.

[74] TÉLÉOS. "Formation aux méthodes de détermination de la qualité physique des cours d'eau. Méthode de Qualité Physique à l'échelle du Tronçon. Méthode IAM." In : *Bureau d'étude Téléos suisse.* (2010).

[75] Université de Liège. *Rapport final : Programme Intégré de Recherche Environnement–Eau.* Rapport technique. Rapport final du Programme Intégré de Recherche Environnement–Eau. Liège, Belgique : Université de Liège, déc. 2004, p. 114.

[76] Alain RECKING V. *ELEMENTS DE GEOMORPHOLOGIE FLUVIALE - Cahier 2 La granulométrie des cours d'eau (et sa mesure).* https://www.bedloadweb.com/Granulometrie.pdf. consulté le 20/05/2025. 1/03/2017.

[77] Jean Van Campenhout et al. "Return Period of Characteristic Discharges from the Comparison between Partial Duration and Annual Series, Application to the Walloon Rivers (Belgium)". In : *Water* 12.3 (2020), p. 792. DOI : 10.3390/w12030792. URL : https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/792.

[78] Service public de Wallonie. *A propos d'eau, numéro 12, 2018, 8p.* URL : https://www.protecteau.be/sites/default/files/2022-06/FT_Apropos_eau.pdf. (consulté le 08/05/2025).

[79] Service public de Wallonie. *La restauration hydromorphologique des cours d'eau en Wallonie : premiers retours d'expérience - Guide technique, Décembre 2013.* URL : https://www.walphy.eu/uploads/Guide_technique/Walphy_guideTechnique_Intro.pdf. (consulté le 08/05/2025).

[80] M. Gordon Wolman. *A Method of Sampling Coarse River-Bed Material.* https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/data/studies/gs002/Wolman_Pebble_Count.pdf. consulté le 16/05/2025. 1954.

[81] Aizhong Ye et al. "Dynamic Manning's roughness coefficients for hydrological modelling in basins". In : *Hydrology Research* 49.5 (2018), p. 1379-1395. DOI : 10.2166/nh.2018.175. URL : https://iwaponline.com/hr/article/49/5/1379/38878/Dynamic-Manning-s-roughness-coefficients-for.

Annexe A

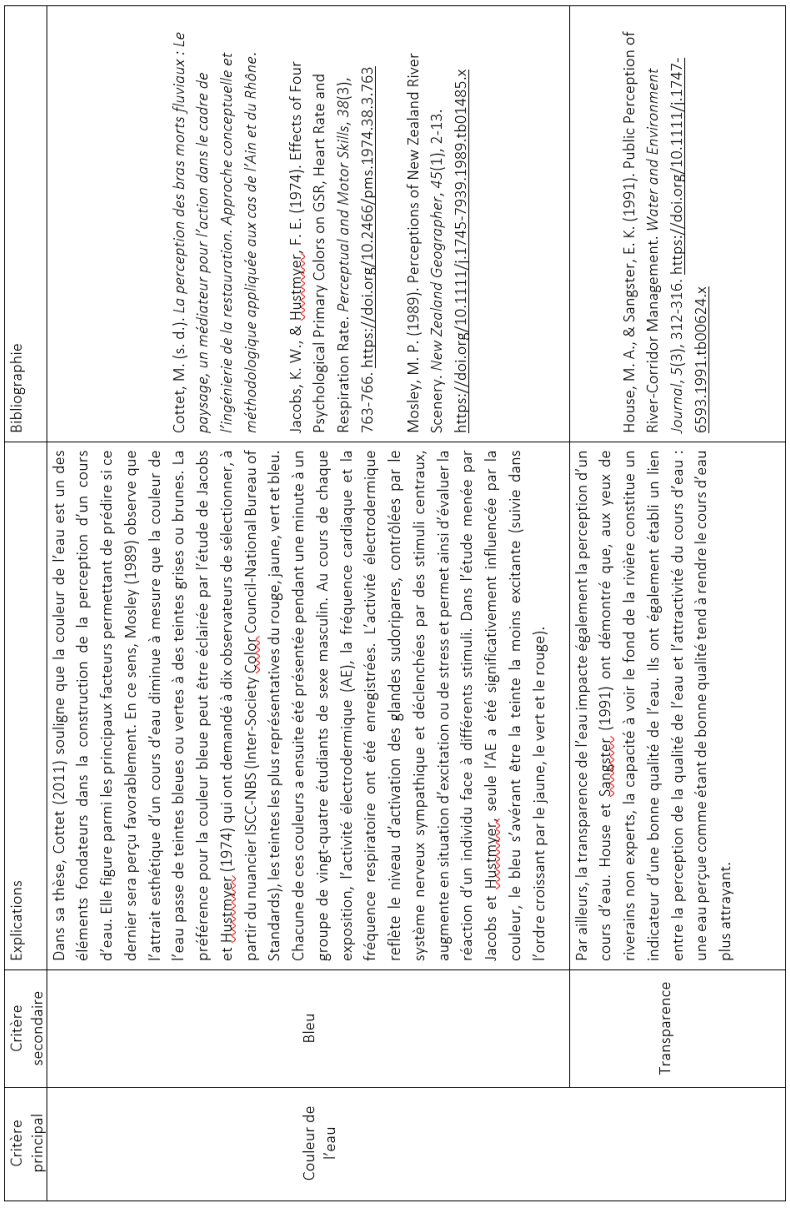
Travail de Lisa Piorka dans le cadre du mémoire Oíkos : Quelles sont les propriétés des rivières perçues favorablement par les individus et comment expliquer ces préférences ?

Les caractéristiques physiques, écologiques et esthétiques d'une rivière peuvent influencer la manière dont elle est perçue ainsi que les bénéfices potentiels qu'elle peut avoir sur la santé mentale et le bien-être. Certaines de ces caractéristiques sont perçues plus favorablement que d'autres. Comment comprendre ces préférences et le rôle de médiation qu'elles exercent sur la santé mentale et le bien-être ?

Gaekwad et al. (2022) expliquent l'hypothèse de la biophilie selon laquelle il existe un lien inné, biologique et génétique entre l'être humain la nature, en incluant notamment une composante émotionnelle. De son côté, Yevjevich (1992) fait le lien entre eau et développement des civilisations. Pour l'Homme nomade, l'eau était essentielle pour l'hydratation, la pêche et la chasse. Suite à la sédentarisation, elle est devenue indispensable aux activités agricoles, les sources, rivières et lacs constituant les principales ressources en eau lors des périodes de sécheresse. Les cours d'eau ont ainsi influencé l'emplacement des premières communautés agricoles.

Plus récemment, des recherches ont étudié les effets des espaces bleus – définis dans le cadre du projet BlueHealth, financé par la Commission Européenne, comme des « environnements extérieurs, naturels ou artificiels, qui comportent une part importante d'eau et sont accessibles aux humains soit de manière proximale (être dans, sur ou à proximité de l'eau), soit de manière dis-

tale/virtuelle (être capable de voir, d'entendre ou de ressentir l'eau) » (Vert et al., 2019) – sur la santé. Les effets bénéfiques des espaces bleus sur la santé mentale et le bien-être sont reconnus dans la littérature scientifique mais les mécanismes sous-jacents ne sont encore que peu explorés. Cottet (2011) s'est penchée sur les facteurs influençant la perception des paysages fluviaux et a objectivé plusieurs caractéristiques pouvant encourager une perception positive. Certaines de ces caractéristiques seront présentées dans la suite de ce travail, afin de comprendre comment elles peuvent contribuer au bien-être et à la santé mentale.



Critère principal	Critère secondaire	Explications	Bibliographie
Couleur de l'eau	Bleu	Dans sa thèse, Cottet (2011) souligne que la couleur de l'eau est un des éléments fondateurs dans la construction de la perception d'un cours d'eau. Elle figure parmi les principaux facteurs permettant de prédire si ce dernier sera perçu favorablement. En ce sens, Mosley (1989) observe que l'attrait esthétique d'un cours d'eau diminue à mesure que la couleur de l'eau passe de teintes bleues ou vertes à des teintes grises ou brunes. La préférence pour la couleur bleue peut être éclairée par l'étude de Jacobs et Hustmyer (1974) qui ont demandé à dix observateurs de sélectionner, à partir du nuancier ISCC-NBS (Inter-Society Color Council-National Bureau of Standards), les teintes les plus représentatives du rouge, jaune, vert et bleu. Chacune de ces couleurs a ensuite été présentée pendant une minute à un groupe de vingt-quatre étudiants de sexe masculin. Au cours de chaque exposition, l'activité électrodermique (AE), la fréquence cardiaque et la fréquence respiratoire ont été enregistrées. L'activité électrodermique reflète le niveau d'activation des glandes sudoripares, contrôlées par le système nerveux sympathique et déclenchées par des stimuli centraux, augmente en situation d'excitation ou de stress et permet ainsi d'évaluer la réaction d'un individu face à différents stimuli. Dans l'étude menée par Jacobs et Hustmyer, seule l'AE a été significativement influencée par la couleur, le bleu s'avérant être la teinte la moins excitante (suivie dans l'ordre croissant par le jaune, le vert et le rouge).	Cottet, M. (s. d.). *La perception des bras morts fluviaux : Le paysage, un médiateur pour l'action dans le cadre de l'ingénierie de la restauration. Approche conceptuelle et méthodologique appliquée aux cas de l'Ain et du Rhône.* Jacobs, K. W., & Hustmyer, F. E. (1974). Effects of Four Psychological Primary Colors on GSR, Heart Rate and Respiration Rate. *Perceptual and Motor Skills, 38*(3), 763-766. https://doi.org/10.2466/pms.1974.38.3.763 Mosley, M. P. (1989). Perceptions of New Zealand River Scenery. *New Zealand Geographer, 45*(1), 2-13. https://doi.org/10.1111/j.1745-7939.1989.tb01485.x
	Transparence	Par ailleurs, la transparence de l'eau impacte également la perception d'un cours d'eau. House et Sangster (1991) ont démontré que, aux yeux de riverains non experts, la capacité à voir le fond de la rivière constitue un indicateur d'une bonne qualité de l'eau. Ils ont également établi un lien entre la perception de la qualité de l'eau et l'attractivité du cours d'eau : une eau perçue comme étant de bonne qualité tend à rendre le cours d'eau plus attrayant.	House, M. A., & Sangster, E. K. (1991). Public Perception of River-Corridor Management. *Water and Environment Journal, 5*(3), 312-316. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1991.tb00624.x

FIGURE A.1 – Composantes du cours d'eau ayant un impact sur la santé mentale et le bien-être. Travail de Lisa Piorka dans le cadre du mémoire Oíkos. Partie 1/4

Naturalité	Présence d'arbres	House et Sangster (1991) ont interrogé des riverains afin d'évaluer leurs préférences en termes de végétation présente le long d'un cours d'eau. Trois conclusions principales sont tirées de l'analyse des réponses : (1) une forte appréciation de la présence d'arbres, (2) un intérêt marqué pour la biodiversité et (3) une nette préférence pour des environnements perçus comme naturels. La présence de poissons est notamment citée comme indicateur de bonne qualité de l'eau. Parallèlement, les travaux de Gregory et Davis (1993) ont révélé que les rivières canalisées par des berges en béton sont les moins appréciées. De la même manière, Steinwender et al. (2008) ont démontré que toute forme d'artificialisation des berges a un impact négatif sur la perception d'un cours d'eau. Vallauri et al. (2010) distinguent deux concepts : la naturalité, définie comme « la libre expression des dynamiques naturelles » et le sentiment de nature qui « synthétise les relations physiques, sensibles ou mentales entre l'être humain et la nature ». Le sentiment de nature est propre à chaque individu et dépend de la relation qu'il entretient avec son environnement. Purcell et al. (2001) avancent l'hypothèse selon laquelle la valeur restaurative perçue d'un paysage influence les jugements esthétiques. Afin de comprendre comment un environnement naturel peut être perçu comme restauratif, il est intéressant de se pencher sur la Théorie de la Restauration de l'Attention (ART). Cette théorie distingue deux formes d'attention : (1) l'attention dirigée, mobilisée de manière volontaire, notamment pour filtrer les distractions, demande un effort cognitif et peut entrainer une fatigue attentionnelle et (2) l'attention involontaire, sollicitée par des stimuli externes. D'après l'ART, les milieux naturels favorisent la restauration cognitive en captant automatiquement l'attention involontaire, ce qui permet à l'attention dirigée de se régénérer.	Gregory, K. J., Davis, R. J. (1993). The perception of riverscape aesthetics: an example from two Hampshire Rivers. *Journal of environmental management*, *39*, 171-185. https://doi.org/10.1006/jema.1993.1062 House, M. A., & Sangster, E. K. (1991). Public Perception of River-Corridor Management. *Water and Environment Journal*, *5*(3), 312-316. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1991.tb00624.x Purcell, T., Peron, E., & Berto, R. (2001). Why do Preferences Differ between Scene Types? *Environment and Behavior*, *33*(1), 93-106. https://doi.org/10.1177/00139160121972882 Steinwender, A., Gundacker, C., & Wittmann, K. J. (2008). Objective versus subjective assessments of environmental quality of standing and running waters in a large city. *Landscape and Urban Planning*, *84*(2), 116-126. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.07.001 Vallauri, D., André, J., Génot, J.-C., De Palma, J.-P., Eynaud Machet, R. (2010). *Biodiversité, naturalité, humanité. pour inspirer la gestion des forêts*. Editions TEC & DOC.
	Biodiversité		
	Perception de nature		

FIGURE A.2 – Composantes du cours d'eau ayant un impact sur la santé mentale et le bien-être. Travail de Lisa Piorka dans le cadre du mémoire Oíkos. Partie 2/4

Critère principal	Critère secondaire	Explications	Bibliographie
Couleur de l'eau	Bleu	Dans sa thèse, Cottet (2011) souligne que la couleur de l'eau est un des éléments fondateurs dans la construction de la perception d'un cours d'eau. Elle figure parmi les principaux facteurs permettant de prédire si ce dernier sera perçu favorablement. En ce sens, Mosley (1989) observe que l'attrait esthétique d'un cours d'eau diminue à mesure que la couleur de l'eau passe de teintes bleues ou vertes à des teintes grises ou brunes. La préférence pour la couleur bleue peut être éclairée par l'étude de Jacobs et Hustmyer (1974) qui ont demandé à dix observateurs de sélectionner, à partir du nuancier ISCC-NBS (Inter-Society Color Council-National Bureau of Standards), les teintes les plus représentatives du rouge, jaune, vert et bleu. Chacune de ces couleurs a ensuite été présentée pendant une minute à un groupe de vingt-quatre étudiants de sexe masculin. Au cours de chaque exposition, l'activité électrodermique (AE), la fréquence cardiaque et la fréquence respiratoire ont été enregistrées. L'activité électrodermique reflète le niveau d'activation des glandes sudoripares, contrôlées par le système nerveux sympathique et déclenchées par des stimuli centraux, augmente en situation d'excitation ou de stress et permet ainsi d'évaluer la réaction d'un individu face à différents stimuli. Dans l'étude menée par Jacobs et Hustmyer, seule l'AE a été significativement influencée par la couleur, le bleu s'avérant être la teinte la moins excitante (suivie dans l'ordre croissant par le jaune, le vert et le rouge).	Cottet, M. (s. d.). *La perception des bras morts fluviaux : Le paysage, un médiateur pour l'action dans le cadre de l'ingénierie de la restauration. Approche conceptuelle et méthodologique appliquée aux cas de l'Ain et du Rhône.* Jacobs, K. W., & Hustmyer, F. E. (1974). Effects of Four Psychological Primary Colors on GSR, Heart Rate and Respiration Rate. *Perceptual and Motor Skills*, *38*(3), 763-766. https://doi.org/10.2466/pms.1974.38.3.763 Mosley, M. P. (1989). Perceptions of New Zealand River Scenery. *New Zealand Geographer*, *45*(1), 2-13. https://doi.org/10.1111/j.1745-7939.1989.tb01485.x
	Transparence	Par ailleurs, la transparence de l'eau impacte également la perception d'un cours d'eau. House et Sangster (1991) ont démontré que, aux yeux de riverains non experts, la capacité à voir le fond de la rivière constitue un indicateur d'une bonne qualité de l'eau. Ils ont également établi un lien entre la perception de la qualité de l'eau et l'attractivité du cours d'eau : une eau perçue comme étant de bonne qualité tend à rendre le cours d'eau plus attrayant.	House, M. A., & Sangster, E. K. (1991). Public Perception of River-Corridor Management. *Water and Environment Journal*, *5*(3), 312-316. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1991.tb00624.x

FIGURE A.3 – Composantes du cours d'eau ayant un impact sur la santé mentale et le bien-être. Travail de Lisa Piorka dans le cadre du mémoire Oíkos. Partie 3/4

Sons de l'eau	Sons structurés		Ji et al. (2025) ont étudié les propriétés restauratives des paysages sonores dominés par des sons aquatiques naturels. On peut, en partie, expliquer l'effet restauratif de ces paysages sonores en se basant sur le concept du « being-away », un des éléments de la théorie de la restauration de l'attention de Kaplan et Kaplan. Le being-away désigne l'éloignement physique et psychologique des sources de fatigue mentale. Comme mentionné précédemment, quand l'environnement, notamment sonore, capte l'attention d'un individu, cela permet la récupération de ses ressources cognitives. Par ailleurs, les auteurs ont observé que le potentiel restauratif du son d'une chute d'eau est moindre comparé à celui des ruisseaux et des rivières. Ceci s'explique principalement par la nature structurée du son généré par les chutes d'eau dont l'impact est continu et à partir d'une hauteur constante. À l'inverse, les sons produits par les ruisseaux et rivières sont non-structurés. Selon Patón et al. (2020), les sons perçus comme relaxants sont ceux qui sont composés de milliers de fréquences aléatoires, ce qui en fait des sons dits non-structurés et imprévisibles. La combinaison de ces fréquences génère un son dans lequel aucune harmonie n'est perceptible. Face à une grande quantité de fréquences sonores, notre système auditif ne parvient plus à les discriminer et le cerveau cesse d'essayer d'analyser le son produit par celles-ci, induisant ainsi un état de relaxation. À l'opposé, les sons dits structurés, contiennent des fréquences bien définies et répétitives et mobilisent l'attention, limitant ainsi leur potentiel apaisant.	Ji, R., Li, S., Bai, Z., Xu, B., & Hu, Z. (2025). Are natural soundscapes always beneficial? Evaluating the restorative qualities and influencing mechanisms of natural water soundscapes. *Applied Acoustics, 227*, 110205. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110205 Patón, D., Delgado, P., Galet, C., Muriel, J., Méndez-Suárez, M., & Hidalgo-Sánchez, M. (2020). Using acoustic perception to water sounds in the planning of urban gardens. *Building and Environment, 168*, 106510. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106510
	Sons non-structurés			

FIGURE A.4 – Composantes du cours d'eau ayant un impact sur la santé mentale et le bien-être. Travail de Lisa Piorka dans le cadre du mémoire Oíkos. Partie 4/4

Annexe B

Typologie des différents faciès d'écoulement

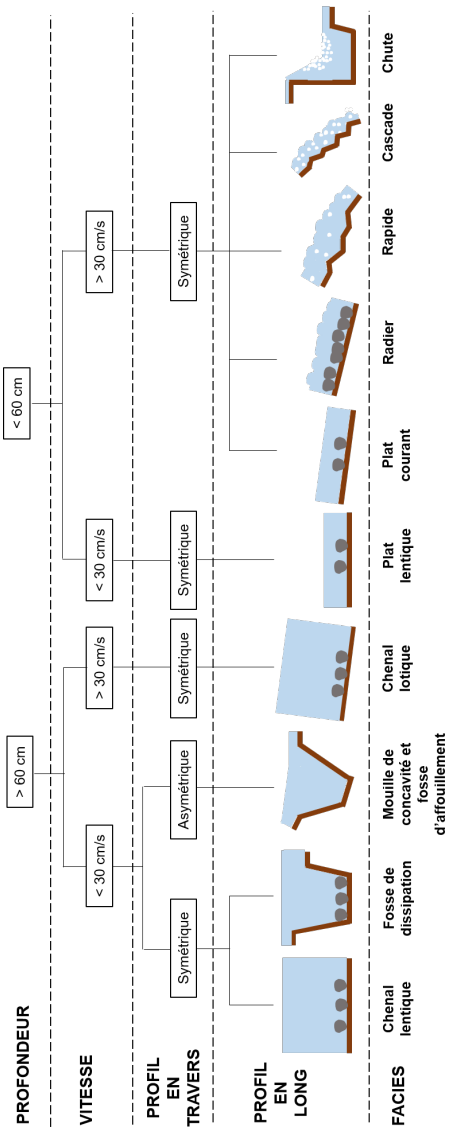


FIGURE B.1 – Typologie des faciès d'écoulement [52].

Annexe C

IPR : Indice Poisson Rivière

L'IPR permet de refléter l'état de dégradation d'un cours d'eau par le spectre de sa population piscicole. Afin de déterminer cet indice, il convient de caractériser un échantillonnage au niveau d'une station de mesure, et de mesurer l'écart avec la composition attendue dans une situation de référence, c'est-à-dire dans des conditions peu ou pas impactées anthropiquement. L'IPR a une approche multiparamétrique, ce qui le rend robuste. Ce type d'approche est inspiré d'autres indices initialement développés aux Etats Unis, comme le IBI : Index of Biotic Integrity. L'IPR est calculé en sommant les 7 métriques suivantes : nombre total d'espèces, nombre d'espèces rhéophiles, nombre d'espèces lithophiles, densité d'individus tolérants, densité d'individus invertivores, densité d'individus omnivores, densité totale d'individus. Ces métriques ainsi que leur réponse face à l'augmentation des pressions anthropiques sont représentées en figure C.1. A partir de cet indice, une classe de qualité du peuplement piscicole est attribué à la station de mesure, tel que représenté en figure C.2.

Liste des métriques intervenant dans le calcul de l'IPR

Métrique	Abréviation	Réponse à l'augmentation des pressions humaines
Nombre total d'espèces	NTE	↓ ou ↑
Nombre d'espèces rhéophiles	NER	↓
Nombre d'espèces lithophiles	NEL	↓
Densité d'individus tolérants	DIT	↑
Densité d'individus invertivores	DII	↓
Densité d'individus omnivores	DIO	↑
Densité totale d'individus	DTI	↓ ou ↑

FIGURE C.1 – Liste des métriques intervenant dans le calcul de l'IPR [56]

La note globale varie de 0 (conforme à la référence) à une valeur de maximum 150 en pratique dans les situations les plus altérées.

Note de l'IPR	Classe de qualité
<7	Excellente
]7–16]	Bonne
]16-25]	Médiocre
]25-36]	Mauvaise
>36	Très mauvaise

FIGURE C.2 – Synthèse des notes et classes de qualité de l'IPR [56]

L'IPR permet de donner une bonne idée de l'état d'un cours d'eau, mais il présente certaines limites. En effet, il a été mis au point via 650 stations sur le territoire français pas ou peu impactées par l'homme et prend en compte 34 espèces qui sont les plus révélatrices à l'échelle de ce territoire. Il en découle que cet indice n'est pas applicable aux cours d'eau présentant des caractéristiques très spécifiques comme les exutoires de plans d'eau naturels ou les secteurs sous à l'action des marées. De plus, ni la biomasse ni la taille des individus capturés ne sont pris en compte dans cet indice. Cela le rend peu sensible dans le cas des cours d'eau naturellement pauvres en espèces. Cela a été mis en évidence dans l'analyse du ruisseau de Cancaval, où un seul individu d'une seule espèce a pu être inventorié, et l'IPR n'a pu être calculé [25].

Annexe D

Détail de la méthode Qualphy



types		1	2	3	3 bis	4	5	5 bis	5 ter	6
		cours d'eau à énergie forte des vallées en V	cours d'eau à énergie moyenne à forte des vallées en U	cours d'eau à énergie moyenne à faible des vallées de côtes schisteuses	cours d'eau à énergie moyenne à faible des vallées de côtes calcaires	Cours d'eau à énergie moyenne à faibles des vallées calcaires et ou schisteuses et crayeuses	cours d'eau à énergie moyenne à faible des collines et plateaux argilo-marno-limono-sableuses	cours d'eau à énergie moyenne à forte des plateaux ardennais tourbeux sur schistes et phyllades	cours d'eau à énergie moyenne à forte des collines et plateaux sur schistes, phyllades et calcaires	cours d'eau à énergie faible à nulle des plaines d'accumulation argilo-limono-sableuse
énergie	pentes de vallée	très forte	forte à moyenne	moyenne à faible	moyenne à faible	faible	moyenne à faible	moyenne à forte	moyenne à faible	faible à nulle
	ordre	>15‰	15‰> P> 5 ‰	<5‰	<5‰	<5 ‰	<5 ‰	15‰> P> 5 ‰	5 ‰<P<10‰	très souvent <1‰
lit mineur	largeur lit mineur	1 à 2	1 à 2	variable	variable	variable	1 à 4	1	1 à 3	1 à 6
	sinuosité	< 5 m	< 5 m	variable selon l'ordre	variable selon l'ordre	variable selon l'ordre	variable selon l'ordre	< 5 m	< 5 m	variable selon l'ordre
		rectiligne	rectiligne à peu sinueux	sinuosité de vallée	sinuosité de vallée	sinueux (limitation latérales des méandres, méandres confinés)	sinueux	rectiligne à peu sinueux	sinueux à peu sinueux	sinueux et méandreux
lithologie	nature	schistes et phyllades	schistes et phyllades	schistes ou schistes et phyllades	calcaires et calco-shistes	Calcaires et/ou schistes et crales	argiles et/ou sables et/ou grès et marnes	Schistes, phyllades	Schistes, phyllades ou calcaires	argiles et/ou sables
	résistance	hétérogènes à tendres	hétérogènes à tendres	hétérogènes à tendres	sédimentaires cohérentes	sédimentaires cohérentes tendres à hétérogènes	meubles à tendres	meubles	hétérogènes à tendres	Meubles à tendres
	couverture	absente	absente	limon peu caillouteux et graviers de terrasse et/ou alluvions dans les vallées inférieures des rangs supérieurs	graviers de terrasse et/ou alluvions uniquement dans les vallées inférieures des rangs supérieurs	alluvions et limons	limons et alluvions	tourbes	Absentes ou limon peu caillouteux	dépôts alluviaux importants
	perméabilité	semi perméable	semi perméable	semi perméable	perméable à fissures à alternance de nodules semi perméable	Perméable à semi perméable	variable selon la teneur des parties	imperméable	variable selon la teneur des parties	perméabilité faible du fait des dépôts argilo-limoneux
forme de la vallée	profil	V	V à U étroit	U encaissé ou en gorge	U encaissé à U large	larges vallées bordées de côtes	vallons très ouverts (lignes d'interfluves) à larges plaines	Vtres évasé sur les hauts plateaux	Vtres évasé sur les hauts plateaux	vastes plaines d'inondation
	pente des versants	forte	forte à moyenne	forte	forte à moyenne	moyenne	moyenne à très faible	faible sur les hauts plateaux	faible sur les hauts plateaux	très faible à nulle
	fond de vallée	absent	absent à étroit	absent ou présent mais peu étendu	peu étendu	présent mais limité les talus	large et fréquemment inondé	absent	présent localement	vaste (> 1 km)
correspondances principaux types français	qualphy	T1 cours d'eau et torrents de montagne	T2-T2 bis cours d'eau de moyenne montagne	T4bis cours d'eau sur schistes ardennais	T4 cours d'eau de côtes calcaires	T5 bassins vallées de plateaux calcaires	T6 bis cours d'eau de collines argilo-limoneuses	T6 bis cours d'eau de collines argilo-limoneuses	T6 bis cours d'eau de collines argilo-limoneuses	T6 cours d'eau de plaines argilo-limoneuses
	typologie nationale	122 Torrents de moyenne montagne	212 rivières de moyenne montagne et hauts plateaux	231 cours d'eau de plateaux calcaires	231 cours d'eau de plateaux calcaires	233-234 cours d'eau de vallées calcaires et plateaux crayeux	221 rivières sur formations meubles et/ou rivières de plateaux argilo-marneux	212 rivières de hauts plateaux	215 rivières de hauts plateaux	320-330 rivières de plaines crayeuses ou rivières de plaines argilo-limoneuses

FIGURE D.1 – Présentation de la typologie wallone des cours d'eau [75].

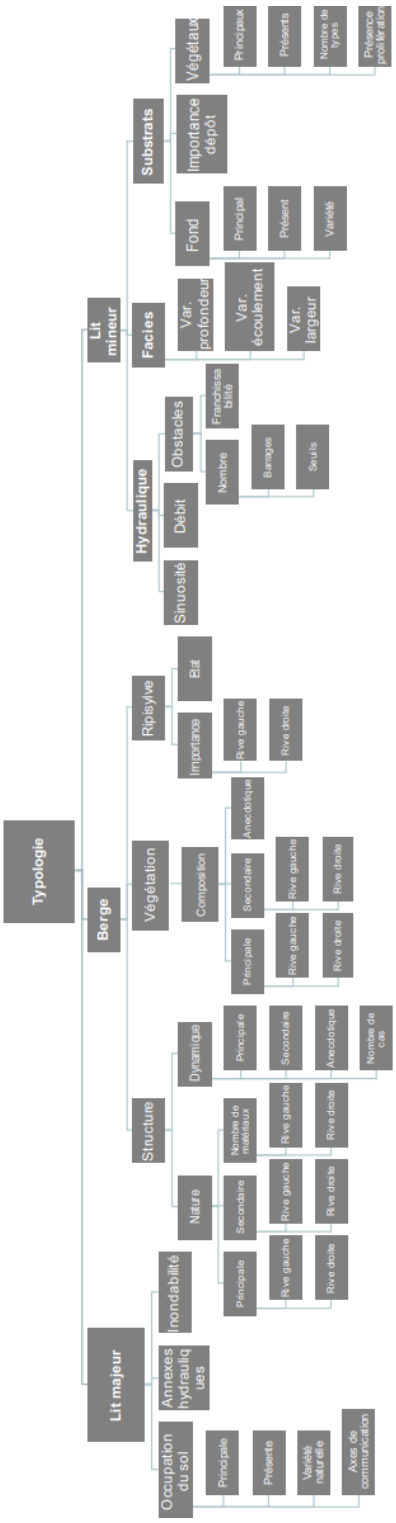


FIGURE D.2 – Paramètres à étudier de la méthode Qualphy [16].

Annexe E

MQI : liste des 28 indicateurs évalués et scores

Indicators and assessed parameters	Assessment methods	Ranges of application
F1 – Longitudinal continuity in sediment and wood flux Presence of crossing structures (weirs, check-dams, bridges, etc) that potentially may alter natural flux of sediment and wood along the reach	*Remote sensing* and/or *database of interventions:* identification of crossing structures; *field survey*: visual assessment of partial or complete interception (qualitative)	All river types
F2 – Presence of a modern floodplain Width and longitudinal length of a modern floodplain	*Remote sensing–GIS*: measurement of width and longitudinal length (quantitative); *field survey*: identification/checking of modern floodplain (qualitative)	*PC–U*; not evaluated in the case of mountain streams along steep (>3% slope) alluvial fans
F3 – Hillslope – river corridor connectivity Presence and length of elements of disconnection (e.g., roads) within a buffer 50-m wide for each side of the river	*Remote sensing–GIS*: identification and measurement of length of disconnecting elements (quantitative); *field survey*: checking disconnecting elements (qualitative)	*C*
F4 – Processes of bank retreat Presence/absence of retreating banks	*Remote sensing* and/or *field survey*: identification of eroding banks (qualitative)	*PC–U*; not evaluated in the case of Low-Energy ERT types from 17 to 22
F5 – Presence of a potentially erodible corridor Width and longitudinal length of an erodible corridor, i.e., area without relevant structures (e.g., bank protections, levées) or infrastructure (e.g., houses, roads)	*Remote sensing–GIS:* measurement of width and longitudinal length (quantitative)	*PC–U*
F6 – Bed configuration – valley slope Identification of bed configuration (i.e., cascade, step pool, etc.) in cases where transverse bed structures are present and in comparison with the expected bed configuration based on valley slope	*Topographic maps*: mean valley slope (quantitative); *field survey*: identification of bed configuration (qualitative)	single-thread, alluvial *C* (ERT types from 4 to 7), except the case of deep streams when observation of the bed is not possible
F7 – Planform pattern Percentage of the reach length with altered planform and geomorphic units	*Remote sensing–GIS:* identification and measurement of length of altered portions (quantitative); *field survey*: identification/checking (qualitative)	*PC–U;* Confined ERT types 8, 9, 10, 11, 15, 19, 22
F8 – Presence of typical fluvial landforms in the floodplain Presence/absence of appropriate landforms in the floodplain (e.g., oxbow lakes, secondary channels, etc.)	*Remote sensing* and/or *field survey*: identification and checking of fluvial forms (qualitative)	*PC–U*
F9 – Variability of the cross section Percentage of the reach length with alteration of the natural heterogeneity of the cross section that is expected for that river type and is caused by human factors	*Field survey*: identification/checking (qualitative); *remote sensing–GIS:* identification and measurement of length of altered portions (quantitative)	All types
F10 – Structure of the channel bed Presence/absence of alterations of bed sediment (armouring, clogging, bedrock outcrops, bed revetments)	*Field survey*: visual assessment (qualitative)	All types, except the case of deep channels when observation of the bed is not possible
F11 – Presence of in-channel large wood Presence/absence of large wood	*Field survey*: visual assessment (qualitative)	All types; not evaluated above the tree-line and in streams with a natural absence of woody riparian vegetation
F12 – Width of functional vegetation Mean width (or areal extension) of functional riparian vegetation in the fluvial corridor potentially connected to channel processes	*Remote sensing–GIS:* identification and measurement of mean width of functional vegetation (quantitative)	All types; not evaluated above the tree - line and in streams with a natural absence of riparian vegetation
F13 – Linear extension of functional vegetation Longitudinal length of functional riparian vegetation along the banks with direct connection to the channel	*Remote sensing–GIS:* identification and measurement of longitudinal length of functional vegetation (quantitative)	All types; not evaluated above the tree - line and in streams with a natural absence of riparian vegetation
A1 – Upstream alteration of flows Amount of changes in discharge caused by interventions upstream (dams, diversions, spillways, retention basins, etc.)	*Hydrological data:* evaluation of reduced/increased discharge caused by interventions (quantitative). In the absence of available data, the assessment is based on the presence of flow intervention and its use (qualitative)	All types

FIGURE E.1 – Liste des 28 indicateurs étudiés (Partie 1/2) [65].

A2 – Upstream alteration of sediment discharges Presence, type, and location (drainage area) of relevant structures responsible for bedload interception (dams, check-dams, weirs)	*Remote sensing–GIS* and/or *database of interventions:* identification of structures and relative drainage area (quantitative)	All types
A3 – Alteration of flows in the reach Amount of alterations of discharge caused by interventions within the reach	See A1	All types
A4 – Alteration of sediment discharge in the reach Type and spatial density of structures intercepting bedload (check dams, weirs) along the reach	*Remote sensing–GIS* and/or *database of interventions:* identification and number of structures (quantitative)	All types
A5 – Crossing structures Spatial density of crossing structures (bridges, fords, culverts)	*Remote sensing–GIS* and/or *database of interventions:* identification and number of structures (quantitative)	All types
A6 – Bank protections Length of protected banks (walls, rip-raps, gabions, groynes, bioengineering measures)	*Remote sensing–GIS* and/or *database of interventions:* length of structures (quantitative)	All types
A7 – Artificial levées Length and distance from the channel of artificial levées	*Remote sensing–GIS* and/or *database of interventions:* length and distance of structures (quantitative)	*PC–U*
A8 – Artificial changes of river course Percentage of the reach length with documented artificial modifications of the river course (meander cutoff, relocation of river channel, etc.)	*Historical /bibliographic information* and/or *database of interventions* (quantitative)	*PC–U*
A9 – Other bed stabilization structures Presence, spatial density and typology of other bed-stabilizing structures (sills, ramps) and revetments	*Remote sensing–GIS* and/or *database of interventions:* identification, number or length of structures (quantitative)	All types
A10 – Sediment removal Existence and relative intensity of past sediment mining activity (over the last 100 years, with a particular focus on the last 20 years)	*Database of interventions* and/or *information available by public agencies; field survey* and/or *remote sensing:* indirect evidence (qualitative)	All types; not evaluated in the case of ERT type 1
A11 – Wood removal Existence and relative intensity (partial or total) of in-channel wood removal during the last 20 years	*Database of interventions* and/or *information available by public agencies; field survey:* additional evidence (qualitative)	All types; not evaluated above the tree - line and in streams with natural absence of riparian vegetation
A12 – Vegetation management Existence and relative intensity (selective or total) of vegetation cuts during the last 20 years	*Database of interventions* and/or *information available by public agencies; field survey:* additional evidence (qualitative)	All types; not evaluated above the tree - line and in streams with natural absence of riparian vegetation
CA1 – Adjustments in channel pattern Changes in channel pattern from 1930s to 1960s based on changes in sinuosity, braiding, and anastomosing indices	*Remote sensing–GIS* (quantitative)	All types; evaluated only for sufficiently large channels
CA2 – Adjustments in channel width Changes in channel width from 1930s to 1960s	*Remote sensing–GIS* (quantitative)	All types; evaluated only for sufficiently large channels
CA3 – Bed-level adjustments Bed-level changes over the last 100 years	*Cross sections / longitudinal profiles* (if available); *field survey*: evidence of incision or aggradation (qualitative/quantitative)	All types; evaluated in case field evidence or information is available

FIGURE E.2 – Liste des 28 indicateurs étudiés (Partie 2/2) [65].

Indicator	Classes	Score
F1	A - absence of alteration in the continuity of sediment and wood	0
	B - slight alteration (obstacles to the flux but with no interception)	3
	C - significant alteration (complete interception of sediment and wood)	5
F2	A - presence of a continuous (>66% of the reach) and wide modern floodplain (>*nW*, where *n* = 1 or 2 for wandering – braided or for single thread - anabranching channels, respectively, and *W* = channel width)	0
	B1 - presence of a discontinuous (10 ÷ 66%) but wide modern floodplain or > 66% but narrow	3
	B2 - presence of a discontinuous (10 ÷ 66%) and narrow modern floodplain	2
	C - absence of a modern floodplain or negligible presence (≤10% of any width)	5
F3	A - full connectivity between hillslopes and river corridor (>90%)	0
	B - connectivity for a significant portion of the reach (33 ÷ 90%)	3
	C - connectivity for a small portion of the reach (≤33%)	5
F4	A - bank erosion occurs for >10% and is distributed along >33% of the reach	0
	B – bank erosion occurs for ≤10%, or for >10% but concentrated along ≤33% of the reach, or significant presence (>25%) of eroding banks by mass failures	2
	C - complete absence (≤2%) of retreating banks, or widespread presence (>50%) of unstable banks by mass failures	3
F5	A - presence of a potentially erodible corridor (*EC*) for a length > 66% of the reach and wide (>*nW*, where *n* = 1 or 2 for wandering – braided or for single thread - anabranching channels, respectively, and *W* = channel width)	0
	B - presence of a narrow (≤*nW*) potentially *EC* for >66%, or wide but for 33 ÷ 66% of the reach	2
	C - presence of a potentially *EC* of any width but for ≤33% of the reach	3
F6	A- bed forms consistent with the mean valley slope	0
	B - bed forms not consistent with the mean valley slope	3
	C - complete alteration of bed forms or the presence of an artificial bed	5
F7	A - absence (≤5%) of alteration of the natural heterogeneity of geomorphic units and channel width	0
	B - alteration for a limited portion of the reach (≤33%)	3
	C - consistent alteration for a significant portion of the reach (>33%)	5
F8	A - presence of floodplain landforms (oxbow lakes, secondary channels, etc.)	0
	B - presence of traces of floodplain landforms (abandoned during the last decades) but with possible reactivation	2
	C - complete absence of floodplain landforms	3
F9	A - absence (≤5%) of alteration of the cross-section natural heterogeneity	0
	B - presence of alteration for a limited portion of the reach (≤33%)	3
	C - presence of alteration for a significant portion of the reach (>33%)	5
F10	A - natural heterogeneity of bed sediments and no significant clogging	0
	B - evident armouring (*PC–U* only) or clogging in various portions of the site	2
	C1 - evident and widespread (>90%) armouring (*PC–U* only) or clogging, or burial (≤50% of the reach), or occasional substrate outcrops (*PC–U* only)	5
	C2 - evident burial (>50%), or widespread substrate outcrops (>33% of the reach) (*PC–U* only) or widespread substrate alteration by bed revetments (>33% of the reach)	6
F11	A – significant presence of large wood along the whole reach	0
	B - negligible presence of large wood for ≤50% of the reach	2
	C - negligible presence of large wood for >50% of the reach	3
F12	A - wide connected functional vegetation (*PC-U:* >*nW*, where *n* = 1 or 2 for wandering – braided or for single thread - anabranching channels, respectively, and *W* = channel width; *C:* >90% of hillslopes, 50 m from each bank)	0
	B - intermediate width of connected functional vegetation (*PC-U:* 0.5 *W* ÷ *nW*; *C*: 33 ÷ 90% of hillslopes, 50 m from each bank)	2
	C - narrow connected functional vegetation (*PC-U*: ≤0.5 *W*; *C*: ≤33% of hillslopes, 50 m from each bank)	3
F13	A - linear extension of riparian vegetation >90% of maximum available length	0
	B - riparian vegetation 33 ÷ 90%	3
	C - riparian vegetation ≤33%	5

FIGURE E.3 – Indicateurs de la fonctionnalité géomorphologique : description des classes et définition des scores [65].

Indicator	Classes	Score
$A1_M$	A - no significant alteration (≤10%) of channel-forming discharges (return interval RI from 1.5 to 10 years) and *Q* with return interval >10 years	0
	B - significant alteration (>10%) of *Q* with return interval > 10 years	3
	C - significant alteration (>10%) of channel-forming discharges	6
A2	A - absence or negligible presence of structures of interception of sediment fluxes	0
	B1 - presence of dams with drainage area 5 ÷ 33%, and/or weirs or check dams with total interception of bedload and drainage areas 33 ÷ 66%, and/or weirs or check dams with partial or no interception of bedload and drainage areas >33% (*plain/hills areas*) or >66% (*mountain areas*)	3
	B2 - presence of dams for drainage area 33 ÷ 66%, and/or weirs or check dams with total interception of bedload and drainage areas >66%	6
	C1 - presence of dams for drainage area >66%	9
	C2 - presence of a dam at the upstream boundary of the reach	12
A3	A - no significant alteration (≤10%) of channel-forming discharges and *Q* with return interval > 10 years	0
	B - significant alteration (>10%) of *Q* with return interval > 10 years	3
	C - significant alteration (>10%) of channel-forming discharges	6
A4	A - absence of structures that intercept sediment flux (dams, check dams, weirs)	0
	B – *channels with S≤1%:* consolidation check dams and/or abstraction weirs (including instream retention basins) ≤1 every 1000 m; *steep channels (S>1%):* consolidation check dams/weirs ≤1 every 200 m and/or one or more open check dams (including instream retention basins)	4
	C - *channels with S≤1%:* consolidation check dams and/or abstraction weirs (including instream retention basins) >1 every 1000 m; *steep channels (S>1%):* consolidation check dams >1 every 200 m and/or one or more retention check dams Or presence of a dam or artificial reservoir at the downstream boundary (*any bed slope*)	6
	Where transversal structures, including bed sills and ramps (A9), are >1 every d1, add	6
	Where transversal structures, including bed sills and ramps (A9), are >1 every d2, add	12
	d1=150 m and d2=100 m in steep channels, d1=750 m and d2=500 m in channels with S≤1%	
A5	A - absence of crossing structures (bridges, fords culverts)	0
	B - presence of some crossing structure (≤1 every 1000 m on average in the reach)	2
	C - presence of numerous crossing structures (>1 every 1000 m on average in the reach)	3
A6	A - absence or localized presence of bank protections (≤5% total length of the banks)	0
	B - presence of protections for ≤ 33% total length of the banks (sum of both banks)	3
	C - presence of protections for > 33% total length of the banks (sum of both banks)	6
	For a high density of bank protections (>50%) add	6
	For an extremely high density of bank protections (>80%) add	12
A7	A - levées absent, set-back, or present and in contact ≤ 5% total length of the banks	0
	B - medium presence of levées close and/or in contact (in contact ≤ 50% bank length)	3
	C - high presence of levées close and/or in contact (in contact > 50% bank length)	6
	For a high density of bank-edge levées (>66%) add	6
	For an extremely high density of bank-edge levées (>80%) add	12
A8	A - absence of artificial changes of the river course in the past (meanders cut-off, channel diversions, etc.);	0
	B - presence of changes for ≤ 10% of the reach length	2
	C - presence of changes for > 10% of the reach length	3
	In the case of historical drainage and dredging works for > 50% of the reach (when an additional score is not already applied for A6 and/or A7), add	6
	In the case of historical drainage and dredging works for > 80% of the reach (when an additional score is not already applied for A6 and/or A7), add	12
A9	A - absence of structures (bed sills/ramps) and revetments	0
	B - limited presence of structures (≤ 1 every *n*, where *n* = 200 m for *mountain areas*, *n* = 1000 m for *plain/hills areas*) and/or revetments (≤ 15% impermeable and/or ≤ 25% permeable)	3
	C1 - presence of many structures (> 1 every *n*) and/or significant bed revetments (≤ 33% impermeable and/or ≤ 50% permeable)	6
	C2 - presence of impermeable bed revetments > 33% and/or permeable revetments > 50%	8
	For a high density of bed revetment (impermeable>50% or permeable>80%) add	6
	For an extremely high density of bed revetment (impermeable>80%) add	12

FIGURE E.4 – Indicateurs d'artificialité : description des classes et définition des scores (Partie 1/2) [65].

A10	*PC–U*:	
	A - absence of recent (last 20 years) and past (over the last 100 years) significant sediment removal activities	0
	B1 – sediment removal activity in the past but absent during the last 20 years	3
	B2 – recent sediment removal activity (last 20 years) but absent in the past	4
	C – sediment removal activity in both the past and during last 20 years	6
	C:	
	A - absence of significant sediment removal activities during the last 20 years	0
	B - localized sediment removal activities during the last 20 years	3
	C - widespread sediment removal activities during the last 20 years	6
A11	A - absence of removal of woody material at least during the last 20 years	0
	B – partial removal of woody material during the last 20 years	2
	C - total removal of woody material during the last 20 years	5
A12	A - no cutting interventions on riparian vegetation (last 20 years) and aquatic vegetation (last 5 years)	0
	B - selective cuts and/or clear cuts over ≤ 50% of the reach (last 20 years) and partial or no cutting of aquatic vegetation (last 5 years), or no cutting of riparian but partial or total cutting of aquatic vegetation	2
	C - clear cuts over > 50% of the reach (last 20 years), or selective cuts and/or clear cuts of riparian vegetation ≤50% of the reach but total cutting of aquatic vegetation (last 5 years)	5
CA1	A - absence of changes in channel pattern since 1930s – 1960s	0
	B - change to a similar channel pattern to that of the 1930s – 1960s (*PC–U*) or change of channel pattern from 1930s – 1960s (*C*)	3
	C - change to a different channel pattern from that of the 1930s – 1960s (only *PC–U*)	6
CA2	A - absent or limited changes (≤15%) since 1930s – 1960s	0
	B - moderate changes (15 ÷ 35%) from that of the 1930s – 1960s (*PC–U*) or changes >15% from that of the 1930s – 1960s (*C*)	3
	C - intense changes (>35%) from that of the 1930s – 1960s (only *PC–U*)	6
CA3	A - negligible bed-level changes (≤ 0.5 m)	0
	B - limited or moderate bed-level changes (0.5 ÷ 3 m)	4
	C1 - intense bed-level changes (> 3 m)	8
	C2 – very intense bed-level changes (> 6 m) (only *PC–U*)	12

FIGURE E.5 – Indicateurs d'artificialité : description des classes et définition des scores (Partie 2/2) [65].

Annexe F

Méthologie de Wolman pour la détermination de la granulométrie

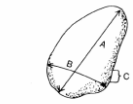
Wolman Pebble Count

Various publications describe the Wolman Pebble Count procedure. This technique requires the observer to measure sizes of random particles using a gravelometer. Particles smaller than 2 mm are placed in a category of <2mm. A step-toe procedure is frequently used to randomly select particles for quantification.

Size Class	Size Range (mm)
Sand	<2
Very Fine Gravel	2-4
Fine Gravel	4-6
Fine Gravel	6-8
Medium Gravel	8-11
Medium Gravel	11-16
Coarse Gravel	16-22
Coarse Gravel	22-32
Very Coarse Gravel	32-45
Very Coarse Gravel	45-64
Small Cobble	64-90
Medium Cobble	90-128
Large Cobble	128-180
Very Large Cobble	180-256
Small Boulder	256-512
Medium Boulder	512-1024
Large Boulder	1024-2048
Very Large Boulder	2048-4096

Wolman Pebble Count Procedure

1. Select a reach for sediment particle size distribution quantification. For stream characterization, sample pools and riffles at the same proportion the occur in the stream reach.
2. Start transect at a randomly selected point (throw a pebble) along the edge of stream. Take one step into the water perpendicular to flow and, while averting your eyes, pick up the first pebble touching your index finger next to your big toe.
3. Measure the b-axis by determining which hole the pebble fits through in the gravelometer and record in data book. For embedded pebbles or those that are too large to move, measure the shortest axis visible.
4. Take another step across the stream and repeat the previous steps until you reach the opposite side. Establish a new transect and begin the process over again. If your stream reach is relatively narrow (<2 m), you can modify the method by walking upstream in a zig-zag pattern instead of perpendicular to flow. In general, you will need to collect 100 measurements in order to accurately quantify pebble distributions.
5. After data is collected, plot data by size class ($\log_2$ scale) and frequency to determine distributions. For example the D_{50} is the particle size that 50% of the samples are equal to or smaller than.



A = LONGEST AXIS (LENGTH)
B = INTERMEDIATE AXIS (WIDTH)
C = SHORTEST AXIS (THICKNESS)

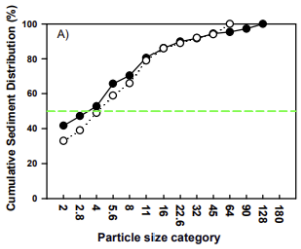


FIGURE F.1 – Description complète de la méthode de Wolman [80].

Annexe G

Méthodologie de l'OFB - Détail du diagnostic

Détermination de la classe d'évolution morphodynamique

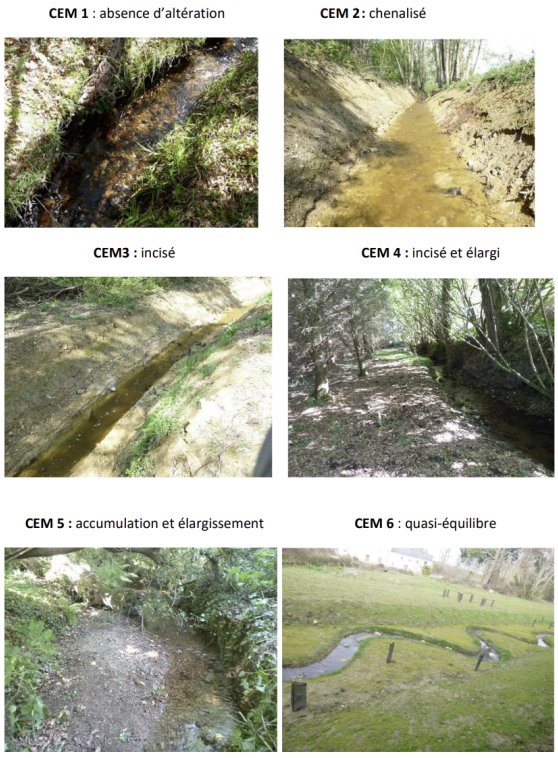


FIGURE G.1 – Classes d'évolution morphodynamiques [41].

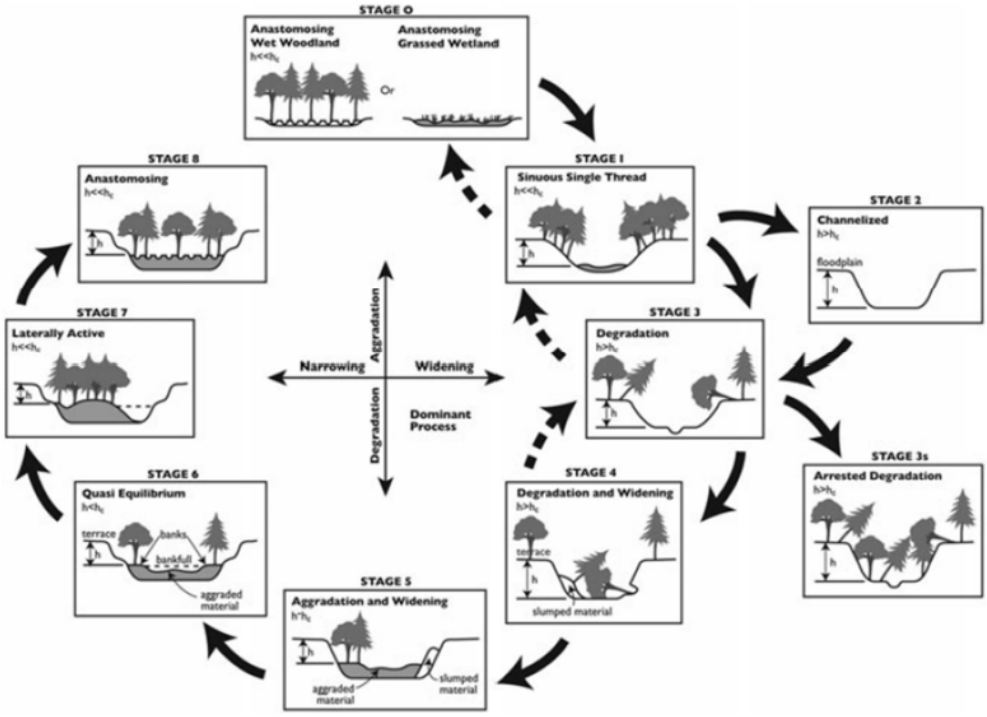


FIGURE G.2 – Classes d'évolution morphodynamiques [20].

Paramètres de la méthode de Cowan

Cette section présente le détail de la détermination des différents paramètres intervenant dans la formule de Cowan.

n_b

Matériau	*Taille (mm)*	n_b	
		min	max
Béton		0,012	0,018
Terre		0,025	0,032
Sable	1 – 2	0,026	0,035
Graviers	2 – 64	0,028	0,035
Galets	64 – 256	0,030	0,050
Blocs rocheux	> 256	0,040	0,070

Evaluation des matériaux des berges par la méthode de Cowan

Matériau	Taille	Nb
Béton	-	0,015
Terre/Argile	-	0,0285
Sable	1-2	0,0305
Graviers	2-64	0,0315
Galets	64-256	0,04
Blocs	> 256	0,55

FIGURE G.3 – Valeurs possibles pour le paramètre n_b [41].

n_1

Degré d'irrégularité	n_1		*Descriptif*
	min	max	
Parois lisses	0,000		Comparable au canal le plus lisse possible pour un matériau du lit donné
Irrégularités légères	0,001	0,005	Comparable à des canaux dragués soigneusement, dans un bon état mais avec des berges légèrement érodées ou affouillées.
Irrégularités modérés	0,006	0,010	Comparable à des canaux dragués à la rugosité modérée à conséquente et aux berges modérément dégradées ou érodées.
Irrégularités importantes	0,011	0,020	Berges de cours d'eau naturels éboulées ou sérieusement dégradées ; Parois sérieusement érodées ou éboulées de canaux de navigation ou de drainage ; surface irrégulière et non profilée de canaux creusés dans le rocher.

FIGURE G.4 – Valeurs possibles pour le paramètre n_1 [41].

n_2

Variation de la section	n_2 min	n_2 max	*Descriptif*
Progressive	0,000		La taille et la forme de la section en travers changent progressivement.
Alternant occasionnellement	0,001	0,005	Grandes sections et sections réduites alternent parfois, ou bien le courant principal se déplace d'une rive à l'autre en raison des changements de la forme de la section en travers.
Alternant fréquemment	0,010	0,015	Grandes sections et sections réduites alternent fréquemment, ou bien le courant principal se déplace d'une rive à l'autre en raison des changements de forme de la section en travers.

FIGURE G.5 – Valeurs possibles pour le paramètre n_2 [41].

n_3

Effet des obstructions	n_3 min	n_3 max	*Descriptif*
Négligeable	0,000	0,004	Quelques obstacles épars, incluant dépôts de débris, souches, racines apparentes, branchages, piles ou rochers isolés, occupant moins de 5% de la section mouillée.
Faible	0,005	0,015	Les obstacles occupent moins de 15% de la section mouillée, and l'espacement entre ceux-ci est tel que la sphère d'influence autour de l'un d'entre eux ne s'étend pas jusqu'à celle de l'obstacle suivant. De plus petits ajustements sont utilisés pour des objets arrondis et lisses que pour des objets anguleux.
Sensible	0,020	0,030	Les obstacles occupent de 15 à 50% de la section mouillée, ou bien l'espace entre ceux-ci est assez réduit pour provoquer le cumul des effets dus à différents obstacles, obstruant ainsi une partie équivalente de la section mouillée.
Très marqué	0,040	0,050	Les obstacles occupent plus de la moitié de la section mouillée, ou bien l'espace entre eux est assez réduit pour générer de la turbulence dans la quasi-totalité de la section.

FIGURE G.6 – Valeurs possibles pour le paramètre n_3 [41].

n_4

Quantité de végétation	n_4 min	n_4 max	*Descriptif*
Négligeable	0,000		N'importe quel type et densité de végétation sur les berges de cours d'eau de plus de 30 m de large, avec moins de 25% du périmètre mouillé végétalisé et sans végétation notable sur le fond. Herbe fauchée ou vesce sur les berges de cours d'eau de plus de 15 m de large (peut s'appliquer à de plus petits cours d'eau).
Faible	0,002	0,010	Surfaces denses d'herbe souple, comme le cynodon, ou plantes aquatiques poussant là où la profondeur de l'eau atteint au moins deux fois la taille de la végétation. Arbustes souples plantés, comme le saule, le peuplier, la marante ou le cèdre maritime poussant là où la profondeur de l'eau atteint au moins trois fois la hauteur de la végétation. Buissons arbustifs denses, plantes annuelles à tige souple, et éventuellement quelques arbres matures, occupant 25 à 50% du périmètre mouillé, cela en toutes saisons sur les berges de cours d'eau larges de 30 à 75 m, et durant la morte-saison sur les berges de cours d'eau de 15 à 30 m de large.
Moyenne	0,010	0,025	Gazon poussant là où la profondeur moyenne de l'eau et de une à deux fois la taille de la végétation ; plantes racinaires modérément denses, plantes aquatiques, ou arbres plantés, poussant là où la profondeur moyenne de l'eau est de deux à trois fois la hauteur de la végétation ; Végétation modérément dense, buissonnante, comparable à des saules âgés d'un à deux ans en morte-saison, ou bien hautes herbes et plantes à tige souple en haute saison, poussant le long des berges et sans végétation notable sur le fond de cours d'eau dont le rayon hydraulique est supérieur à 60 cm. Buissons arbustifs denses, plantes annuelles à tige souple, et éventuellement quelques arbres matures, occupant 25 à 50% du périmètre mouillé sur les berges de cours d'eau de 9 à 30 m de large.
Importante	0,025	0,050	Gazon poussant là où la profondeur moyenne est environ égal à la hauteur de la végétation ; saules ou peupliers âgés de 8 à 10 ans entremêlés de mauvaises herbes et de buissons (tous sans feuillage) où le rayon hydraulique est supérieur à 60 cm ; saules buissonnants âgés d'un an entremêlés de mauvaises herbes sur les berges (feuillage complet) et pas de végétation notable sur le fond de cours d'eau où le rayon hydraulique est supérieur à 60 cm.
Très importante	0,050	0,100	Gazon poussant là où la profondeur de l'eau n'excède pas la moitié de la hauteur de la végétation ; saules buissonnants d'environ un an entremêlés de mauvaises herbes ou de buissons (feuillage complet) ou roseaux denses poussant sur le fond ; arbres entremêlés de mauvaises herbes et de buissons (feuillage complet).

FIGURE G.7 – Valeurs possibles pour le paramètre n_4 [41].

m

Valeurs de m	Classes de sinuosité	Thèse de Vidal
1	Rectiligne	Faible
1,15	Sinueux à Très sinueux	Appréciable
1,30	Méandriforme	Fort

FIGURE G.8 – Valeurs possibles pour le paramètre m [41].

Annexe H

Étude de quelques cas de mesure de largeur de plein bord (Carhyce)

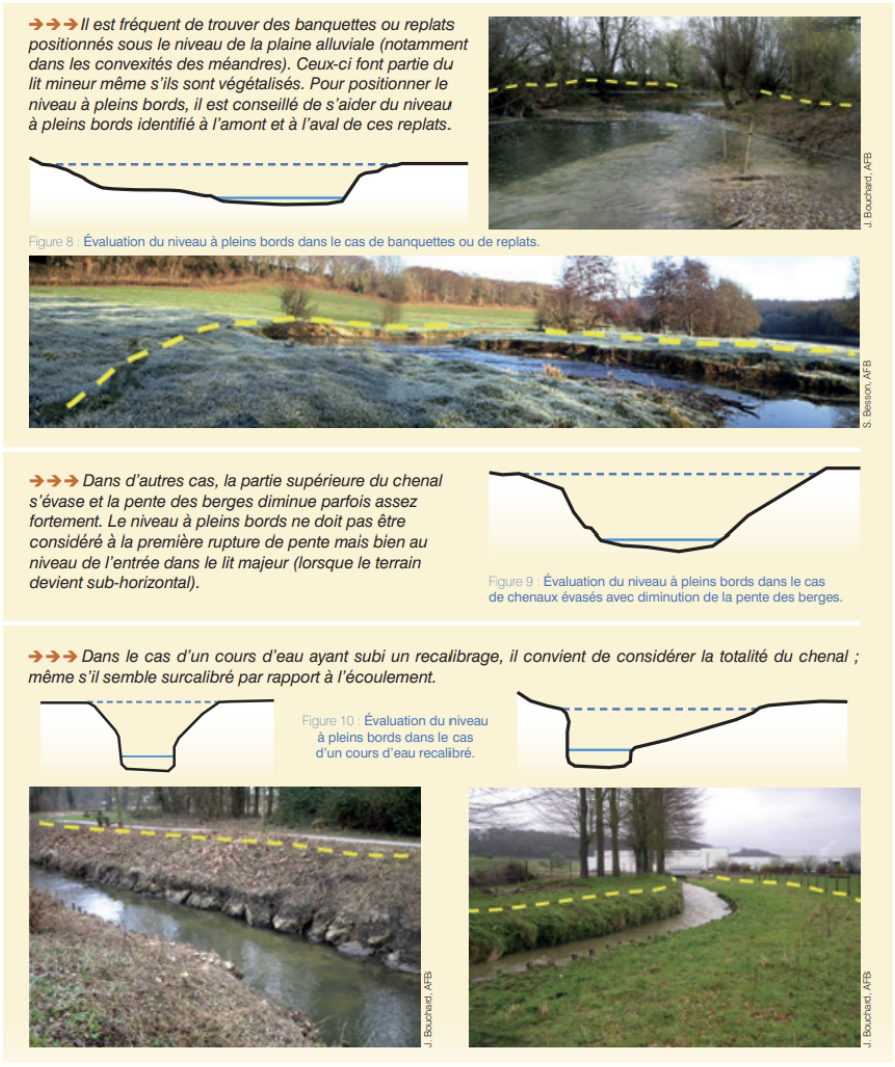


FIGURE H.1 – Exemples de mesure de largeur de plein bord in situ [4].

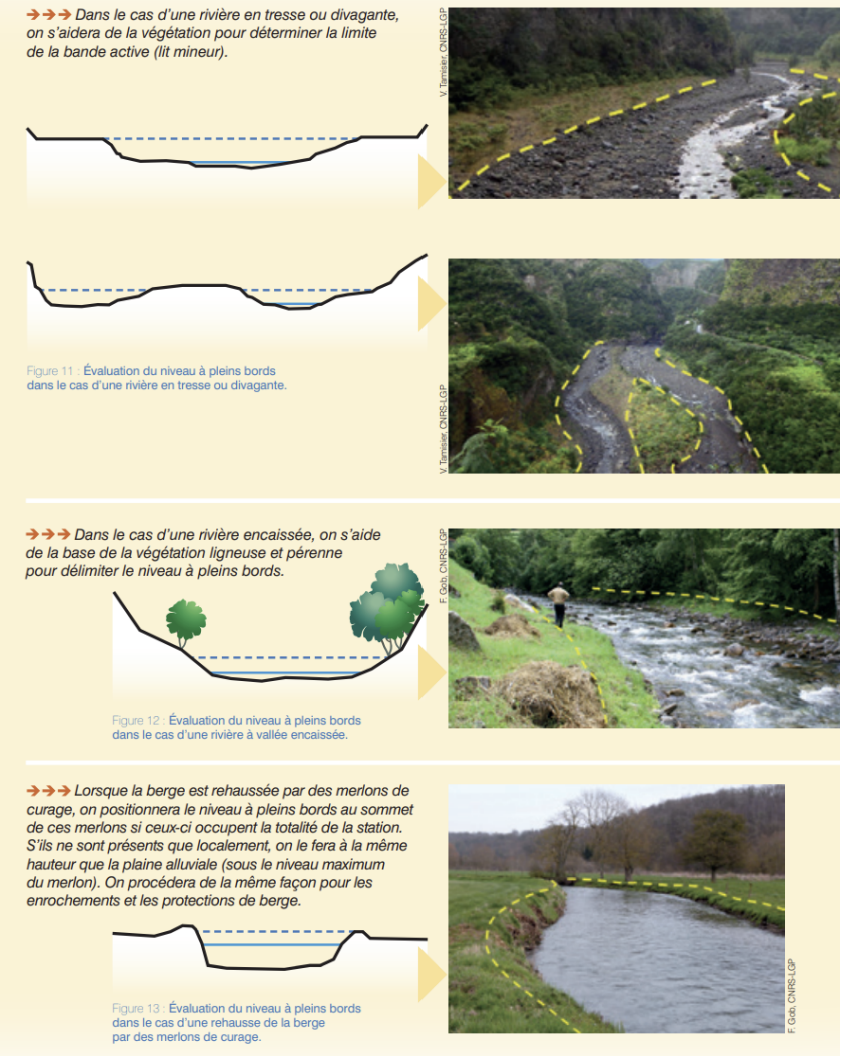


FIGURE H.2 – Exemples de mesure de largeur de plein bord in situ [4].

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain
Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/epl**