UCLouvain

epl

École polytechnique de Louvain

Développement d'une méthode de caractérisation hydromorphologique pour les petits cours d'eau wallons dans le cadre du projet Rivialis

Auteurs : **Florent Guillaume**
Promoteurs : **Sandra SOARES-FRAZÃO**
Lecteurs : **Martin PETITJEAN**, **Emmanuel DE JAEGER**
Année académique 2025–2026
Master [120] : Ingénieur civil en génie de l'énergie

Préambule

J'ai utilisé des outils d'intelligence artificielle, notamment Gemini et Claude, pour réaliser ce manuscrit.

L'IA m'a servi à créer des formats de tableaux et de *minipages* en LaTeX, à structurer mes idées lors de la rédaction et à relire les fautes d'orthographe.

Remerciements

Je voudrais dans un premier temps remercier ma promotrice, Sandra Soares-Frazão, pour sa disponibilité et ses conseils tout au long de ce mémoire.

Je tiens ensuite à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Martin Petitjean, pour ses réflexions sur mon travail qui m'ont grandement aidé.

Robin Petrossians, pour son expertise et le temps qu'il m'a accordé pendant et après notre visite de terrain.

Mes parents, Luc et Véronique, pour leur soutien inestimable, leurs relectures attentives et surtout pour m'avoir permis de faire ces six ans d'études à l'EPL.

Ma compagne, Morgane Clicque, pour ses encouragements, ses relectures et ses conseils.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ce mémoire.

Abstract

Les petits cours d'eau représentent la majorité du réseau hydrographique wallon, mais restent peu étudiés en raison du coût et du temps que requiert leur caractérisation hydromorphologique. Ce déficit compromet l'atteinte du bon état écologique imposé par la directive-cadre sur l'eau (DCE), dont le bilan en Wallonie reste préoccupant malgré plus de vingt ans d'efforts. Les solutions basées sur la nature, et notamment la renaturation des petits cours d'eau, constituent pourtant une réponse efficace aux risques d'inondation croissants liés au changement climatique.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet Rivialis, porté par un consortium associant l'UCLouvain, l'ULiège et plusieurs partenaires industriels wallons. Il vise à développer un outil de diagnostic rapide et économique des petites rivières wallonnes, fondé sur un ensemble de paramètres clés regroupés dans une carte d'identité. Leur mesure repose actuellement soit sur des campagnes de terrain coûteuses, soit sur des méthodes à distance exploitant les données publiques et la simulation numérique, chacune présentant des forces et des limites complémentaires.

Ce mémoire a pour objectif de développer une méthode mixte terrain-distance permettant de mesurer efficacement les paramètres clés définis par Rivialis. Pour ce faire, trois approches existantes sont d'abord comparées sur un cas d'étude commun, la Marchette, puis complétées par un second cas d'étude sur l'Orne. Sur la base de ces expériences, une méthode combinée est proposée à partir des enseignements tirés de ces expériences.

Table des matières

1 Contexte et objectif **1**
1.1 Introduction . . . 1
1.2 Rappel théorique . . . 2
1.2.1 Qu'est-ce que l'hydromorphologie fluviale ? . . . 2
1.2.2 Les composantes d'un cours d'eau . . . 2
1.2.3 Qu'est-ce que le plein-bord ? . . . 3
1.2.4 L'équilibre dynamique d'une rivière . . . 4
1.2.5 Les faciès d'écoulement . . . 5
1.3 Le projet Rivialis : objectifs et fonctionnement . . . 6
1.4 L'objectif de ce mémoire . . . 7

2 Matériels et méthodes : Comment sont étudiées les petites rivières ? **8**
2.1 Quels paramètres mesurer ? . . . 8
2.1.1 Mesures et calculs nécessaires . . . 9
2.2 Mesures de terrain . . . 10
2.2.1 Déroulement d'une mesure de terrain . . . 10
2.2.2 Étape 1 : la préparation . . . 11
2.2.3 Étape 2 : les mesures géométriques . . . 12
2.2.4 Étape 3 : mesures sédimentaires . . . 13
2.2.5 Étape 4 : L'étude d'un tronçon . . . 14
2.2.6 Étape 5 : Le traitement des données . . . 15
2.2.7 Technique de mesure de débit par perche transparente . . . 15
2.3 Méthodes d'étude à distance des cours d'eau par simulation et logiciel SIG . . . 16
2.3.1 Que peut-on mesurer à distance ? . . . 17
2.3.2 Étude par logiciel SIG et données publiques . . . 18
2.3.3 L'apport de la simulation numérique . . . 20
2.4 Les inconvénients d'étudier les cours d'eau à distance . . . 22
2.5 Vers une méthode mixte à distance et sur le terrain . . . 23

3 Cas d'étude sur la Marchette : application des méthodes étudiées sur une même rivière **23**
3.1 Mesures sur le terrain . . . 24
3.1.1 Contexte fluvial . . . 24
3.1.2 Mesures géométriques . . . 24
3.1.3 Mesures sédimentaires . . . 25
3.1.4 Étude du tronçon . . . 25
3.1.5 Traitement des données . . . 25
3.1.6 Carte d'identité de la Marchette selon les mesures de terrain . . . 28
3.2 Mesure à distance par logiciel SIG et des données publiques . . . 29
3.2.1 Choix du logiciel et des sources . . . 29
3.2.2 Choix d'une zone d'étude . . . 29
3.2.3 La rugosité . . . 30
3.2.4 La pente du lit . . . 30
3.2.5 La sinuosité . . . 31
3.2.6 Recherche et mesure du plein-bord . . . 31
3.2.7 Correction des mesures grâce aux stations de mesure hydrologiques du SPW . . . 32

3.2.8 Carte d'identité de la Marchette selon l'étude à distance 33
3.3 La simulation d'écoulement 34
3.3.1 Préparation de la simulation 34
3.3.2 Simulations de l'écoulement 35
3.3.3 Carte d'identité de la Marchette selon l'étude à distance par simulation . 39
3.3.4 Comment limiter l'influence de la condition aval ? 40
3.4 Tableau récapitulatif des 3 méthodes 41
3.5 Conclusion du cas d'étude 42
3.5.1 La complémentarité des méthodes plutôt que leur opposition 42
3.5.2 Le problème central : localiser le plein-bord global 42
3.5.3 Une limite structurelle du MNT :l'invisibilité du fond du lit 43

4 Cas d'étude sur l'Orne 43
4.1 Contexte fluvial 43
4.2 Comparaison entre profils de terrain et du MNT 45
4.3 Mesures de débit 46
4.3.1 Mesures par perche transparente 46
4.3.2 Débit de la station de mesure hydrométrique 47
4.3.3 Estimation du débit par hypothèse de débit uniforme 47
4.4 Comparaison des mesures de débit 48
4.5 Mesures sédimentaires : Wolman 100 48
4.5.1 Bilan du cas d'étude sur l'Orne 49

5 Proposition d'une méthode mixte terrain et à distance 49
5.1 Étape 1 : Collecte du contexte et des données publiques 50
5.2 Étape 2 : Construction du modèle simulable 50
5.3 Étape 3 : première simulation et vérification de la pertinence du modèle 50
5.4 Étape 4 : Simulation à débit croissant et identification des zones critiques 51
5.4.1 Choix des débits simulés 51
5.4.2 Identification des zones critiques 51
5.4.3 Bilan de la préparation 52
5.5 Étape 5 : Mesure de terrain ciblée et géoréférencée 52
5.5.1 Parcours initial de la rivière 52
5.5.2 L'étude in situ du tronçon simulé 52
5.5.3 Mesures géométriques géoréférencées 52
5.5.4 Mesures de débit 53
5.5.5 Mesures sédimentaires 53
5.6 Étape 6 : Traitement des données et remplissage de la carte d'identité 53
5.6.1 Correction et combinaison des profils géométriques 53
5.6.2 Estimation du débit sous le MNT 53
5.6.3 Affinement de la simulation 54
5.6.4 Calcul des paramètres de la carte d'identité 54

6 Conclusion 55

A Tableau complet des paramètres de la carte d'identité d'une petite rivière selon Petitjean et al. [22] 60

B table de l'OFB pour la méthode de Cowan 62

C Tables de valeur du coefficient de rugosité de Manning "n" proposée par Chow [4] 65

D Méthode Wolman-100 pour la détermination de la distribution des éléments du lit 65

Table des figures

1 Schéma d'un bassin versant [26] . . . 3
2 Schéma annoté d'un cours d'eau [8] . . . 3
3 La balance de Lane montrant l'équilibre dynamique entre les débits liquide Q et solide Qs [13] . . . 4
4 Alternance entre les 3 grands types de faciès d'écoulement sur une rivière naturelle [18] : l'alternance suit la séquence seuil-plat-mouille-seuil en partant de l'amont vers l'aval . . . 5
5 Rivière rectifiée avec un seul faciès : un long plat [18] . . . 6
6 Rivialis : processus de diagnostic de l'état d'un cours d'eau. Schéma fourni par Sandra Soares-Frazão à Zoé Hallard pour son mémoire [10] . . . 6
7 Déroulement d'une mesure type de terrain d'une petite rivière . . . 11
8 Positionnement des points d'inflexion sur une rivière avec méandres [1] . . . 12
9 Démonstration d'une mesure géométrique avec un mètre ruban, un niveau et une règle pliante par les étudiants de LGCIV2053 : Fluvial hydraulics. . . . 12
10 Exemple des mesures géométriques sur un profil trapézoïdal simple. . . . 13
11 Mesure de l'axe B d'un élément du lit mineur pour la méthode Wolman 100 [1] . 13
12 Exemple de la courbe de la distribution granulométrique des éléments du lit . . 14
13 Photo d'un seuil lors du parcours du tronçon choisi sur la Marchette . . . 15
14 Les différents éléments d'une perche transparente . . . 16
15 Carte des stations de mesure hydrométriques publiques en Wallonie. [20] . . . 18
16 Exemple d'une mesure de la géométrie du plein-bord local avec un logiciel SIG et un MNT. . . . 19
17 Schéma du rayon hydraulique et de l'aire mouillée sur un profil en travers. . . . 20
18 Schéma en 1D du modèle utilisé dans Watlab pour les simulations d'écoulements à surface libre de ce document [32]. . . . 21
19 Maillage de l'altitude du sol d'Hotton venant du cours LGCIV2055, établi à partir d'un modèle numérique de terrain et divisé en zones de densité variable. . 22
20 Emplacement de la Marchette en Wallonie (source WalOnMap) . . . 23
21 Carte de la zone étudiée de la Marchette . . . 24
22 Profil et résultats d'un l'exemple de mesure sur la Marchette . . . 24
23 Répartition des différents faciès d'écoulement sur le tronçon étudié de la Marchette 25
24 Exemple de seuil de la Marchette . . . 26
25 Profil le plus proche du plein-bord global mesuré sur le terrain . . . 28
26 Confluence de l'Ourgnette avec la Marchette . . . 29
27 Zone et profils étudiés à distance sur la Marchette . . . 30
28 Photo aérienne de la Marchette [3] . . . 30
29 Profil de l'altitude du talweg de la Marchette mesuré sur le MNT public et son approximation linéaire . . . 31
30 Évolution du débit de plein-bord sur les profils mesurés à distance selon l'hypothèse de débit uniforme . . . 32
31 Profils aux emplacements probables du plein-bord de la Marchette selon l'étude par logiciel SIG . . . 32
32 Zone simulée par rapport aux zones étudiées précédemment . . . 35
33 Maillage utilisé pour la simulation de la Marchette . . . 35
34 Résultat du test de la simulation de la Marchette avec un relativement petit débit d'entrée de 0,2 m^3/s . . . 36

35 Profil en travers au niveau de l'artefact au 3ème méandre de la simulation de la Marchette avec un relativement petit débit d'entrée de 0,2 m^3/s 36
36 Niveau d'eau le long du talweg selon une simulation de la Marchette avec un débit de 0,2m^3/s 37
37 Résultat de la simulation de la Marchette pour un débit de 0,9 m^3/s, les endroits où elle déborde sont entourés 38
38 Profil à l'endroit du débordement du résultat de la simulation de la Marchette pour un débit de 0,9 m^3/s 38
39 Profil à l'endroit du retrait de berge du résultat de la simulation de la Marchette pour un débit de 0,9 m^3/s 39
40 Illustration de l'impact de la condition limite "set_transmissive_boundaries" par deux simulations du même tronçon de la Marchette 41
41 Emplacement de l'Orne en Wallonie (source : WalOnMap) 43
42 Carte de la zone étudiée de l'Orne 44
43 Photo du profil 1 prise lors de la mesure de terrain sur l'Orne 45
44 Photo du profil 2 prise lors de la mesure de terrain sur l'Orne 45
45 Comparaison du profil 1 mesuré grâce au MNT public et sur le terrain 46
46 Comparaison du profil 2 mesuré grâce au MNT public et sur le terrain 46
47 Vitesse de l'écoulement mesurée le long du profil 2 sur l'Orne 47
48 Résultat de l'analyse granulométrique sur l'Orne réalisée par les étudiants du cours LGCIV2053 : Fluvial hydraulics 49
49 Évaluation du matériau des berges "nb"[15] 62
50 Évaluation du degré d'irrégularité "n1"[15] 62
51 Évaluation de la variation de section "n2" [15] 62
52 Évaluation de l'effet des obstructions "n3"[15] 63
53 Évaluation de la quantité de végétation "n4"[15] 63
55 Tables de valeur du coefficient de rugosité de Manning "n" proposée par Chow pour des rivières naturelles [4] 64
54 Évaluation de la sinusoité « m »[15] 64
56 Tables de valeur du coefficient de rugosité de Manning "n" proposée par Chow pour les plaines aluviales [4] 65
57 Description complète de la méthode de Wolman [17] 66

Liste des tableaux

1 Paramètres étudiés dans ce mémoire, tiré de l'article [22]. 9
2 Largeurs de plein-bord des seuils mesurés sur la Marchette 25
3 Valeurs des coefficients de la formule de Cowan pour le seuil de la figure 24 . . . 27
4 Débits des plein-bords locaux sur les profils mesurés sur le terrain 27
5 Paramètres de la carte d'identité de la Marchette obtenus par mesures de terrain. 28
6 Paramètres de la carte d'identité de la Marchette obtenus par logiciel SIG et données publiques. 34
7 Paramètres de la carte d'identité de la Marchette obtenus par simulation numérique (Watlab). 40
8 Tableau récapitulatif des paramètres de la carte d'identité de la Marchette selon les trois méthodes. 42
9 Comparaison des mesures de débit sur l'Orne le 20 mars 2026. 48

1 Contexte et objectif

1.1 Introduction

Au vu des événements récents, il est indéniable que le réchauffement climatique amplifie la fréquence et l'ampleur des événements hydrologiques extrêmes [5]. En effet, rien qu'en 2024, deux crues dévastatrices ont frappé l'Europe. En septembre, en Europe centrale, des pluies record ont engendré une crue, affectant plus de 2 millions de personnes et coûtant 4,2 milliards d'euros [5]. En octobre, en Espagne, une crue massive consécutive à la tempête Boris a causé plus de 200 morts et 9,7 milliards d'euros de dégâts matériels[5]. En Belgique, les événements de juillet 2021 ont tué plus de 200 personnes et fait 44 milliards d'euros de dégâts[5].

Il existe cependant des solutions pour atténuer ces problèmes. Les digues, les bassins de rétention et autres infrastructures offrent par exemple une protection localisée et adaptée, notamment pour les zones urbaines. Cependant, ces ouvrages comportent également des risques. Les digues, par exemple, constituent un excellent moyen de protection contre les crues fréquentes de faible à moyenne intensité. En revanche, leur présence engendre un faux sentiment de sécurité absolue, ce qui favorise un développement urbain intensif dans des zones, pourtant exposées au danger. Lorsqu'une crue majeure survient et que la digue est submergée ou cède, la défaillance de cette protection se manifeste de manière dramatique. Si une digue rompt, elle ne joue plus son rôle de bouclier mais devient un amplificateur de destruction : les dommages sont alors bien plus élevés que si la digue n'avait jamais existé [12].

Les solutions basées sur la nature ont le potentiel de réduire les risques pour les populations et les biens tout aussi efficacement que les infrastructures traditionnelles, tout en offrant de nombreux bénéfices supplémentaires. Elles permettent par exemple d'enrichir les habitats naturels, d'améliorer la qualité de l'eau et de l'air, ou encore de favoriser le bien-être socioculturel des communautés [28]. Un exemple de solution de ce type est la renaturation des petits cours d'eau en amont des rivières principales. En effet, une rivière en bon état dispose d'un lit naturellement façonné pour absorber les variations de débit. Elle joue ainsi un rôle tampon : ses méandres stockent l'eau en période de crue et la restituent progressivement par après, limitant ainsi l'ampleur de la crue, donc les dommages en aval. À l'inverse, un cours d'eau rectifié, aux berges artificialisées, accélère le transfert des eaux vers les cours d'eau principaux en aval, souvent proches des zones urbaines, aggravant les inondations plutôt que de les atténuer [24].

C'est notamment dans ce contexte que l'Union européenne a adopté en 2000, la directive-cadre sur l'eau (DCE), qui impose aux États membres d'atteindre un bon état écologique, chimique et morphologique de leurs masses d'eau d'ici 2027. Cette directive a conduit au développement de méthodes d'analyse et de renaturation des rivières, déployées à grande échelle depuis lors [31].

Cependant, malgré les efforts engagés dans le cadre de la DCE depuis plus de vingt ans, le bilan en Wallonie reste préoccupant. Selon le troisième plan de gestion par district hydrographique wallon (2022–2027), moins de la moitié des masses d'eau de surface atteignent le bon état écologique requis par la directive [6]. L'hydromorphologie figure parmi les causes de dégradation les plus fréquemment identifiées : des décennies de rectifications, de curages et d'endiguements ont profondément altéré le fonctionnement naturel de nombreux cours d'eau wallons, et les efforts de renaturation peinent à compenser l'ampleur des dégradations accumulées.

La restauration des cours d'eau exigée par la DCE se heurte dans la pratique à plusieurs obstacles majeurs. Le premier est d'ordre économique : caractériser l'état hydromorphologique

d'un cours d'eau (c'est-à-dire l'ensemble des caractéristiques physiques de sa forme et de son fonctionnement : géométrie du lit, pente, sinuosité, nature des sédiments), identifier ses dysfonctionnements et évaluer l'efficacité des scénarios de renaturation envisagés nécessitent des études relativement longues et coûteuses, mobilisant des experts . Ces ressources sont généralement disponibles pour les grandes rivières, sur lesquelles se concentrent la majeure partie des études et des interventions d'amélioration. Les plus petits cours d'eau (pourtant majoritaires en termes de longueurs cumulées) font l'objet de moins d'études, souvent en raison de leur coût élevé [9]. Ce déséquilibre contribue directement au fait que les objectifs de bon état fixés par la DCE restent difficiles à atteindre pour une grande partie du réseau hydrographique wallon.

C'est précisément cet obstacle que le projet Rivialis ambitionne de lever. Porté par un consortium associant l'UCLouvain, l'ULiège et plusieurs partenaires industriels wallons, il vise à concevoir une solution rapide et économique pour diagnostiquer l'état des petits cours d'eau. Au-delà du diagnostic, cet outil permettra aux acteurs locaux de simuler l'impact des aménagements envisagés. En combinant une collecte de données optimisée, des algorithmes de modélisation et l'intelligence artificielle, Rivialis s'impose comme un support d'aide à la décision performant pour l'ensemble des parties prenantes : gestionnaires communaux, bureaux d'études et associations de riverains [9].

Pour atteindre cet objectif, plusieurs briques doivent être construites. L'une d'elles, (c'est l'objet de ce mémoire), est le développement d'une méthode de mesure fiable et reproductible de l'état hydromorphologique de petits cours d'eau wallons.

1.2 Rappel théorique

Dans le cadre de ce mémoire, ce rappel théorique a pour objectif de donner au lecteur les clés de compréhension nécessaires à l'analyse hydromorphologique des cours d'eau. On introduira d'abord le vocabulaire de base et les composantes d'un cours d'eau naturel, avant de présenter les principes physiques qui gouvernent sa dynamique.

1.2.1 Qu'est-ce que l'hydromorphologie fluviale ?

L'hydromorphologie fluviale est la discipline scientifique qui étudie :

- Les processus physiques régissant le fonctionnement des cours d'eau, c'est l'aspect dynamique de la discipline, soit appelée « dynamique fluviale ».
- Les formes qui en résultent : on parle alors de « morphologie fluviale ».

Elle se situe à l'intersection de l'hydraulique, de la géomorphologie et de l'écologie fluviale, et part d'un principe fondamental : **la forme d'une rivière est le reflet de son fonctionnement**.

1.2.2 Les composantes d'un cours d'eau

Il est utile de définir, avant d'aller plus loin, les différentes parties d'un cours d'eau naturel.

Le bassin versant désigne l'ensemble de la surface où l'eau est drainée vers un même exutoire (voir figure 1).

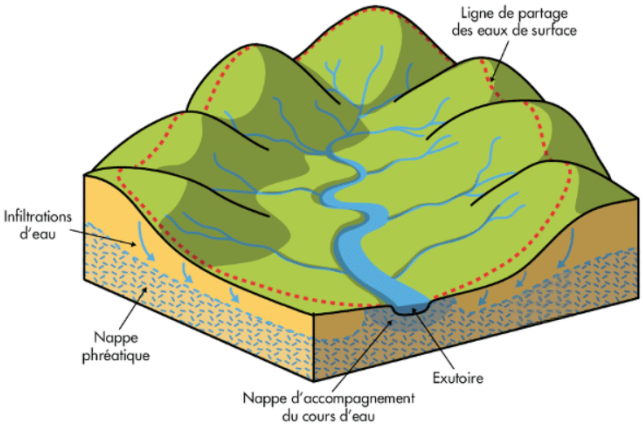


FIGURE 1 – Schéma d'un bassin versant [26]

Pour une rivière à l'intérieur d'un bassin versant, on distingue plusieurs éléments (voir figure 2) :

- Le lit mineur : la partie de la rivière occupée en permanence par l'écoulement.
- Le lit majeur : la plaine alluviale envahie lors des crues.
- Les berges délimitent latéralement le lit mineur du lit majeur.
- La ripisylve est la végétation de la berge dont le système racinaire contribue à leur stabilité.
- Le talweg désigne la ligne de plus grande profondeur du lit.
- Les sédiments sont les éléments solides du lit. Ils sont classés selon leur taille : les éléments rocheux de >5 mm , sableux de 5 à 0,5 mm , limoneux de 0,5 à 2 μm et argileux <2 μm.
- La pente du lit S_0 en m/m : l'inclinaison du cours qui lui fournit l'énergie disponible pour mettre en mouvement l'eau et les sédiments.

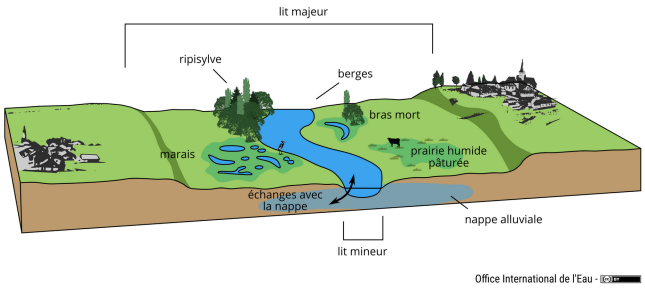


FIGURE 2 – Schéma annoté d'un cours d'eau [8]

1.2.3 Qu'est-ce que le plein-bord ?

Le débit de plein-bord Q_{pb} est défini comme étant le débit maximal que peut contenir le lit mineur avant que l'eau ne déborde dans le lit majeur[22]. C'est le débit de référence en hydromorphologie. C'est au plein-bord que sont mesurés la largeur, la profondeur et la pente du chenal, car c'est dans ces conditions que la rivière exerce sa puissance maximale sur ses berges et son fond.

Dans ce document, deux types de plein-bord sont utilisés : le plein-bord global correspondant à la définition ci-dessus et le plein-bord local, étant le débit avant le débordement pour un profil pris perpendiculairement à l'écoulement (aussi appelé un profil en travers). Le débit de plein-bord global d'une rivière est le débit de plein-bord minimum sur l'ensemble de ses profils.

Ce débit n'est pas exceptionnel. Le débit de plein-bord correspond généralement à la crue biennale, c'est-à-dire une crue qui se produit statistiquement tous les un à deux ans [18]. Une rivière naturelle déborde donc régulièrement dans sa plaine alluviale.

1.2.4 L'équilibre dynamique d'une rivière

Le fonctionnement d'une rivière repose sur deux flux que l'on appelle variables de contrôle, car ils s'imposent à la rivière depuis son environnement [18] :

- Un flux liquide d'eau, caractérisé par le débit Q, alimenté par les pluies, la fonte des glaciers, etc.
- Un flux solide de sédiments, noté Q_s, issu de l'érosion des berges, des stocks du lit mineur et des apports du bassin versant.

Le rapport entre ces deux flux est formalisé par la « balance de Lane » [14], illustrée à la figure 3. Lorsque l'énergie apportée par Q est suffisante pour transporter Q_s, la rivière est en équilibre. Si ce rapport se déséquilibre (par exemple suite à une crue ou une sécheresse prolongée), la rivière évolue : elle érode son lit quand elle a trop d'énergie, ou dépose des sédiments quand elle en manque.

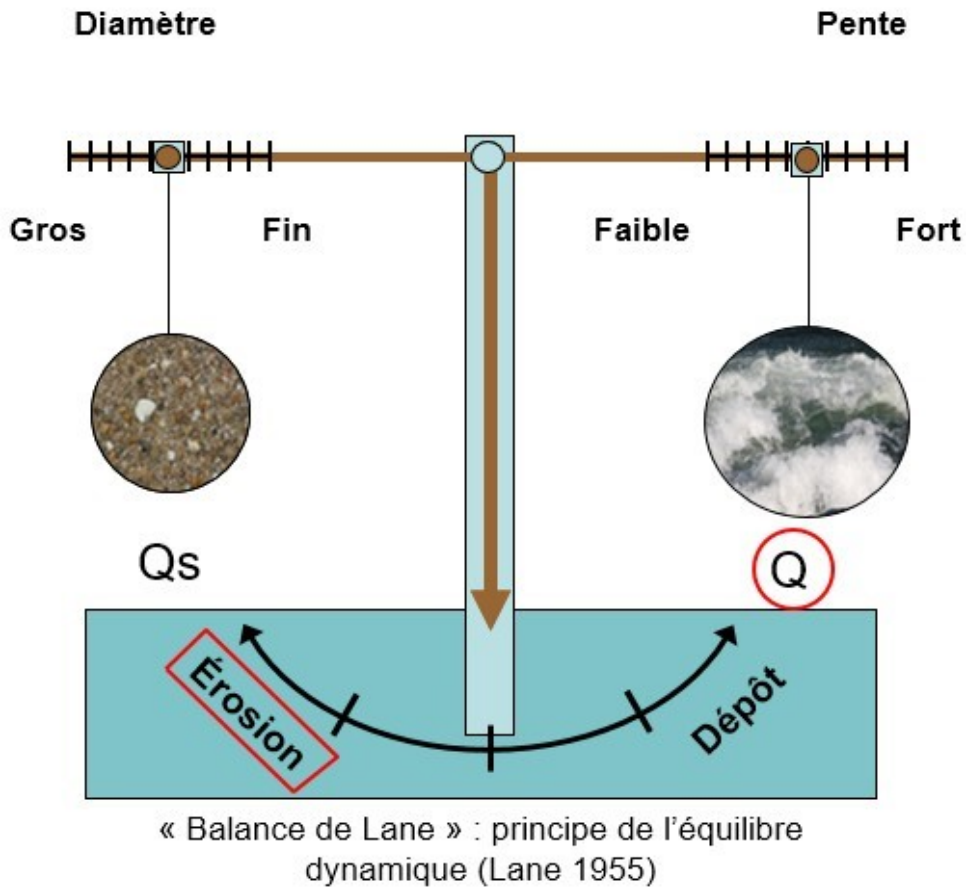


FIGURE 3 – La balance de Lane montrant l'équilibre dynamique entre les débits liquide Q et solide Qs [13]

Pour retrouver cet équilibre, la rivière ajuste ce que l'on appelle ses variables de réponse, des paramètres intrinsèques qu'elle peut faire évoluer localement [18] :

- La **largeur** : une rivière en excès d'énergie s'élargit en érodant ses berges.

- La **pente locale** : des dépôts de sédiments réduisent la pente, ce qui diminue l'énergie disponible.
- La **sinuosité** : en développant ses méandres, la rivière allonge son tracé et réduit ainsi sa pente effective.

Une rivière naturelle est donc en perpétuelle évolution, ajustant continuellement sa géométrie en réponse aux pressions de son environnement. Toute perturbation durable, qu'elle soit d'origine climatique ou anthropique, se traduit donc inévitablement par une réponse morphologique visible.

Le débit où cette dynamique est la plus forte est le débit de plein-bord car il correspond au débit avec le plus d'énergie disponible dans le lit mineur.

1.2.5 Les faciès d'écoulement

Analysé à une échelle de l'ordre de sa largeur, le lit mineur d'une rivière naturelle n'apparaît pas homogène. Il se découpe en une succession de portions aux caractéristiques hydrauliques distinctes, appelées **faciès d'écoulement** [18]. On en distingue trois types principaux :

1. Les **seuils** (ou radiers) sont des zones peu profondes à courant rapide où le fond est constitué de graviers ou galets.
2. Les **plats** sont des zones de transition à vitesse et profondeur intermédiaires.
3. Les **mouilles** sont des zones profondes à courant lent.



FIGURE 4 – Alternance entre les 3 grands types de faciès d'écoulement sur une rivière naturelle [18] : l'alternance suit la séquence seuil-plat-mouille-seuil en partant de l'amont vers l'aval

La figure 4 montre une alternance de ces trois faciès sur une rivière naturelle. Cette alternance n'est pas aléatoire, les faciès sont distribués selon la sinuosité de l'écoulement et l'équilibre dépôt/érosion local. Au niveau des méandres, l'eau arrive rapidement et ralentit en érodant la berge, creusant une mouille. À l'inverse, au point d'inflexion entre deux méandres, l'eau chargée en sédiments dissipe son énergie, créant un dépôt important : un seuil. La séquence radier–plat–mouille est donc la traduction morphologique de l'équilibre dynamique décrit par Lane [14] : chaque faciès correspond à un état local du rapport entre énergie disponible et charge sédimentaire.

Une rivière naturelle possède ainsi une diversité de faciès qui est le reflet direct de sa bonne santé hydromorphologique. À l'inverse, la figure 5 montre un cours d'eau rectifié qui a perdu cette alternance et n'a maintenant qu'un faciès unique (généralement un plat homogène), appauvrissant à la fois sa dynamique sédimentaire et ses écosystèmes. C'est pourquoi la présence et la diversité des faciès constituent un indicateur clé de l'état d'un cours d'eau dans les diagnostics hydromorphologiques [18].



FIGURE 5 – Rivière rectifiée avec un seul faciès : un long plat [18]

1.3 Le projet Rivialis : objectifs et fonctionnement

Le projet Rivialis ambitionne de simplifier et d'accélérer la restauration des petits cours d'eau en mettant au point un outil d'aide à la décision capable de fournir un diagnostic fiable, rapide et économique.

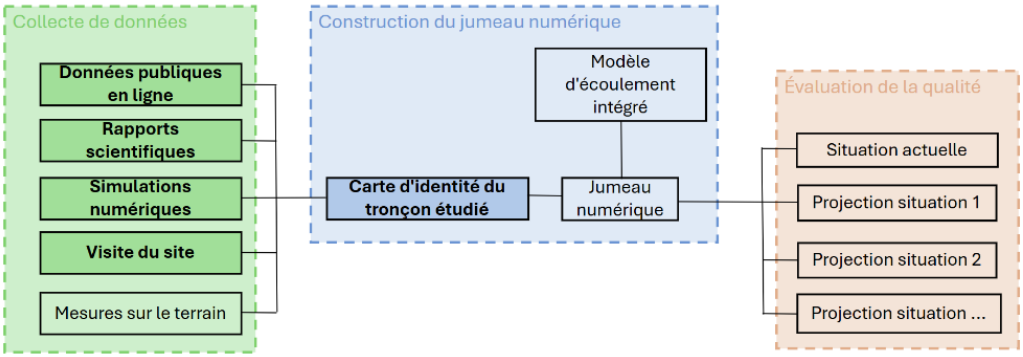


FIGURE 6 – Rivialis : processus de diagnostic de l'état d'un cours d'eau. Schéma fourni par Sandra Soares-Frazão à Zoé Hallard pour son mémoire [10]

Comme l'illustre la figure 6, le processus de diagnostic se déploie en trois phases complémentaires :

- La collecte de données : elle permet de dresser la « carte d'identité » du tronçon étudié.
- La création d'un jumeau numérique : en couplant les données du tronçon à un modèle d'écoulement, on génère une réplique virtuelle qui reproduit le comportement réel du cours d'eau. Ce double sert de support pour évaluer l'état actuel et simuler divers scénarios de restauration.
- L'évaluation hydromorphologique : l'impact des différents aménagements envisagés est mesuré et comparé de manière quantitative grâce à un indicateur spécifique : l'Indice Petit Cours d'Eau (IPCE).

Pour garantir la rapidité et le faible coût de la démarche, Rivialis s'appuie prioritairement sur des données existantes (plateformes en ligne, littérature scientifique, simulations). Les campagnes de mesures sur le terrain sont ainsi rationalisées : elles ne sont déployées que pour valider les modèles numériques ou pallier un manque d'informations.

Bien que les phases initiales du projet aient permis d'établir les paramètres essentiels à la caractérisation des cours d'eau wallons et de confirmer l'intérêt de coupler données publiques et simulations, elles ont mis en lumière une limite importante : aucune méthode de mesure actuelle ne permet d'acquérir l'ensemble de ces indicateurs de façon rapide, fiable et reproductible[22, 10]. L'objectif de ce mémoire est précisément de proposer une méthodologie adaptée.

1.4 L'objectif de ce mémoire

Ce mémoire a pour objectif de répondre à la question suivante : *Comment mesurer efficacement les paramètres hydromorphologiques d'un petit cours d'eau wallon ?*

Pour y répondre, trois approches existantes sont d'abord étudiées et appliquées sur un même cas d'étude :

— Les mesures de terrain, telles que pratiquées par le professionnel Robin Petrossians lors d'une démonstration sur la Marchette [23].
— L'étude à distance par logiciel SIG et données publiques, développée notamment par Zoé Hallard dans son mémoire [10].
— La simulation numérique d'écoulement à l'aide du logiciel Watlab, déjà étudiée dans le cadre de Rivialis par Petitjean et al. [22].

Ce cas d'étude permettra d'illustrer les avantages et les inconvénients de chacune de ces méthodes et de mettre en lumière leur complémentarité. Un second cas d'étude sur l'Orne, réalisé dans le cadre du cours LGCIV2053, complétera cette analyse en testant d'autres instruments et techniques. Finalement, une méthode d'étude adaptée aux petits cours d'eau wallons sera proposée. Elle a vocation à servir de base à l'élaboration du protocole de collecte de données que choisira le projet Rivialis pour alimenter son outil de diagnostic. Elle doit donc être réalisable par des non-experts , rapide et économique.

2 Matériels et méthodes : Comment sont étudiées les petites rivières ?

Le chapitre précédent a montré que les petites rivières sont assez peu étudiées, notamment à cause de leur grand nombre, du manque d'investissement et de leur importance économique mineure par rapport aux plus grandes rivières et fleuves souvent plus proches des zones urbaines et présentant un plus grand intérêt économique. Pourtant, ces petits cours d'eau jouent un grand rôle écologique et sont critiques dans la gestion des crues et des étiages.

Ce chapitre a pour objectif d'introduire les concepts nécessaires à l'étude d'une petite rivière. Pour commencer, les paramètres à mesurer pour une étude exhaustive sont exposés. Ensuite, nous détaillerons différentes méthodes de mesure soit *in situ* grâce à des instruments de mesure et des observations, soit à distance en utilisant des données publiques et des simulations numériques.

2.1 Quels paramètres mesurer ?

Le tableau 1 reprend les paramètres hydromorphologiques et de dynamique fluviale et sédimentaire de la carte d'identité des petites rivières wallonnes [22].

Cette carte d'identité contient les paramètres permettant de caractériser une petite rivière wallonne. Elle vient d'une analyse critique d'indices de qualité et de métriques déjà utilisés pour étudier les petits cours d'eau [10, 22]. Ce qui a permis d'extraire une liste exhaustive des paramètres pertinents pour évaluer l'état de n'importe quel cours d'eau. Ensuite, seuls les paramètres adaptés aux petites rivières ont été retenus (excluant par exemple des critères comme le trafic fluvial, non applicables à ces milieux).

L'objectif de ce document étant la création d'une méthode de mesure de l'état hydromorphologique de petites rivières wallonnes. Le tableau 1 reprend uniquement les paramètres pertinents pour cette analyse, c'est-à-dire les catégories "*Morphologie fluviale*" et "*Dynamique fluviale et sédimentaire*". Les catégories (« Zone riveraine », « Bassin versant », « Biologie » et « Divers ») ont été exclues, car elles sont mesurées selon des méthodes assez différentes de celles étudiées dans cette étude. La carte d'identité exhaustive telle que présentée par Petitjean et al. [22] se trouve à l'annexe A.

Catégorie	Paramètre	Unités et symbole
Morphologie fluviale	Niveau plein-bord	z_b (m)
	Largeur plein-bord	l_b (m)
	Hauteur plein-bord	h_b (m)
	Ratio largeur-hauteur	l_b/h_b (-)
	Aire au plein-bord	A_b (m^2)
	Pente du lit	S_0 (-)
	Longueur du tronçon	L_r (m)
	Sinuosité	SI (-)
Dynamique fluviale et sédimentaire	Débit plein-bord	Q_b (m^3/s)
	Puissance de l'écoulement	Ω_b (W)
	Pente de la surface de l'eau	S_w (-)
	Vitesse moyenne	V_w (m/s)
	Hauteur moyenne	h_m (m)
	Distribution des éléments du lit	
	Écart type des éléments du lit	
	Coefficient de Manning	n ($sm^{-1/3}$)
	faciès d'écoulement	(-)

TABLE 1 – Paramètres étudiés dans ce mémoire, tiré de l'article [22].

2.1.1 Mesures et calculs nécessaires

Les paramètres du tableau 1 ne sont pas tous obtenus de la même manière : certains doivent être mesurés, tandis que d'autres peuvent être calculés en combinant des paramètres déjà mesurés.

Paramètres calculés à partir d'autres mesures

Parmi les paramètres morphologiques, seul le ratio largeur-hauteur lb/hb n'a pas besoin d'être mesuré directement : il se calcule comme le rapport de la largeur lb et de la hauteur hb au plein-bord l_b/h_b, elles-mêmes relevées lors d'une mesure de la géométrie du plein-bord global.

Dans la même logique, la puissance de l'écoulement Ω_b est calculée à partir du débit de plein-bord Q_b et de la pente du lit S_0 selon la relation suivante :

$$\Omega = S_0 \rho g Q \qquad [W/m] \tag{1}$$

où g est le poids volumique de l'eau (9810 N/m^3), Q est le débit liquide en m^3/s et S_0 la pente du lit en m/m. Ces deux paramètres ne sont donc pas mesurés indépendamment, mais ils sont le résultat direct d'autres paramètres.

Paramètres quantitatifs et qualitatifs

La majorité des paramètres du tableau 1 sont quantitatifs : ils sont exprimés sous forme numérique (en m, m^3/s, etc.) et peuvent être comparés directement entre différents cours d'eau. C'est le cas de l'ensemble des paramètres géométriques et hydrauliques.

Le paramètre faciès d'écoulement fait exception car il est de nature qualitative. L'identification de ces faciès repose sur l'observation de la vitesse, de la turbulence et de la profondeur de l'écoulement. Son résultat est une description qualitative de la succession des zones (seuils, plats, mouilles) le long du tronçon étudié.

Pour la distribution des éléments du lit , il n'est pas non plus évident de donner une valeur numérique à la distribution entière, mais cette distribution peut être caractérisée à partir de

ses percentiles et de son écart type. En général, le 50^e (le D50) et le 90^e (le D90) percentiles sont utilisés. [22].

2.2 Mesures de terrain

La méthode décrite dans cette section suit le déroulement des mesures de terrain réalisées par Robin Petrossians [23] à l'occasion d'une démonstration sur la Marchette en octobre 2026. Cette méthode est celle utilisée actuellement dans le projet Rivialis. Elle a été utilisée notamment pour créer la carte d'identité exhaustive des petites rivières wallonnes de Petitjean et al. [22] . La mesure de terrain est la technique principale pour étudier les rivières. Il existe donc une certaine quantité de documents présentant des méthodes de mesure assez similaires. Pour illustrer ces méthodes, des images sont tirées de deux documents produits par le gouvernement français, notamment : "Éléments d'hydromorphologie fluviale" de Bravard et Malavoi et le protocole "Carhyce" de l'Agence française de la biodiversité, [1, 18]. Les méthodes présentées y sont assez similaires à celles démontrées par Robin.

2.2.1 Déroulement d'une mesure de terrain

Le schéma à la figure 7 résume le déroulement d'une mesure type de terrain, organisé en cinq étapes successives. La première étape consiste en une préparation préliminaire à la mesure afin de mieux comprendre la zone à mesurer.
Pendant la mesure, l'étude de la rivière est réalisée sur place et se divise en trois étapes :

- Le choix et la mesure de la géométrie de ≈ 5 seuils dans la zone étudiée.
- La mesure d'une centaine de galets pris au hasard dans le lit (Wolman Pebble Count).
- Le choix et l'étude d'un tronçon représentatif de la rivière.

La dernière phase consiste à traiter les données mesurées pour avoir les paramètres de la rivière.

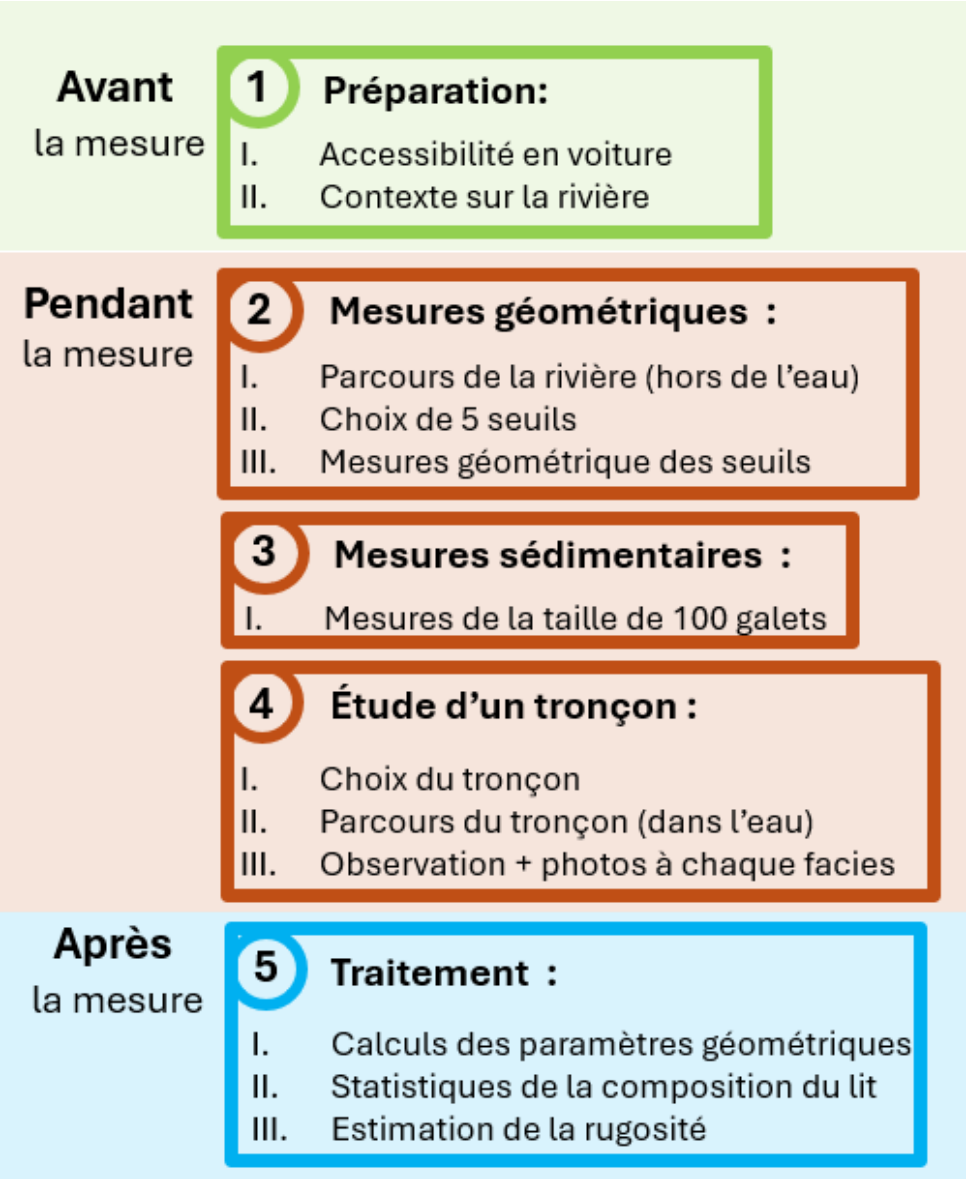


FIGURE 7 – Déroulement d'une mesure type de terrain d'une petite rivière

2.2.2 Étape 1 : la préparation

La préparation des mesures de terrain est assez simple.
Il faut tout d'abord identifier les points d'accès à la rivière en voiture.
Ensuite, la préparation consiste en une recherche sur le contexte général de la rivière : la position des stations de mesure du SPW les plus proches, la taille du bassin versant au niveau du site étudié et la zone géologique.

Pour achever cette préparation, les fiches de masse d'eau de surface sont très utiles. Publiées par la Région wallonne dans le cadre de la directive-cadre sur l'eau, une masse d'eau est définie comme une unité homogène, qu'elle soit de surface (rivières, lacs) ou souterraine [30]. Ces fiches constituent un bon point de départ pour comprendre rapidement le contexte général de la rivière étudiée. Elles contiennent notamment les informations générales englobant l'ensemble de la zone concernée. Par exemple, le nom des cours d'eau associés à la masse d'eau, les communes concernées, leur état de conservation et même la pente moyenne des cours d'eau.

2.2.3 Étape 2 : les mesures géométriques

Une fois sur site, la première action consiste à parcourir la rivière. L'objectif est de trouver les endroits accessibles pour descendre dans l'eau ainsi que d'observer globalement la rivière.
Ces observations permettent aussi de choisir environ 5 seuils représentatifs du cours d'eau et faciles à mesurer. Sur chacun de ces 5 seuils, on relève la géométrie au plein-bord local et au niveau d'eau observé.
Le choix des seuils comme zone de mesure n'est pas anodin. En effet, les seuils se forment généralement au niveau des points d'inflexion des méandres (voir figure 8), là où le lit de la rivière est le plus étroit et le moins profond. Étudier la rivière à ces endroits permet non seulement de limiter les risques liés à la sécurité lors des relevés, mais aussi d'éviter les "surlargeurs", fréquemment observés au cœur des méandres.

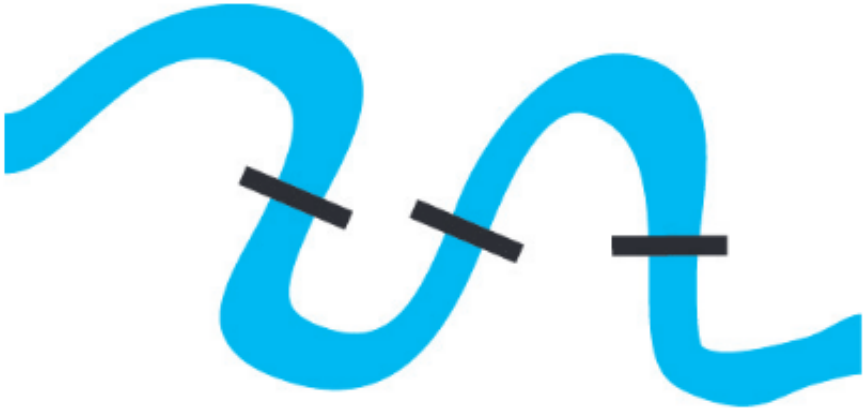


FIGURE 8 – Positionnement des points d'inflexion sur une rivière avec méandres [1]

La figure 9 illustre le matériel nécessaire : un mètre ruban, un niveau et une règle pliante suffisent.



FIGURE 9 – Démonstration d'une mesure géométrique avec un mètre ruban, un niveau et une règle pliante par les étudiants de LGCIV2053 : Fluvial hydraulics.

Le mètre ruban est placé en travers de la rivière perpendiculairement à l'axe d'écoulement et au niveau de son plein-bord local. Sur le terrain, il se trouve au niveau du sommet de la berge la plus basse (voir figure 10).

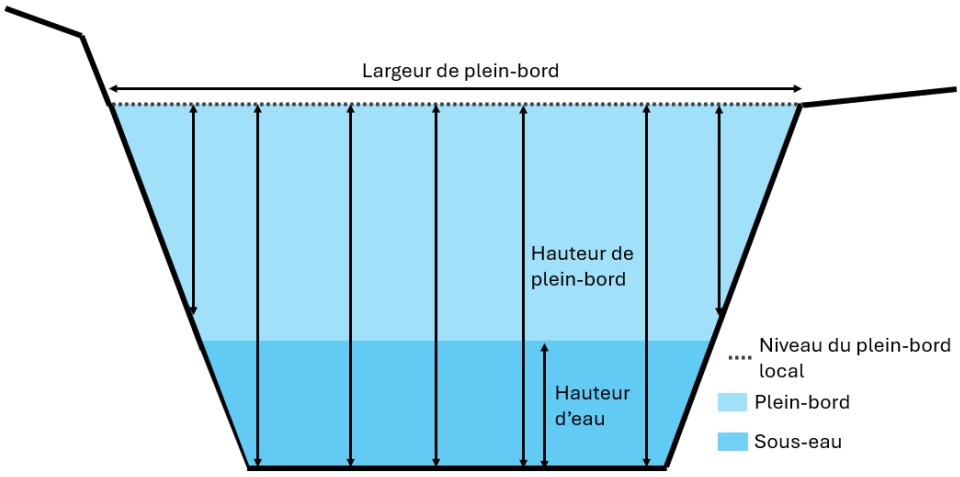


FIGURE 10 – Exemple des mesures géométriques sur un profil trapézoïdal simple.

Ensuite, le mètre ruban sert de niveau à partir duquel on mesure la hauteur du plein-bord local (entre le mètre et le lit) ainsi que la hauteur d'eau (entre le lit et le niveau d'eau). Généralement, cette mesure est répétée 6 à 7 fois le long du mètre ruban.

2.2.4 Étape 3 : mesures sédimentaires

Le lit d'un cours d'eau est constitué d'éléments de différentes tailles allant de gros blocs rocheux aux sédiments microscopiques qui composent l'argile. En hydromorphologie, connaître la composition des sédiments du lit est particulièrement importante, cela peut permettre d'en déduire des paramètres cruciaux comme la rugosité, c'est aussi un indicateur de l'état hydromorphologique de la rivière.

La méthode Wolman 100 permet de déterminer efficacement la composition des éléments du lit. Elle consiste à prélever une centaine d'éléments aléatoirement dans le lit d'un seuil. Ensuite, chaque galet est mesuré selon son axe B (c'est-à-dire la largeur, perpendiculaire à la plus grande longueur) grâce à un pied à coulisse, par exemple (voir la figure 57). La méthode est décrite à l'annexe D.

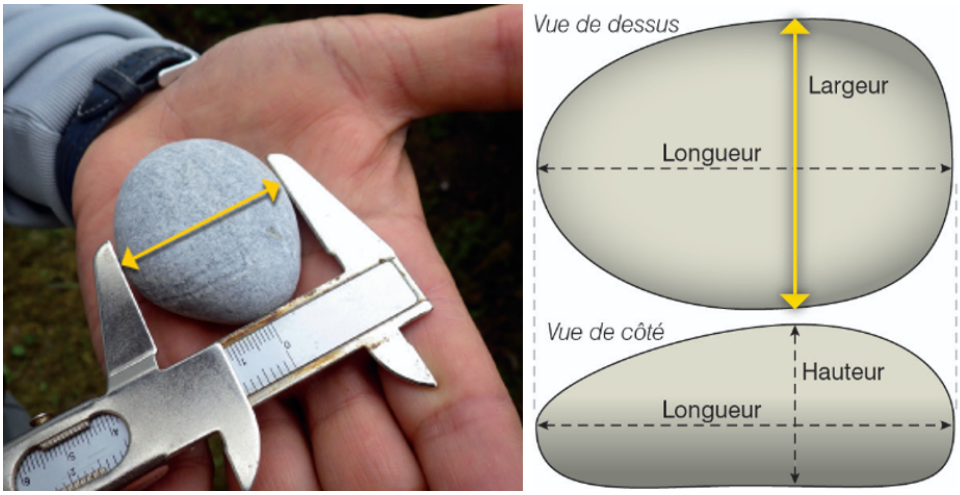


FIGURE 11 – Mesure de l'axe B d'un élément du lit mineur pour la méthode Wolman 100 [1]

Le résultat de cette mesure est une courbe de la distribution des éléments du lit triés selon leur taille (voir figure 12). Les différents percentiles sont récupérés à partir de cette courbe : le D50

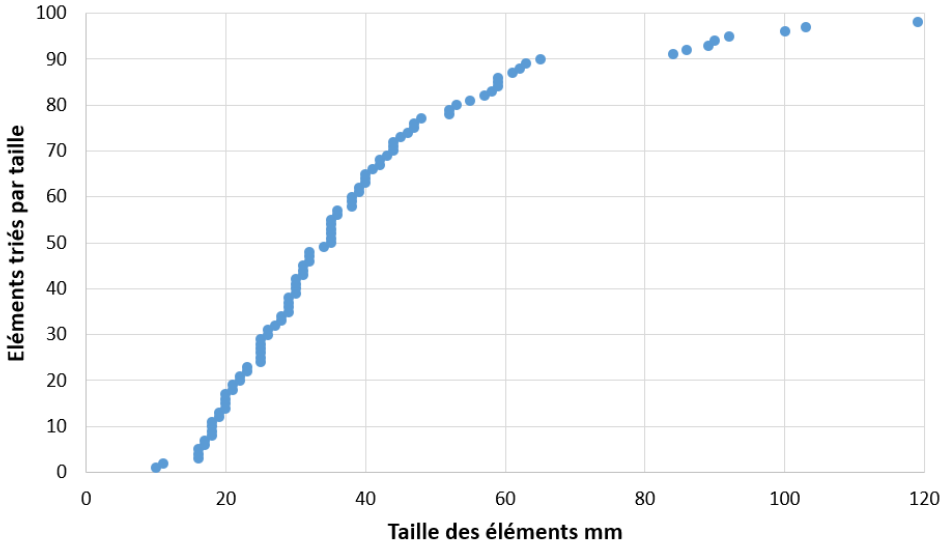


FIGURE 12 – Exemple de la courbe de la distribution granulométrique des éléments du lit

est la taille du 50ème élément de cette courbe.

L'écart type de la distribution σ_G est défini comme : $\sqrt{\frac{D84}{D16}}$.

Une valeur de la rugosité n du fond du lit peut aussi être estimée grâce à la relation :$n = \frac{D90^{1/6}}{26}$.

2.2.5 Étape 4 : L'étude d'un tronçon

La dernière mesure de cette méthode est l'étude d'un tronçon représentatif de la rivière. Grâce aux mesures précédentes, l'opérateur a une idée plutôt claire de ce à quoi ressemble le cours d'eau. Il faut alors choisir un tronçon long de 14 fois la moyenne des largeurs de plein-bord mesurées à l'étape 2. Cette longueur permet normalement au tronçon d'être plus long que la longueur d'onde des méandres (estimée à dix fois la largeur au plein-bord global [16]).
Ensuite, il va parcourir ce tronçon sur toute sa longueur pour noter chaque faciès d'écoulement, les habitats, la quantité de végétation et prendre des photos (voir la figure 23). Les faciès d'écoulement sont des zones d'eau reconnaissables par leur vitesse, leur turbulence et leur profondeur. Par exemple, une mouille est profonde et lente, alors qu'un seuil est rapide et peu profond.
Le choix du tronçon est primordial, car il définit la zone à étudier par la suite. Il doit donc être le plus représentatif possible et être facile à prospecter. Les coordonnées amont et aval sont prises afin de permettre de retrouver le tronçon pour d'éventuelles futures mesures.



FIGURE 13 – Photo d'un seuil lors du parcours du tronçon choisi sur la Marchette

2.2.6 Étape 5 : Le traitement des données

Une fois la visite de terrain terminée, les données brutes collectées ne correspondent pas encore directement aux paramètres de la carte d'identité du tableau 1. Une étape de traitement par ordinateur est nécessaire pour les calculer.

Ce traitement repose sur deux types d'opérations. D'une part, des calculs géométriques permettent de déduire, à partir des relevés bruts de chaque profil, les paramètres morphologiques : largeur et hauteur au plein-bord, aire mouillée, ratio largeur-hauteur. D'autre part, des calculs hydrauliques permettent d'estimer le débit au plein-bord à partir de la géométrie, de la pente et de la rugosité. La puissance de l'écoulement en découle directement via l'équation 1.

Enfin, les données sédimentaires issues du Wolman 100 sont traitées statistiquement pour obtenir la distribution granulométrique du lit (D50, D90) et son écart type σ_G. La manière dont ce traitement est appliqué concrètement est illustrée dans les cas d'étude aux sections suivantes.

2.2.7 Technique de mesure de débit par perche transparente

La méthode d'étude d'une rivière sur le terrain présentée précédemment ne mesure pas le débit de la rivière. Dans ce document, un instrument de mesure de débit est proposé. Cette section a pour objectif de le décrire.

La perche transparente est un instrument à faible coût développé par Pike et al. [25] permettant de mesurer la vitesse d'écoulement et d'en déduire le débit. Son principe repose sur la mesure de la différence de niveau d'eau amont/aval Δh de part et d'autre de la perche, qui augmente avec la vitesse de l'écoulement selon la relation d'étalonnage :

$$V = 0,641 \cdot \sqrt{2g\Delta h} \text{ - } 0,019 \tag{2}$$

La perche est constituée d'une règle transparente graduée d'environ 1,50 m assez large (environ la largeur d'une main). Au centre de cette règle, se trouvent deux marqueurs de niveau qu'il est possible d'ajuster le long de la règle (voir figure 14).

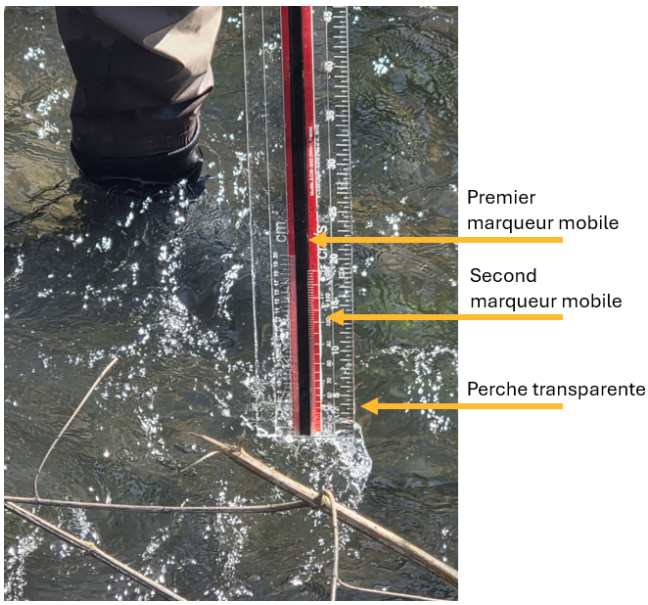


FIGURE 14 – Les différents éléments d'une perche transparente

La mesure se déroule en deux temps. D'abord, la perche est placée verticalement dans l'eau, perpendiculairement à l'écoulement. On y lit sa profondeur et on règle les deux marqueurs : un selon le niveau de l'eau en aval et un autre selon le niveau de l'eau en amont. Ensuite, la perche est retirée de l'eau et tenue horizontalement pour lire Δh entre les deux marqueurs.

Cette opération est répétée sur plusieurs verticales réparties en travers de la rivière, en resserrant les mesures là où la profondeur et la vitesse varient le plus. Le débit total est ensuite calculé par intégration des vitesses et des profondeurs sur la section.

L'instrument a des limites pratiques : il fonctionne uniquement pour des profondeurs de 5 à 75 cm, des charges de 2 à 100 mm, et des vitesses de 10 à 90 cm/s. L'incertitude typique sur le débit est de $\approx 10\%$.

Cette mesure peut être prise juste après celle de la géométrie d'un profil en travers, car elle demande la même préparation : un mètre ruban en travers.

2.3 Méthodes d'étude à distance des cours d'eau par simulation et logiciel SIG

Il existe une autre manière d'étudier un petit cours d'eau : l'étude à distance. Le principe est d'utiliser les ressources disponibles en ligne pour estimer les différents paramètres d'une rivière. L'avantage principal est qu'il n'y a pas de déplacement nécessaire. Il est donc possible d'étudier beaucoup plus de rivières en une journée qu'avec des mesures de terrain classiques.

Cette section présente deux types de méthodes d'étude à distance :

- La première est proposée par Zoé Hallard dans son mémoire : *"Développement d'un indice de qualité pour les projets de renaturation des petits cours d'eau"* [10]. Elle adapte une méthode de terrain existante créée par l'OFB (Office français de la biodiversité)[15], en une méthode entièrement à distance, utilisant les données publiques et les logiciels SIG (QGIS).
- La deuxième vient de l'article "Identification of Key Metrics for Quality Assessment of Small-River Restoration Projects from Publicly Available Sources and Field Data in

Wallonia"[22]. Cette méthode utilise notamment les simulations numériques d'écoulement pour étudier la rivière. C'est une technique innovante encore peu utilisée pour l'étude des rivières naturelles.

2.3.1 Que peut-on mesurer à distance ?

Les méthodes à distance utilisent des données publiques pour étudier la rivière. En Wallonie, il existe une grande quantité de données publiques facilement accessibles en ligne, permettant d'étudier quasiment tous les paramètres présentés à la section 2.1. Seuls les paramètres sédimentaires comme la granulométrie ne peuvent être étudiés que sur le terrain[22].

Géoportail de la Wallonie

La principale source de données est le **Géoportail de la Wallonie** [3]. C'est la porte d'entrée officielle pour accéder aux bases de données géographiques (cartes, plans, photos aériennes) de la Région wallonne. C'est une plateforme numérique qui superpose différentes couches d'informations géographiques sur le territoire wallon.

Ce site s'inscrit dans le cadre du projet INSPIRE de l'Union européenne, dont l'objectif est d'inciter chaque État membre à mettre en ligne des informations géographiques libres, complètes et pertinentes [11].

Il est notamment possible d'y trouver les relevés cadastraux, l'occupation des sols, des photos aériennes, les zones à risque d'inondation et plus encore. Ces données constituent une ressource gratuite et exhaustive, couvrant l'ensemble du territoire wallon. Il faut cependant tenir compte du fait que chaque jeu de données présente une précision temporelle et spatiale variable.

Le modèle numérique de terrain (MNT)

Le SPW a réalisé une mesure de l'altitude du sol sur tout le territoire wallon sur la période du 19 février 2021 au 05 mars 2022. Cette mesure est stockée sous forme d'un modèle numérique de terrain (MNT) disponible sur demande sur le Géoportail de la Wallonie. L'altitude moyenne du sol tous les 50 cm y est enregistrée avec une précision verticale de 12 cm [27].
C'est l'une des données du Géoportail les plus utiles pour les analyses de ce document. Il permet notamment l'analyse des paramètres relatifs à la forme du lit mineur et du lit majeur.

L'hydrométrie en Wallonie

Pour les paramètres liés à la dynamique fluviale, il est aussi utile de prendre en compte le réseau de mesure hydrométrique public wallon.
En effet, il existe environ 400 stations de mesure sur tout le territoire wallon [20]. Leur position est reprise aux points bleus sur la carte de la figure 15.

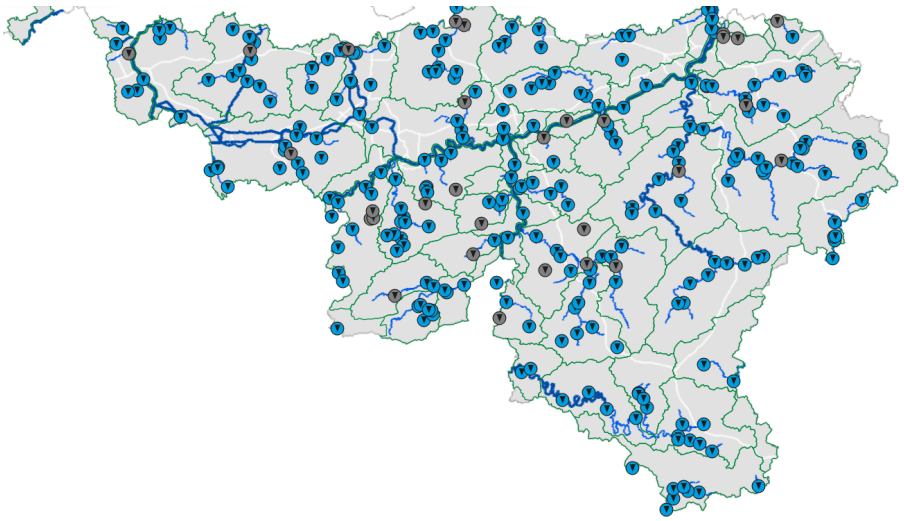


FIGURE 15 – Carte des stations de mesure hydrométriques publiques en Wallonie. [20]

Ces stations enregistrent le débit et le niveau d'eau en temps réel (toutes les une à vingt minutes selon la station). Leurs données sont stockées et en libre accès sur le site **L'hydrométrie en Wallonie** [20]. Ces mesures permettent une analyse en temps réel ainsi que le calcul de statistiques de l'écoulement.
Leurs mesures sont pertinentes surtout pour les cours d'eau qui se trouvent à proximité immédiate des stations. Malheureusement, elles sont peu nombreuses par rapport aux cours d'eau wallons. La présence d'une station proche de la zone d'étude permettra donc une analyse à distance plus poussée, mais elle ne peut pas dépendre de ces données. L'incertitude de leurs mesures est aussi à prendre en compte que ce soit pour les mesures de hauteurs ou les calculs de débits [7].

2.3.2 Étude par logiciel SIG et données publiques

Pour réaliser avec un ordinateur les mesures qu'un opérateur fait sur le terrain, Zoé Hallard utilise QGIS, un logiciel à Système d'Information Géographique (SIG) [10]. En effet, les ressources du Géoportail de la Wallonie sont exploitables par les logiciels SIG. Elles sont sous forme de couches thématiques, comparables à des calques transparents à superposer sur un fond de carte du territoire wallon.
Les logiciels SIG permettent de faire des mesures et de comparer ces couches thématiques.

Exemple de mesure par SIG
Avec un MNT par exemple, il est possible d'extraire une courbe de l'altitude au travers de la rivière et ainsi de mesurer la géométrie du plein-bord local de la même manière que le ferait un opérateur sur le terrain (voir figure 16). La mesure est même plus précise, car la résolution du MNT wallon est de 50 cm, ce qui donne une dizaine de mesures sur ce profil au lieu de 6 à 7 mesures par profil pour les mesures de terrain. Vu la rapidité du processus, il est possible de mesurer plus de profils que sur le terrain.

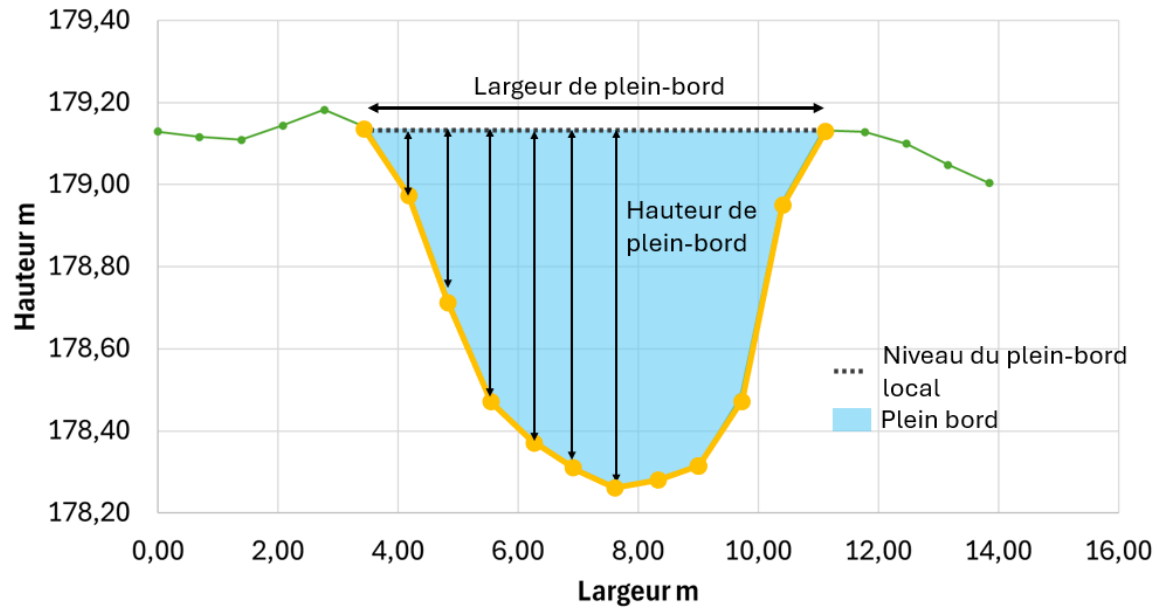


FIGURE 16 – Exemple d'une mesure de la géométrie du plein-bord local avec un logiciel SIG et un MNT.

Pour le reste des mesures morphologiques, il est par exemple possible de prendre un profil en long de l'altitude du lit mineur de la rivière. La pente de ce profil en long correspond à la pente du cours d'eau. Cette mesure est beaucoup plus simple que de mesurer l'altitude de la rivière en plusieurs points sur le terrain.

Le coefficient de rugosité de Manning n :

Il est possible à distance d'estimer la rugosité du cours d'eau grâce aux photos aériennes disponibles sur le Géoportail de la Wallonie et à des tables de la littérature [4]. C'est une valeur fondamentale pour décrire comment se comporte l'écoulement dans la rivière. Elle définit l'amplitude de la force de frottement du lit sur l'écoulement en $sm^{-1/3}$.

L'hypothèse d'écoulement uniforme

Pour estimer le débit de plein-bord local, il est possible de simuler l'écoulement avec l'hypothèse d'écoulement uniforme. Cette hypothèse s'applique en une coupe perpendiculaire à l'écoulement (par exemple un profil en travers mesuré grâce à un logiciel SIG comme à la figure 17). Elle suppose un écoulement uniforme dans un canal infiniment long de la même forme que cette coupe. Elle permet de trouver une relation entre le débit et le niveau du plein-bord local (voir l'équation 3).

$$Q_{pb} = \frac{A_b * R_h^{2/3} * S_0^{1/2}}{n} \tag{3}$$

Où

- A_b correspond à l'aire mouillée entre le niveau de plein-bord et le lit en m^2
- R_h le rayon hydraulique en m . Il est calculé comme le rapport entre l'aire mouillée et le périmètre hydraulique. La figure 17 montre comment les mesurer sur un profil.
- S_0 la pente du lit en m/m

- n le coefficient de rugosité de Manning en $sm^{-1/3}$

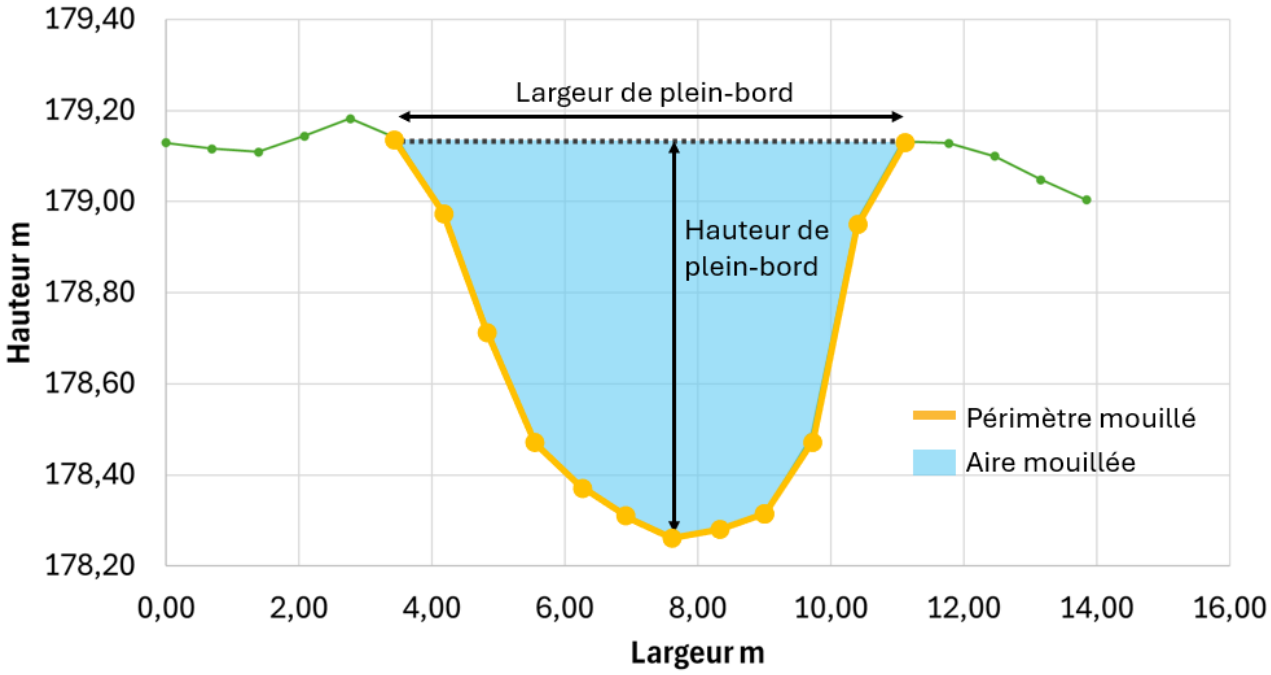


FIGURE 17 – Schéma du rayon hydraulique et de l'aire mouillée sur un profil en travers.

En effet, si on connaît la géométrie, la pente et la rugosité en un point d'un cours d'eau, il existe une relation entre le débit et la hauteur d'eau. Cette relation permet d'estimer à distance le débit plein-bord grâce aux mesures géométriques faites sur le MNT.

Grâce à ces outils et hypothèses, Zoé Hallard estime tous les paramètres hydromorphologiques d'une rivière à distance sauf la granulométrie du lit. Cependant, utiliser l'hypothèse de Manning pour simuler l'écoulement est relativement simpliste, car un écoulement naturel n'est pas toujours uniforme et la forme du canal varie le long de la rivière. Une technique plus réaliste serait de simuler l'écoulement en utilisant des logiciels de simulation numérique.

2.3.3 L'apport de la simulation numérique

C'est précisément cette simulation qu'utilisent Petitjean et al. dans leur méthode à distance [22]. Grâce au logiciel Watlab développé par l'équipe de recherche hydraulique de l'EPL, ils simulent la rivière avec un débit de plus en plus important jusqu'à la faire déborder. Ensuite, au niveau du premier débordement, ils mesurent la géométrie du profil. Ces valeurs seront considérées comme le plein-bord global de la rivière.

La simulation rend donc la recherche du plein-bord global plus précise. Elle effectue en effet sa recherche de manière continue sur l'entièreté de la rivière. Contrairement aux mesures citées précédemment qui ne peuvent mesurer qu'un nombre discret de plein-bords locaux par leur nature discrète.

Qu'est-ce que Watlab et comment faire une bonne simulation ?
Watlab est un logiciel de simulation d'écoulements à surface libre utilisant les volumes finis. Il est développé par l'équipe de recherche en hydraulique de l'UCLouvain menée par Professeure

Sandra Soares-Frazão [32]. Il est utilisé notamment pour simuler l'écoulement en rivières [2, 19, 22]. Les simulations de rivières de ce document sont faites avec Watlab, car il est accessible à tous, et déjà utilisé dans le projet Rivialis [22].

Le modèle utilisé considère la rivière comme un flux d'eau liquide, pure, sans érosion ni porosité à l'interface lit/eau (il est schématisé en 1D à la figure 18). Sur chaque volume simulé, l'eau se déplace dans le plan (x, y) avec un débit Q_x et Q_y et une hauteur h.
Deux forces extérieures sont considérées :

- L'accélération due à la gravité g et à la pente du lit S_{0x} et S_{0y}.
- Le frottement du fluide contre les parois S_{fx} et S_{fy} liés à sa vitesse dans les directions x et y : u et v ainsi qu'à la rugosité n du lit.

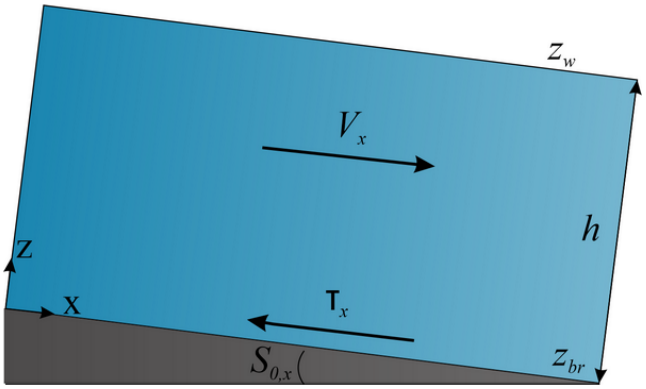


FIGURE 18 – Schéma en 1D du modèle utilisé dans Watlab pour les simulations d'écoulements à surface libre de ce document [32].

Ainsi pour simuler un écoulement avec ce modèle, il faut au préalable obtenir :

- **Un maillage des hauteurs**
  Il s'obtient à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT).
  Le choix de sa résolution est important. Il est préférable d'avoir un maillage dense proche des zones d'intérêt (lit mineur) et à l'inverse, sur les zones moins critiques (lit majeur), de grandes mailles permettent de réduire le temps de simulation.
  Pour permettre ces différences de densité, le maillage est divisé en zones. La taille des mailles est définie aux frontières de ces zones. Elle varie ensuite de manière continue pour respecter ces conditions frontières. À titre d'illustration, la figure 19 présente un maillage de la ville d'Hotton. Chaque couleur correspond à une zone spécifique où la résolution varie, allant de 20 cm dans le lit mineur jusqu'à 15 m dans le lit majeur.

  Note sur le choix de résolution : L'espacement des mailles doit rester cohérent avec la résolution du MNT source. Par exemple, pour le MNT du SPW avec une résolution horizontale de 50 cm, un espacement de 50 cm donnera la même précision que 1 cm avec un modèle plus léger et rapide.
- **Les rugosités :** n
  Le coefficient de Manning n ($sm^{-1/3}$) permet de quantifier la résistance à l'écoulement selon le matériel et la structure des parois de la rivière. Ce coefficient est à définir pour chaque zone du maillage.
  Comment le mesurer ? : Le définir précisément pour des zones naturelles est assez complexe. Plusieurs méthodes pour l'estimer sont présentées dans la suite de ce document.

- **Les conditions limites :** Elles sont définies aux frontières des zones à l'extrémité du maillage et peuvent varier selon les zones. Les principales conditions limites utilisées pour simuler une rivière sont :
    1. **"set_boundary_water_discharge"** qui fixe le débit d'eau. Souvent utilisée pour faire entrer l'eau dans la simulation.
    2. **"set_transmissive_boundaries"** Cette condition limite impose que l'état de l'écoulement à son aval n'exerce aucune influence sur l'écoulement à son amont. Principalement utilisée pour permettre l'évacuation des flux hors du domaine simulé, elle constitue un compromis numérique lorsque l'aval n'est pas modélisé. Toutefois, cette condition peut biaiser le résultat de la simulation. Dans la suite de ce document (à la section 3.3.4), une technique d'atténuation de son impact est implémentée et illustrée.

Pour plus d'informations sur l'utilisation de Watlab, un tutoriel détaillé est disponible dans la documentation [32].

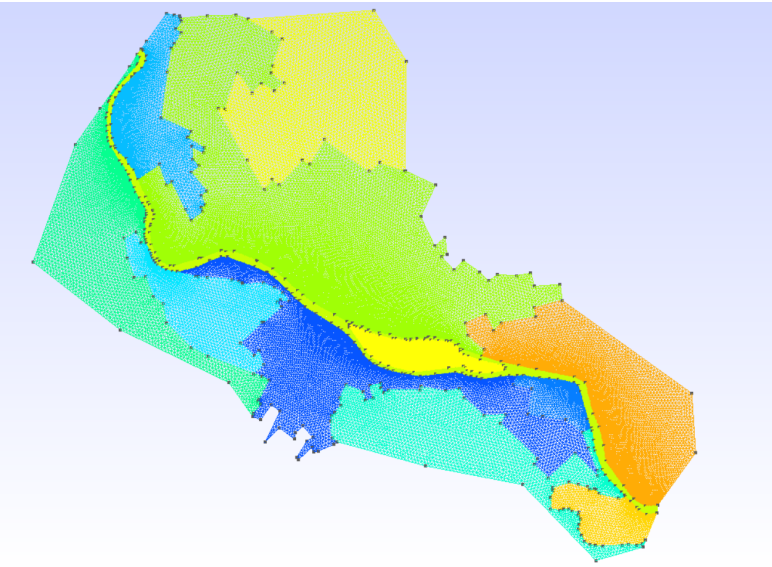


FIGURE 19 – Maillage de l'altitude du sol d'Hotton venant du cours LGCIV2055, établi à partir d'un modèle numérique de terrain et divisé en zones de densité variable.

2.4 Les inconvénients d'étudier les cours d'eau à distance

L'étude des cours d'eau à distance comporte aussi des inconvénients :

1. **Le choix du MNT :** le MNT public a été fait avec un lidar rouge. Cette technologie a la particularité de ne pas traverser la surface de l'eau. L'altitude mesurée dans ce MNT est donc celle de la surface de l'eau et pas celle du lit. Chaque mesure faite à partir de ce MNT aura donc un décalage par rapport à la réalité selon le niveau de l'eau au moment où le lidar est passé.
   Il est toutefois probable que la rivière ait été mesurée à son niveau médian. En effet, les mesures lidar se font par temps clair, il y a donc peu de chance que le cours d'eau soit en crue à ce moment-là. Le décalage ne sera donc pas très important par rapport à la hauteur du plein-bord.
   Pour des mesures d'une meilleure précision, il est possible de refaire un MNT au moyen d'un drone et d'une technologie comme le lidar vert qui lui traverse la surface de l'eau.
2. **La rugosité :** L'estimation de la rugosité par des photos aériennes est en réalité assez grossière. Pour des simulations plus précises, il est possible d'estimer plus précisément la

rugosité grâce à des photos prises sur le terrain et la méthode de Cowan [15] par exemple. Cette méthode expérimentale basée sur des observations de terrain prend en effet en compte plus de paramètres que les tables de Chow[4]. Ces deux méthodes sont testées et expliquées plus en détail dans la suite de ce document.

2.5 Vers une méthode mixte à distance et sur le terrain

Au vu des méthodes présentées ci-dessus, l'étude à distance semble porteuse d'avenir pour accélérer l'étude des petites rivières, car elle permet des mesures rapides et précises.
Toutefois, les mesures de terrain ont toujours de beaux jours devant elles, car il est impossible de tout mesurer à distance notamment pour la granulométrie et l'erreur du MNT public.

La méthode proposée dans ce document est une association entre ces deux paradigmes, afin de permettre d'accélérer l'étude hydromorphologique tout en restant le plus précis possible.
En vue de cet objectif, les deux méthodes sont testées sur la même rivière, ce qui permettra de mieux comprendre dans quels domaines chacune des méthodes est la plus adéquate.

3 Cas d'étude sur la Marchette : application des méthodes étudiées sur une même rivière

Le premier cas d'étude de ce travail porte sur la Marchette, une petite rivière de Famenne traversant Marche-en-Famenne. C'est une rivière de taille moyenne qu'il est possible de parcourir à pied. La figure 20 montre sa position sur une carte de la Wallonie.

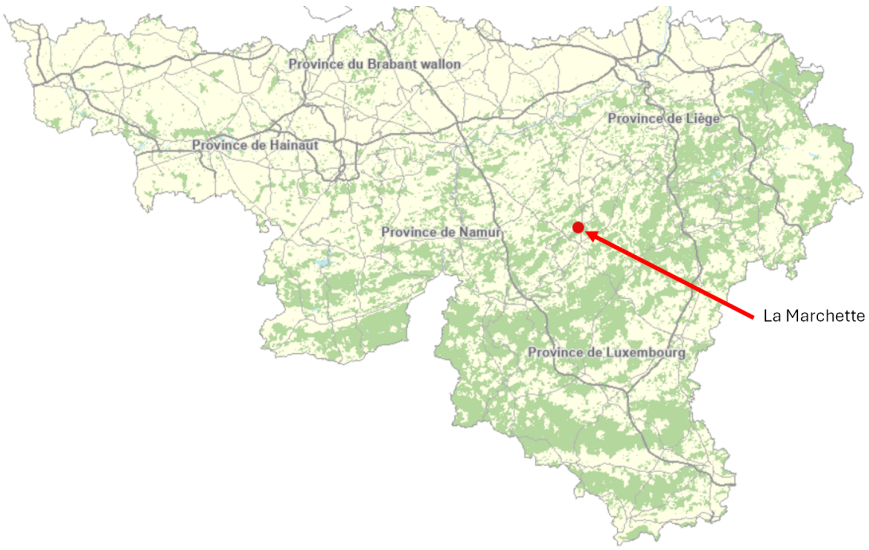


FIGURE 20 – Emplacement de la Marchette en Wallonie (source WalOnMap)

Le lieu précis des mesures est en aval de Marche-en-Famenne, à côté de la prison, en amont de la station de mesure du SPW et aux coordonnées suivantes : 719182,3 606071,8 en Lambert 2008 EPSG :3812.

3.1 Mesures sur le terrain

Comme expliqué précédemment, les mesures de terrain ont été réalisées avec la participation de Robin Petroissans lors d'une démonstration sur la Marchette, le 13 octobre 2025 [23].
Ces mesures ont suivi la procédure décrite à la section 2.2.

3.1.1 Contexte fluvial

La carte à la figure 21 résume le contexte géographique du site étudié. Le site mesuré est accessible en voiture (à côté d'un Ravel et proche de la N63). Il faut cependant traverser un champ sur 500 m pour atteindre la rivière.

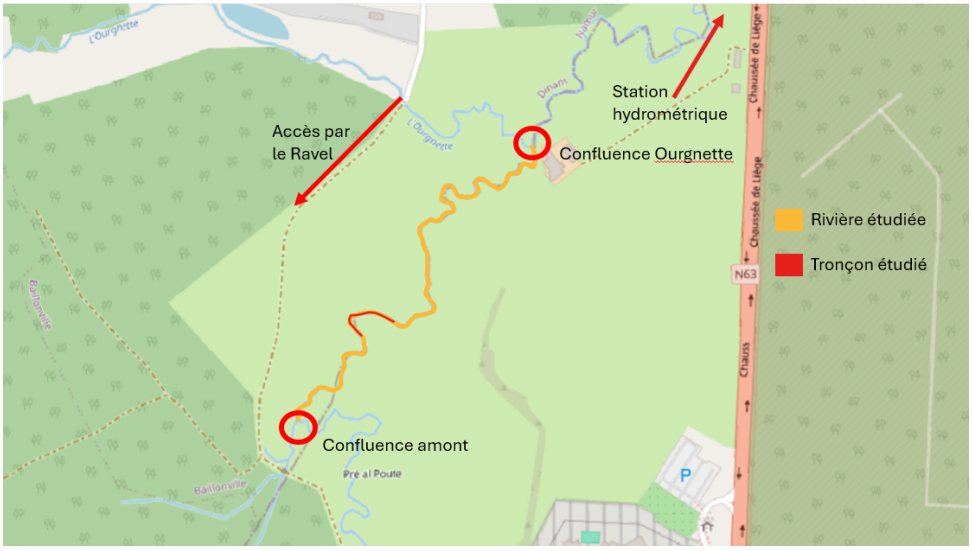


FIGURE 21 – Carte de la zone étudiée de la Marchette

La masse d'eau de surface liée à la zone étudiée est nommée "Marchette I" ou "OU21R". La masse est décrite comme naturelle avec des cours d'eau de pentes moyennes.

3.1.2 Mesures géométriques

Les premières mesures sur le terrain sont les mesures géométriques. Nous avons donc choisi 5 seuils dans une zone proche de la zone rouge montrée à la figure 21 (plutôt vers l'amont). Le tableau **??** présente le résultat d'une de ces mesures et la figure **??** montre une visualisation de son profil.

Mesure	Largeur (m)	Profondeur (m)	Hauteur d'eau (m)
P0	0	0	0
P1	1,2	0,67	0
P2	2,2	1,23	0,01
P3	3,3	1,21	0,02
P4	4	1,28	0,09
P5	5,2	1,24	0,04
P6	5,7	1,18	0
P7	6,4	0,52	0
P8	7,5	0	0

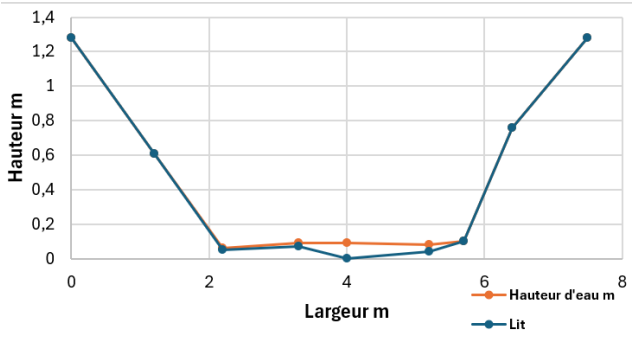


FIGURE 22 – Profil et résultats d'un l'exemple de mesure sur la Marchette

La largeur au plein-bord sur ces 5 seuils est reprise à la table 2. La moyenne des largeurs de plein-bord mesurées est de 5,65 m.

Profil	Largeur de plein-bord m
1	6,35
2	5,05
3	4,35
4	7,5
5	5
largeur moyenne m	5,65

TABLE 2 – Largeurs de plein-bord des seuils mesurés sur la Marchette

3.1.3 Mesures sédimentaires

Dans la procédure standard, la prochaine étape d'une mesure de terrain est de mesurer la granulométrie d'un seuil. Lors de cette mesure de terrain, la procédure Wolman 100 n'a malheureusement pas été appliquée.

3.1.4 Étude du tronçon

Un tronçon représentatif de la Marchette a été choisi. Les coordonnées de son point de départ sont 50.26148 N, 5.33861 E. Sa position est marquée en rouge à la figure 21. Ce tronçon est représentatif de la rivière et mesure une longueur de 80 mètres, soit l'équivalent de 14 fois la largeur de plein-bord moyenne mesurée précédemment ($5,65 \cdot 14 = 79,5$). Les différents faciès d'écoulement de ce tronçon ont été relevés. La figure 23 montre leur répartition sur l'ensemble du tronçon.



FIGURE 23 – Répartition des différents faciès d'écoulement sur le tronçon étudié de la Marchette

3.1.5 Traitement des données

Une fois la mesure terminée, il reste à traiter les données pour remplir les paramètres de la carte d'identité de la Marchette.

La pente :
La pente n'a pas été mesurée sur le terrain. Or, la masse d'eau de surface donne une estimation de ce paramètre. Les cours d'eau de la masse d'eau OU21R y sont décrits comme ayant une pente moyenne. Les pentes se trouvent donc entre $0,5\%$ et $7,5\%$ [30].

La Marchette sur le terrain ne paraît pas avoir une pente spectaculaire. Il est donc probable que sa pente soit dans la partie basse de cette fourchette. Nous estimons donc que la Marchette a une pente proche de 1% , c'est-à-dire qu'elle descend d'environ 1 m tous les 100 m.

La rugosité :
Pour estimer le coefficient de rugosité à partir d'observations, il est possible par exemple d'utiliser la méthode de Cowan [15]. C'est une méthode empirique éprouvée qui estime le coefficient de rugosité grâce à des tables et l'observation de différents paramètres comme la sinuosité, la quantité de végétation ou le matériel des berges. Elle peut tout à fait s'appliquer à partir des photos prises lors de la mesure du tronçon.

Les tables utilisées par l'OFB pour la méthode de Cowan sont reprises à l'annexe B.

La formule qui lie les valeurs des tables à la rugosité est reprise à l'équation 4.

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m \tag{4}$$

L'image à la figure 24 montre une photo d'un seuil de la Marchette. Sa rugosité est estimée ici en guise d'exemple de la méthode.



FIGURE 24 – Exemple de seuil de la Marchette

La valeur des coefficients de ce seuil selon les tables de l'annexe B ainsi que l'estimation du coefficient de rugosité sont reprises au tableau 3 :

Coefficient	Observation	Valeur
Sinuosité "m"	Méandriforme	1,3
Matériau des berges "n_b"	Terre/argile	0,0285
Degré d'irrégularité "n_1"	Irrégularités modérées	0,0075
Variation de section "n_2"	Alternant occasionnellement	0,0025
Effet des obstructions "n_3"	Négligeable	0,002
Quantité de végétation "n_4"	Faible	0,005
Rugosité "n"	/	**0,0221**

TABLE 3 – Valeurs des coefficients de la formule de Cowan pour le seuil de la figure 24

Le plein-bord global :
Les mesures géométriques ont mesuré 5 profils représentant la géométrie des plein-bords locaux. Les paramètres géométriques de la carte d'identité sont mesurés au plein-bord global de la rivière sur la zone étudiée. Pour trouver la géométrie de plein-bord global, identifions le profil dont le débit au plein-bord est le plus petit : c'est ce profil qui entre en débordement en premier et qui contrôle donc le comportement hydraulique global du tronçon. Ce débit est estimé à l'aide de l'hypothèse d'écoulement uniforme (expliquée en détail à la section 2.3.2).

$$Q_{pb} = \frac{A_b \cdot R_h^{2/3} \cdot S_0^{1/2}}{n} \tag{5}$$

Pour utiliser cette formule, mesurons l'aire de plein-bord A_b et le rayon hydraulique local $R_h = A_b/P_h$ pour chaque profil. Pour le coefficient de Manning n et la pente S_0, les valeurs calculées précédemment sont utilisées : $n = 0{,}0221$ et $S_0 = 1\%$. Le débit uniforme lié à la géométrie de chacun de ces profils est finalement estimé. La tableau 4 reprend ces valeurs de débit.

Profil	Débit de plein-bord local m^3/s
1	7,42
2	6,31
3	2,70
4	8,09
5	5,28

TABLE 4 – Débits des plein-bords locaux sur les profils mesurés sur le terrain

Le profil avec le débit le plus petit est le profil 3 (voir figure 25). Il peut donc être considéré comme le profil du plein-bord global mesuré sur le terrain. Sa géométrie est donc celle qui se rapproche le plus du plein-bord global de la rivière.

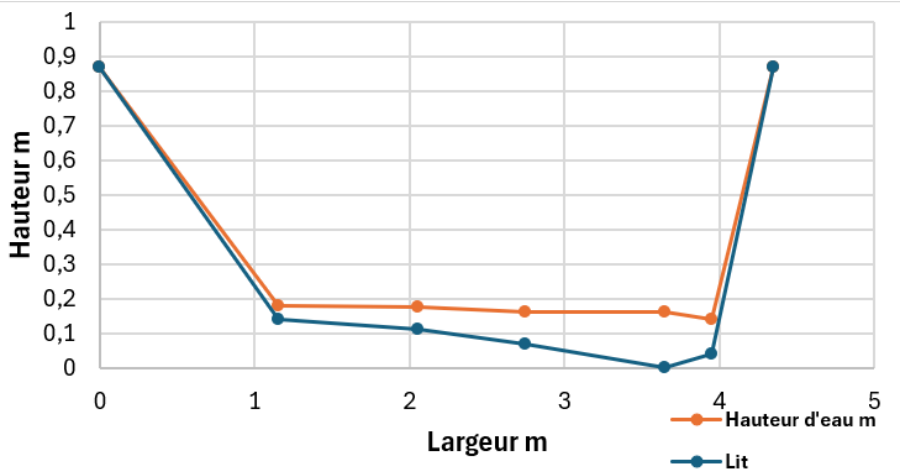


FIGURE 25 – Profil le plus proche du plein-bord global mesuré sur le terrain

La sinuosité :

La sinuosité est le rapport entre la longueur du tronçon étudié et la distance à vol d'oiseau entre ses extrémités. Comme on dispose des coordonnées du début du tronçon et sa longueur, il est possible avec des mesures simples sur une carte de trouver la sinuosité. Ici le tronçon fait 80 m et la distance à vol d'oiseau est de 50 m. Le rapport donnant la sinuosité du tronçon est donc de 1,6.

3.1.6 Carte d'identité de la Marchette selon les mesures de terrain

TABLE 5 – Paramètres de la carte d'identité de la Marchette obtenus par mesures de terrain.

Catégorie	Paramètre	Symbole	Valeur
Morphologie fluviale	Niveau plein-bord	z_b (m)	—
	Largeur plein-bord	l_b (m)	4,35
	Hauteur plein-bord	h_b (m)	0,87
	Ratio largeur/hauteur	l_b/h_b (–)	5,0
	Aire au plein-bord	A_b (m^2)	2,81
	Pente du lit	S_0 (–)	~1%
	Longueur du tronçon	L_r (m)	80
	Sinuosité	SI (–)	1,60
Dynamique fluviale et sédimentaire	Débit plein-bord	Q_b (m^3/s)	2,70
	Puissance de l'écoulement	Ω_b (W)	26,5
	Pente de la surface de l'eau	S_w (–)	n.m.
	Vitesse moyenne	V_w (m/s)	n.m.
	Hauteur moyenne	h_m (m)	1,022
	Distribution des éléments du lit	—	n.m.[(a)]
	Écart type des éléments du lit	σ_G (–)	n.m.[(a)]
	Coefficient de rugosité	n ($sm^{-1/3}$)	0,0221

— Paramètre non disponible par cette méthode.
[(a)] Non mesuré lors de cette campagne : la procédure Wolman 100 n'a pas été appliquée.
Profil de référence : profil 3 (débit de plein-bord minimal parmi les 5 seuils mesurés). Rugosité estimée par la méthode de Cowan [15].

3.2 Mesure à distance par logiciel SIG et des données publiques

3.2.1 Choix du logiciel et des sources

Le logiciel SIG utilisé pour cette étude est QGIS 3.44 . C'est un logiciel libre avec une grande variété d'extensions disponibles [29].

Les mesures d'altitude se basent sur le MNT public d'une résolution de 50 cm réalisé par la région wallonne [3].

Les photos aériennes du cours d'eau sont des orthophotos [3].

Il existe une station de mesure proche, en aval de la zone mesurée (voir la carte à la figure 21). C'est la station "L7120 | Marche-en-Famenne | Marchette" [20].

Celle-ci se trouve en aval de la confluence avec l'Ourgnette, une rivière de taille comparable à celle de la Marchette (voir figure 26). Ses données ne reflètent donc pas exactement la zone qui nous intéresse.



FIGURE 26 – Confluence de l'Ourgnette avec la Marchette

3.2.2 Choix d'une zone d'étude

L'objectif étant de comparer les mesures de terrain avec les mesures à distance, elles doivent mesurer les mêmes endroits. La zone choisie pour l'étude à distance (voir figure 27), couvre donc l'ensemble de la zone étudiée pendant les mesures de terrain. Comme la position des profils mesurés sur le terrain n'est pas connue précisément, alors la zone étudiée à distance est un peu plus longue.

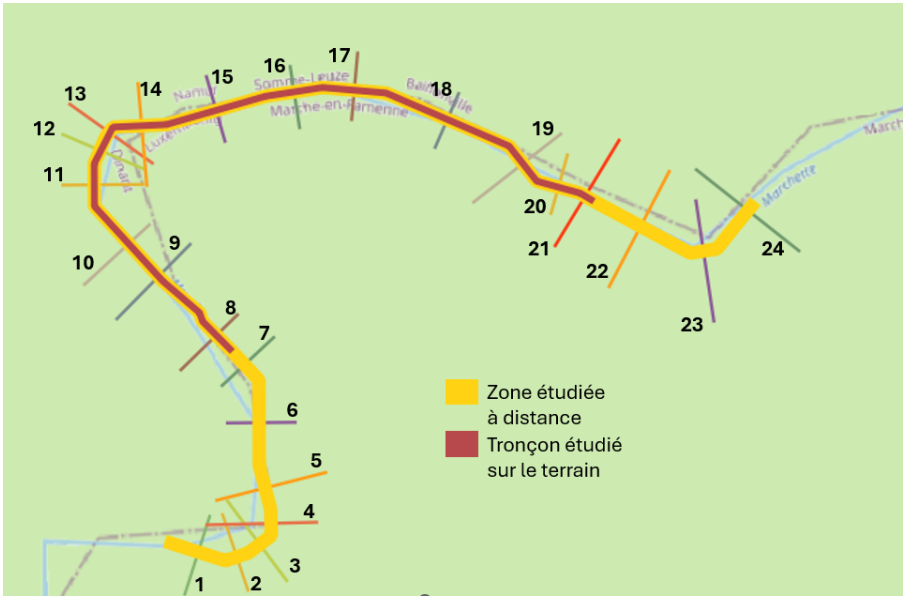


FIGURE 27 – Zone et profils étudiés à distance sur la Marchette

3.2.3 La rugosité

Les seules visualisations de la rivière accessible à distance sont les photos aériennes publiques (voir figure 28). Ces photos ne permettent pas une résolution assez grande pour utiliser la méthode de Cowan. Les tables créées par Chow [4] (voir annexe C) permettent une estimation de la rugosité à distance, car elles demandent moins de données. L'estimation est toutefois moins précise qu'avec la méthode de Cowan.

La table utilisée est à la figure 55, selon l'orthophoto, la rivière semble correspondre à la catégorie 1.c : *propre, méandre, quelques mouilles et seuils* avec un état moyen des berges. Cette catégorie correspond à $n = 0,4sm^{1/3}$.



FIGURE 28 – Photo aérienne de la Marchette [3]

3.2.4 La pente du lit

La pente de la rivière se mesure grâce à l'approximation linéaire de l'altitude le long du talweg du MNT. Ce profil d'altitude et son approximation sont représentés à la figure 29. La pente du

talweg mesurée est de $0,13\%$, car le lit descend de 13 cm tous les 100 m à l'endroit de la zone mesurée.

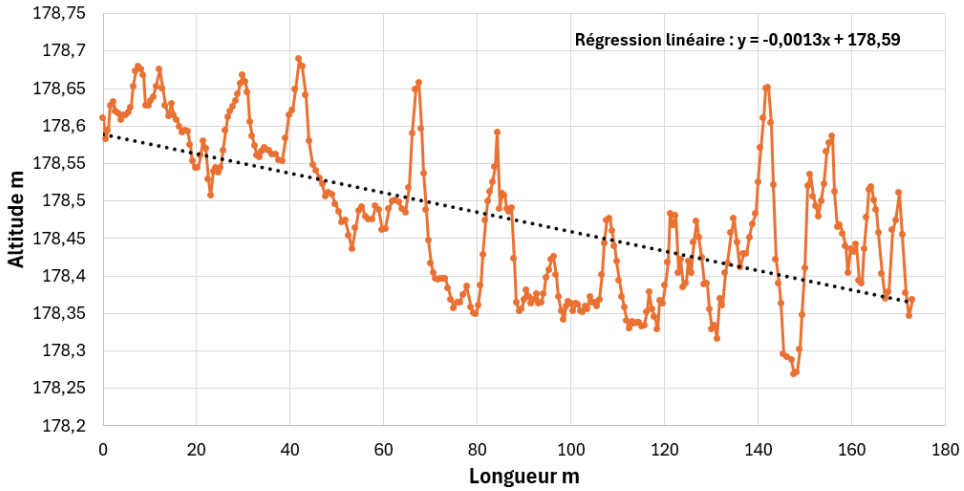


FIGURE 29 – Profil de l'altitude du talweg de la Marchette mesuré sur le MNT public et son approximation linéaire

La pente mesurée ici n'est pas celle du lit, mais celle de la surface du cours d'eau lors de la mesure du MNT, car ses données s'arrêtent à la surface de l'eau.

3.2.5 La sinuosité

La sinuosité est prise ici pour la zone étudiée à distance. La longueur de cette zone est de 173 m et la distance entre ces deux extrémités est de 89 m. La sinuosité SI est donc de 1,94.

3.2.6 Recherche et mesure du plein-bord

Comme pour les mesures de terrain, la mesure à distance de la géométrie du plein-bord se réalise par des mesures de profils de l'altitude prises perpendiculairement à l'écoulement de la rivière. Pour cette analyse, 24 profils ont été pris régulièrement à intervalles réguliers de 5 m le long du tronçon étudié. La carte à la figure 27 montre la position de ces profils.

Ensuite, le niveau de plein-bord local a été choisi manuellement pour chacun de ces profils en travers. Pour correspondre à la définition : *le niveau qui précède le débordement*, il est basé sur l'altitude de la berge la plus basse. Le sommet de la berge est ici identifié comme la première rupture de pente notable observée s'élevant de part et d'autre du talweg. Cette étape est la plus subjective de cette méthode, car pour certains profils, choisir la berge n'est parfois pas évident.

Ensuite, le coefficient de Manning et la pente calculée précédemment permettent d'estimer le débit uniforme théorique pour chacun de ces profils. Le graphique de la figure 30 illustre l'évolution de cette capacité de débit le long de la zone d'étude. La recherche du plein-bord consiste à rechercher le minimum de cette courbe. En effet, le profil avec le plus petit débit de plein-bord est celui qui débordera probablement en premier.

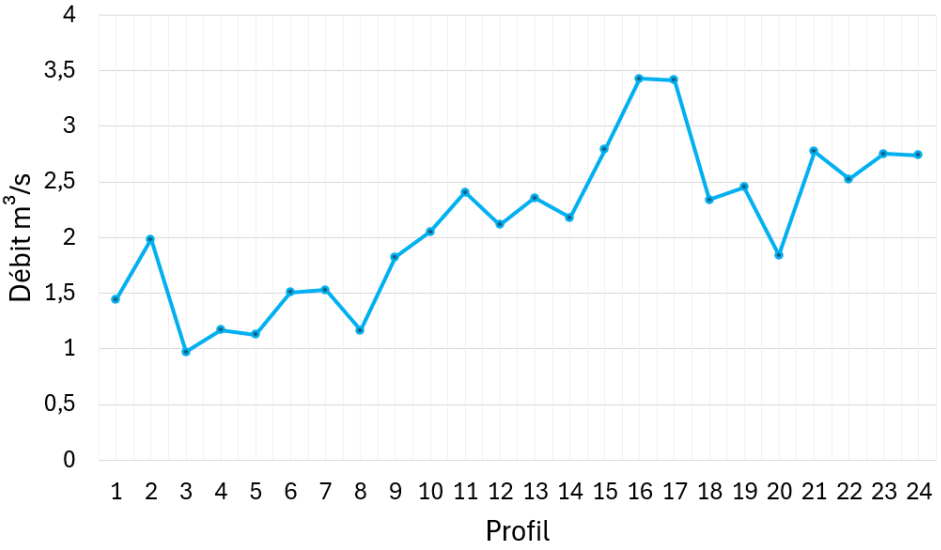


FIGURE 30 – Évolution du débit de plein-bord sur les profils mesurés à distance selon l'hypothèse de débit uniforme

Sur ce graphique le débit minimum est celui du profil 3, avec 1 m^3/s. Deux autres profils ont un débit similaire : le 5 et le 8 avec respectivement 1,12 m^3/s et 1,16 m^3/s. Leur profil est représenté à la figure 31. Ils sont assez similaires aux profils 3 et 5, situés à seulement 10 m l'un de l'autre. Il est probable que le plein-bord global de la rivière se trouve proche de l'un d'entre eux. Mais à distance, la précision des données disponibles ne permet pas de trancher avec certitude.

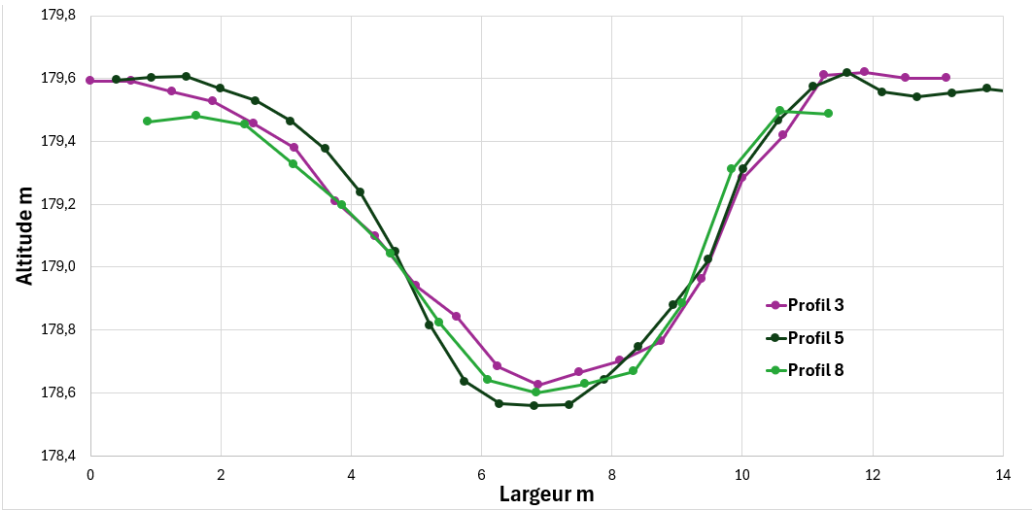


FIGURE 31 – Profils aux emplacements probables du plein-bord de la Marchette selon l'étude par logiciel SIG

Néanmoins, le profil 3 a le plus petit débit, ce qui suggère qu'il débordera en premier. Il est donc choisi pour définir la géométrie du plein-bord global mesuré à distance.

3.2.7 Correction des mesures grâce aux stations de mesure hydrologiques du SPW

La précision de la méthode à distance est notamment limitée par l'erreur systématique du MNT public au niveau du lit mineur. Il existe une méthode pour estimer cette erreur à distance :

utiliser les stations hydrométriques de la Région wallonne. Ce biais s'explique par la présence de l'eau lors de la génération du MNT, qui enregistre le sommet de la surface libre plutôt que le fond du lit. Les vols topographiques étant programmés par temps sec, le cours d'eau se trouve généralement à son niveau médian. Grâce à l'historique des mesures de la station, il est possible de calculer les statistiques de l'écoulement et en déterminer le niveau médian.

Pour adapter les données de la station hydrométrique à la zone étudiée (en amont de la confluence avec l'Ourgnette), nous utilisons une approche basée sur la fraction du bassin versant. En effet, l'Ourgnette constitue 25% du bassin versant au niveau de la station, tandis que la Marchette draine les 75% restant. Le débit médian au niveau de la station $Q_{med,station}$ est donc probablement alimenté à 75% par la Marchette $Q_{med,Marchette}$ et à 25% par l'Ourgnette $Q_{med,Ourgnette}$ (voir équation 6).

$$Q_{med,Marchette} \approx 75\% \cdot Q_{med,station} \tag{6}$$

Cette hypothèse semble pertinente, car ces 2 rivières font partie de la même masse d'eau de surface et leurs bassins versants sont assez similaires.

Le débit médian de la station est de 0,23 m^3/s. Celui de la Marchette est donc de 0,17 m^3/s. Le débit plein-bord à distance corrigé par les données de la station de mesure est donc de 1,05 + 0,17 = 1,22m^3/s.

3.2.8 Carte d'identité de la Marchette selon l'étude à distance

Avec toute ses mesures, il est possible de remplir la majorité de la carte d'identité hydromorphologique de la rivière.

TABLE 6 – Paramètres de la carte d'identité de la Marchette obtenus par logiciel SIG et données publiques.

Catégorie	Paramètre	Symbole	Valeur
Morphologie fluviale	Niveau plein-bord	z_b (m)	179,56
	Largeur plein-bord	l_b (m)	10,6
	Hauteur plein-bord	h_b (m)	0,97
	Ratio largeur/hauteur	l_b/h_b (–)	10,9
	Aire au plein-bord	A_b (m^2)	2,8
	Pente du lit	S_0 (–)	1,3%
	Longueur du tronçon	L_r (m)	173
	Sinuosité	SI (–)	1,95
Dynamique fluviale et sédimentaire	Débit plein-bord	Q_b (m^3/s)	1,22
	Puissance de l'écoulement	Ω_b (W)	13,5
	Pente de la surface de l'eau	S_w (–)	—
	Vitesse moyenne	V_w (m/s)	—
	Hauteur moyenne	h_m (m)	—
	Distribution des éléments du lit	—	impossible[(b)]
	Écart type des éléments du lit	σ_G (–)	impossible[(b)]
	Coefficient de rugosité	n ($sm^{-1/3}$)	0,04

— Paramètre non calculé avec cette méthode.

(a) Valeur corrigée par les données de la station de mesure du SPW : $Q_b = 1{,}05 + 0{,}17 = 1{,}22\ m^3/s$. La valeur brute ($1{,}05\ m^3/s$) est issue de l'hypothèse de débit uniforme de Manning sur le profil 3.

(b) Paramètre non mesurable à distance ; elle nécessite une mesure de terrain.

3.3 La simulation d'écoulement

Jusqu'ici, pour l'étude de la Marchette, les écoulements sont considérés comme uniformes. Cette hypothèse est assez réductrice, car elle ne considère pas la variation de la section le long de la rivière ou les différents types d'écoulement.

L'analyse par simulation numérique permet de résoudre ce problème, puisqu'elle simule la rivière à partir des équations d'écoulements à surface libre et en prenant en compte la forme du lit. Combinée avec les techniques d'analyse à distance montrées précédemment, elle permet une analyse plus raffinée.

3.3.1 Préparation de la simulation

Comme expliqué à la sous-sous-section 2.3.3, pour simuler un écoulement, il est nécessaire de créer un modèle simulable :

- Le maillage se base sur la zone étudiée et a une résolution de 25 cm (voir figure 33).
- Les rugosités ont été choisies à distance grâce aux tables de Chow (voir annexe C) et aux orthophotos. Faute de données plus précises, la simulation n'utilise que deux rugosités, une pour le lit mineur de $0,04$ et une autre pour la plaine de $0,03$.
- Les conditions limites sont fixées à l'amont et à l'aval. La condition amont est "set_boundary_water_discharge" pour fixer un débit constant et à l'aval "set_transmissive_boundaries. À noter que le tronçon simulé a été adapté pour que la condition n'influence pas l'écoulement (44 m en plus à l'aval (voir figure 32)).

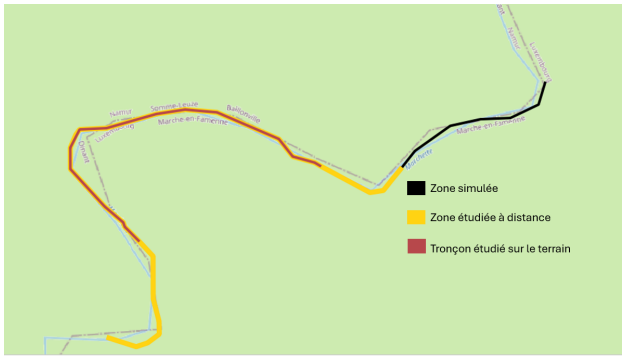


FIGURE 32 – Zone simulée par rapport aux zones étudiées précédemment

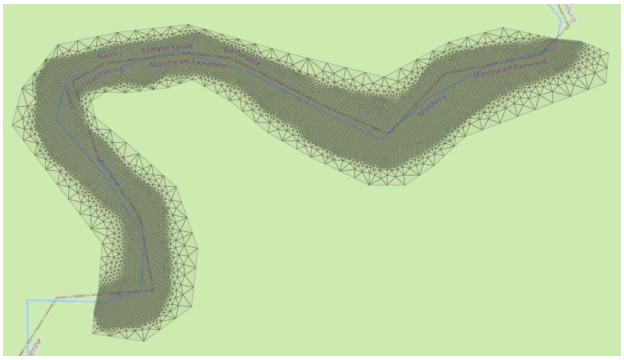


FIGURE 33 – Maillage utilisé pour la simulation de la Marchette

3.3.2 Simulations de l'écoulement

Vérification de la pertinence

Pour vérifier la pertinence du modèle, une première simulation avec des conditions simples est réalisé. La rivière y est simulée avec un débit constant relativement petit :0,2 m^3/s assez proche du débit médian de la Marchette (0,17m^3/s calculé selon les statistiques de la station de mesure sous-sous-section 3.2.7). La rivière y est simulée jusqu'à ce qu'elle atteigne un état de régime (ici 3 000 secondes). La figure 34 montre le résultat de cette simulation, le rouge étant la plus grande hauteur et bleue le moins profond.

Note :

Dans le cas où aucune station de mesure n'est disponible à proximité, une estimation du débit de plein-bord peut être obtenue à partir de la superficie du bassin versant A_{bv}, via la relation empirique établie par PETIT et al. [21] pour les rivières de moyenne et haute Belgique :

$$Q_{pb} = 0{,}128 \cdot A_{bv}^{0{,}981} \tag{7}$$

Un débit de faible sollicitation hydraulique peut alors être défini comme $Q_{petit} = Q_{pb}/10$, afin d'initialiser la simulation dans des conditions bien inférieures au plein-bord.

Cette approche constitue une alternative de dernier recours, les relations régionales de ce type ne prenant pas en compte les particularités locales.

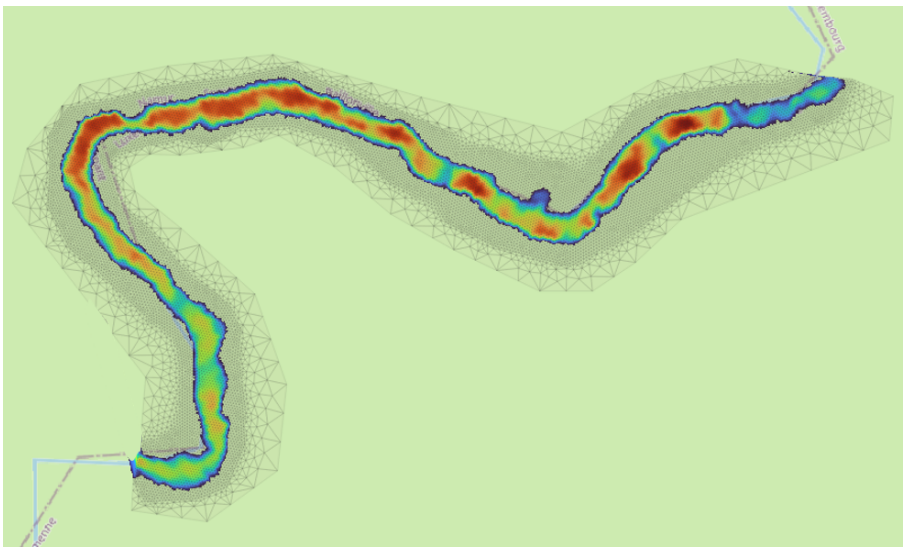


FIGURE 34 – Résultat du test de la simulation de la Marchette avec un relativement petit débit d'entrée de 0,2 m^3/s

Il semble que le modèle simule bien la rivière, car son écoulement suit le tracé du lit.
L'artefact au niveau du 3ème méandre est dû à un retrait naturel de la berge, son profil est tracé à la figure 35. Le niveau y est encore loin du plein-bord.

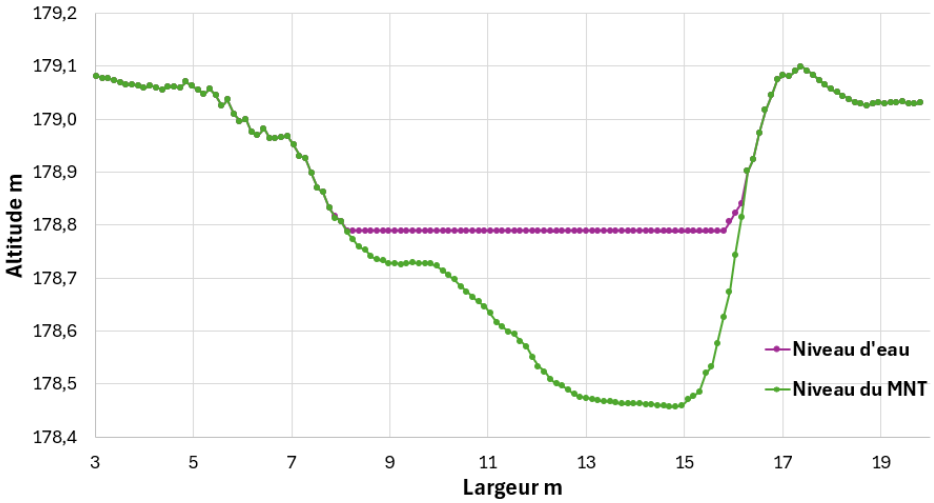


FIGURE 35 – Profil en travers au niveau de l'artefact au 3ème méandre de la simulation de la Marchette avec un relativement petit débit d'entrée de 0,2 m^3/s

Le profil en long de la hauteur d'eau le long du talweg à la figure 36, permet de vérifier jusqu'où la condition aval impacte la zone simulée. Ici, la condition aval influence la simulation à partir de 200 m et la zone étudiée à distance s'arrête à 173 m, la simulation donne donc des résultats pertinents pour toute la zone étudiée à distance.

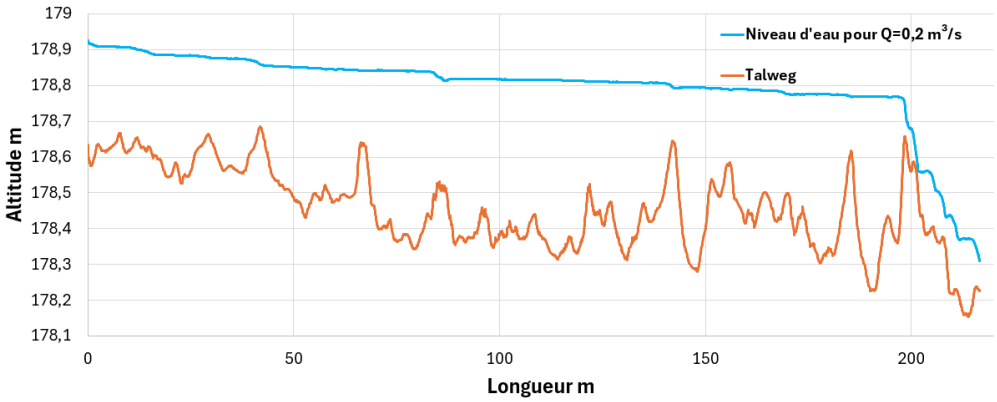


FIGURE 36 – Niveau d'eau le long du talweg selon une simulation de la Marchette avec un débit de $0{,}2 m^3/s$

Recherche du plein-bord

L'accès à une simulation numérique de la rivière change la manière dont le plein-bord peut être recherché. En effet, comme il est possible d'imposer n'importe quel débit à la rivière et de vérifier comment elle se comporte, on peut augmenter progressivement ce débit et observer à partir de quel moment la rivière déborde.
L'endroit où la rivière déborde, a la même géométrie que le plein-bord global, tandis que le débit juste avant le débordement est le débit plein-bord. Cette recherche correspond beaucoup plus à la définition du plein-bord hydraulique que les techniques utilisées précédemment. Pour rappel, le plein-bord hydraulique est défini comme l'état avant le premier débordement de la rivière [22].

Dans ce cas-ci, le modèle a été simulé avec des débits allant de 0,2 m^3/s jusqu'à 1,5 m^3/s. Le premier débordement arrive à un débit de 0,8 m^3/s. Il se trouve vers l'aval, hors de la zone étudiée par les techniques précédentes. Cet endroit n'a été intégré à la simulation que parce qu'il y avait une chute importante qui permettait de limiter l'influence de la condition limite aval. Si l'on augmente le débit jusqu'à 0,9 m^3/s, la rivière déborde en un autre point, cette fois-ci plus vers l'amont. C'est ce point que nous allons prendre comme plein-bord de la simulation, car il se trouve dans les zones mesurées sur le terrain et à distance. Cela permet une comparaison des résultats.

La figure 37 montre l'endroit du premier débordement (entouré en noir), l'endroit du second débordement choisi pour la suite de l'analyse (entouré en rouge) et à l'endroit où la berge est en retrait. La zone entourée en mauve semble aussi avoir un débordement.

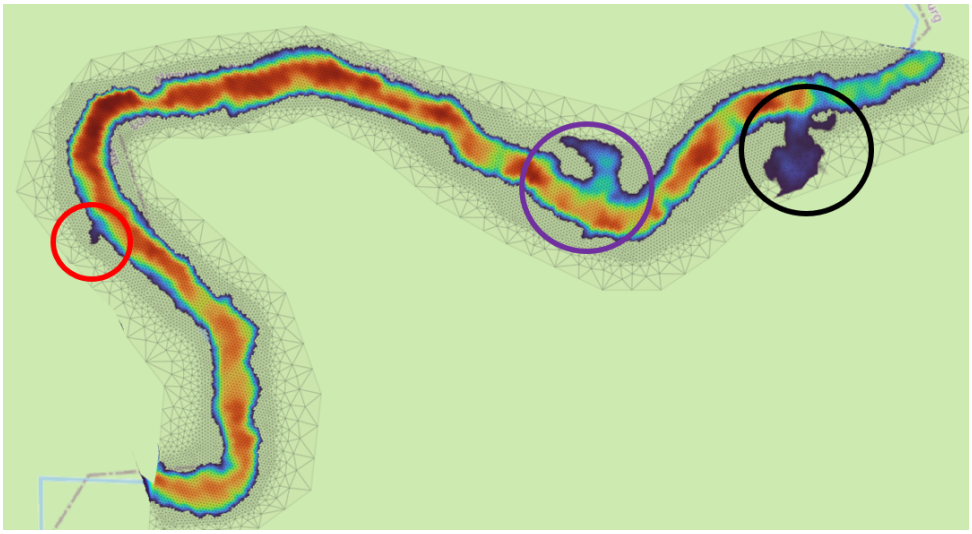


FIGURE 37 – Résultat de la simulation de la Marchette pour un débit de 0,9 m^3/s, les endroits où elle déborde sont entourés

Les profils de la rivière aux 2 débordements dans la zone étudiée à distance sont représentés respectivement à la figure 38 et 39.

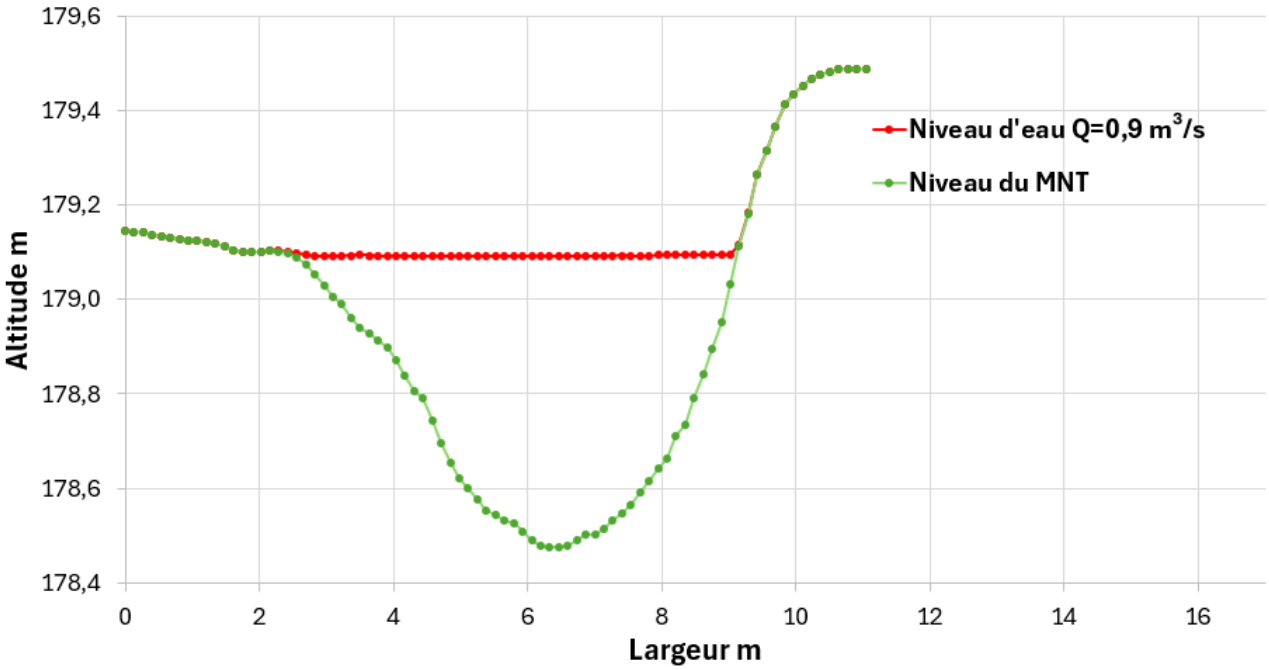


FIGURE 38 – Profil à l'endroit du débordement du résultat de la simulation de la Marchette pour un débit de 0,9 m^3/s

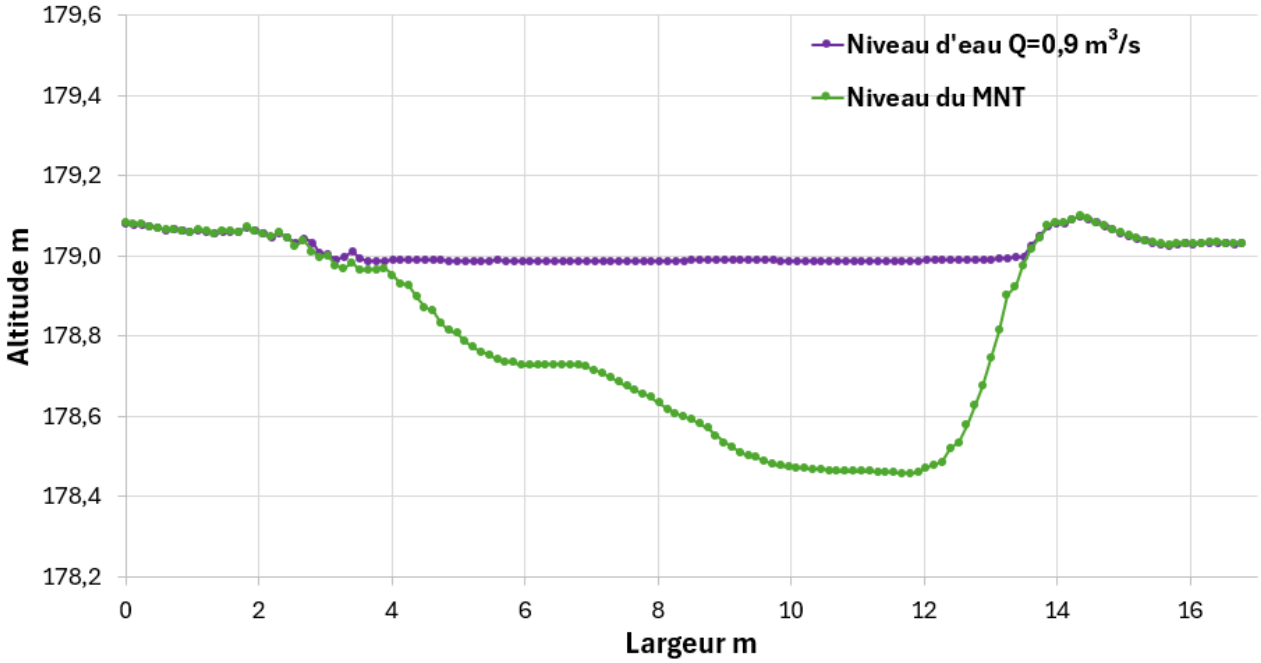


FIGURE 39 – Profil à l'endroit du retrait de berge du résultat de la simulation de la Marchette pour un débit de 0,9 m^3/s

3.3.3 Carte d'identité de la Marchette selon l'étude à distance par simulation

Calculs préliminaires

Afin de mesurer les paramètres de la rivière à partir des résultats de la simulation, un profil en travers est réalisé au niveau du point de débordement amont. La géométrie est ensuite mesurée via un logiciel SIG, de la même manière que lors de la méthode précédente.

Le débit correspond à celui causant le débordement en amont : 0,9 m^3/s.

La sinuosité est mesurée selon la zone étudiée à distance : 1,63.

La hauteur d'eau et la vitesse pour un débit Q_x peuvent être mesurées grâce à la simulation au débit de 0,2 m^3/s.

La rugosité a été estimée pour simuler la rivière.

Résultats

TABLE 7 – Paramètres de la carte d'identité de la Marchette obtenus par simulation numérique (Watlab).

Catégorie	Paramètre	Symbole	Valeur
Morphologie fluviale	Niveau plein-bord	z_b (m)	179,09
	Largeur plein-bord	l_b (m)	6,33
	Hauteur plein-bord	h_b (m)	0,62
	Ratio largeur/hauteur	l_b/h_b (–)	10,28
	Aire au plein-bord	A_b (m^2)	2,45
	Pente du lit	S_0 (–)	$1,3\%^{(a)}$
	Longueur du tronçon	L_r (m)	217
	Sinuosité	SI (–)	1,63
Dynamique fluviale et sédimentaire	Débit plein-bord	Q_b (m^3/s)	0,90
	Puissance de l'écoulement	Ω_b (W)	11,5
	Pente de la surface de l'eau	S_w (–)	—
	Vitesse moyenne ($Q = 0{,}2\ m^3/s$)	V_w (m/s)	0,048
	Hauteur d'eau ($Q = 0{,}2\ m^3/s$)	$h_{w,0.2}$ (m)	0,37
	Distribution des éléments du lit	—	impossible[(b)]
	Écart type des éléments du lit	σ_G (–)	impossible[(b)]
	Coefficient de rugosité	n ($sm^{-1/3}$)	0,04

— Paramètre non extrait du résultat de simulation.
(a) La pente du lit est issue du MNT et non un résultat de la simulation.
(b) Paramètre non mesurable par simulation.

3.3.4 Comment limiter l'influence de la condition aval ?

Dans ce cas d'étude, la zone simulée a été choisie pour garantir que la condition aval n'affecte pas la majorité de la zone simulée. Cette section explique comment ce choix a été fait.

Dans un premier temps, une simulation de l'entièreté du cours d'eau (entre les deux confluences montrées à la figure 21) est réalisée. Ce modèle préliminaire possède un maillage relativement grossier (une résolution de 1,5 m au sein du lit de la rivière), partage les mêmes conditions limites que la simulation principale et son débit est important, mais en dessous de celui du plein-bord (ici 0,8 m^3/s).

L'intérêt d'une telle simulation est de trouver les singularités hydrauliques, capables de limiter l'influence de la condition limite. Simuler sur toute la longueur de la rivière permet une recherche exhaustive de ces endroits. Pour les trouver, il faut chercher des zones où la surface de l'écoulement chute soudainement de manière relativement importante. Ces chutes sont souvent accompagnées d'une augmentation forte de la pente, d'un élargissement important du lit ou bien d'un changement rapide de l'altitude du lit (après un barrage par exemple).

L'écoulement à ces singularités hydrauliques n'est pas influencé par l'aval, car elles accélèrent l'eau jusqu'à sa vitesse critique (voire plus). Lorsqu'elle est dans cet état, l'eau circule à la vitesse de propagation des ondes transmettant l'information dans le fluide. Une onde formée en aval ne pourra donc jamais "remonter" le courant. L'état de l'écoulement à l'aval d'un de ces lieux n'influencera donc pas l'amont. L'écoulement à ces endroits est dit contrôlé par l'amont. Le passage par la vitesse critique est appelé un point de contrôle.

Si la simulation passe par un point de contrôle alors la condition limite

"set_transmissive_boundaries" n'aura pas d'influence après ce point. Par conséquent, l'écoulement se développera de manière réaliste jusqu'au point de contrôle le plus en aval où la condition limite commencera à avoir un impact.

Dans le cadre de cette étude, la singularité hydraulique choisie est une chute d'eau située immédiatement en aval de la zone étudiée à distance. Elle se trouve à 200 m sur la figure 36.

À des fins d'illustration, une simulation test qui ne fait rien pour limiter l'impact de la condition limite aval est réalisée. La comparaison des niveaux d'eau entre ces deux configurations est présentée sur la figure 40. Il apparaît que ne pas inclure cette chute d'eau entraîne une baisse artificielle et significative du niveau de l'eau dans la section aval.

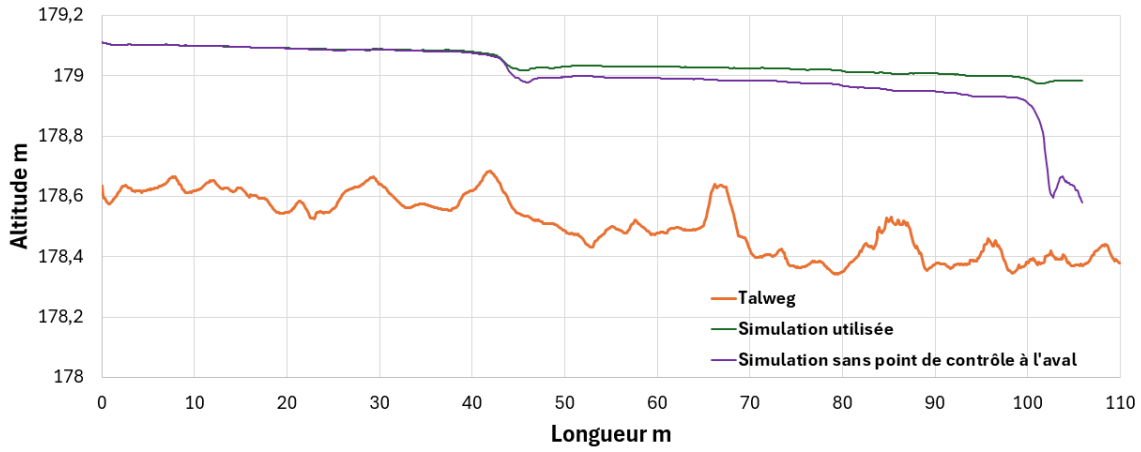


FIGURE 40 – Illustration de l'impact de la condition limite "set_transmissive_boundaries" par deux simulations du même tronçon de la Marchette

3.4 Tableau récapitulatif des 3 méthodes

Le tableau 8 permet une comparaison des résultats chiffrés des différentes méthodes étudiées. Plusieurs observations en ressortent.

Pour **la largeur plein-bord**, l'écart entre les largeurs est assez marqué, 4,35 m pour le terrain contre 10 m par SIG et 6 m par simulation. Cet écart est probablement le résultat du biais du MNT qui « remonte » le fond et le lisse artificiellement. Ce qui semble avoir tendance à élargir le profil.

L'aire au plein-bord reste paradoxalement assez stable pour les 3 méthodes, malgré des largeurs très différentes (2,81 / 2,79 / 2,45 m^2). Cela suggère une forme de compensation entre largeur surestimée et hauteur sous-estimée dans le MNT.

Au niveau du **débit de plein-bord**, l'écart terrain (2,70 m^3/s) vs simulation (0,90 m^3/s) est important. Il s'explique en partie par la recherche du plein-bord qui est plus rigoureuse à distance, le fait que les profils ne sont pas exactement au même endroit, les hypothèses différentes utilisées pour calculer ce débit et le biais du MNT.

Le tableau met en évidence une asymétrie fondamentale entre les méthodes : la **granulométrie** et les **faciès d'écoulement** ne sont accessibles que par la mesure de terrain. Ils sont impossibles à obtenir à distance, quelle que soit la sophistication du modèle numérique.

Enfin seul la simulation a permis de mesurer la vitesse de l'eau. Il est pourtant totalement possible de la mesurer sur le terrain. Ce manque qui doit-être comblé dans la méthode proposée dans ce document.

TABLE 8 – Tableau récapitulatif des paramètres de la carte d'identité de la Marchette selon les trois méthodes.

Catégorie	Paramètre	Symbole	Terrain	SIG	Simulation
Morphologie fluviale	Niveau plein-bord	z_b (m)	—	179,59	179,09
	Largeur plein-bord	l_b (m)	4,35	10,64	6,33
	Hauteur plein-bord	h_b (m)	0,87	0,97	0,62
	Ratio largeur/hauteur	l_b/h_b (—)	5,0	10,97	10,28
	Aire au plein-bord	A_b (m^2)	2,81	2,79	2,45
	Pente du lit	S_0 (—)	∼1%	1,3%	—
	Longueur du tronçon	L_r (m)	80	173	217
	Sinuosité	SI (—)	1,60	1,95	1,63
Dynamique fluviale et sédimentaire	Débit plein-bord	Q_b (m^3/s)	2,70	1,05[(a)]	0,90
	Puissance de l'écoulement	Ω_b (W)	26,5	13,5	11,5
	Vitesse moyenne ($Q = 0{,}2\ m^3/s$)	V_w (m/s)	—	—	0,048
	Hauteur d'eau ($Q = 0{,}2\ m^3/s$)	$h_{w,0.2}$ (m)	—	—	0,37
	Coefficient de rugosité	n ($sm^{-1/3}$)	0,0221	0,04	0,04
	Granulométrie du lit	—	n.m.	impossible	impossible
	Faciès d'écoulement	—	observés	impossible	—

3.5 Conclusion du cas d'étude

3.5.1 La complémentarité des méthodes plutôt que leur opposition

Les trois approches comparées ne souffrent pas des mêmes faiblesses. Les mesures de terrain procurent une bonne précision locale mais restent limitées par leur caractère discret : l'opérateur ne peut mesurer qu'un nombre limité de profils, choisis sur base d'observations visuelles. À l'inverse, l'étude à distance (surtout par simulation) couvre continuellement l'ensemble du tronçon et identifie objectivement les zones hydrauliquement critiques, mais ne peut accéder ni au fond réel du lit ni aux paramètres sédimentaires.

Ces limites sont en grande partie complémentaires, ce qui plaide pour une méthode mixte plutôt que pour le choix d'une seule approche qui combinerait la précision des mesures de terrain et l'objectivité des simulations.

3.5.2 Le problème central : localiser le plein-bord global

Le paramètre le plus difficile à mesurer est de trouver où est le plein-bord global de la rivière. Il conditionne une grande partie des autres paramètres de la carte d'identité de la rivière.

Sur le terrain, Robin Petrossians a mesuré le profil de 5 seuils. Leurs débits de plein-bord locaux calculés par Manning vont de 2,7 à $8{,}1 m^3/s$, soit un écart entre les profils d'un facteur 3. Cet écart montre à quel point il est complexe, même pour un opérateur expérimenté, de choisir les bons endroits à mesurer uniquement à partir d'observations. Pour quelqu'un de moins expérimenté, le risque de ne pas choisir le bon seuil est réel. À distance, la recherche du plein-bord par SIG repose sur un choix manuel du niveau de berge pour chacun des 24 profils, ce qui reste une étape subjective.

La simulation numérique lève en grande partie cette difficulté : en augmentant progressivement le débit, le modèle identifie les débordements de manière objective.

3.5.3 Une limite structurelle du MNT :l'invisibilité du fond du lit

Le MNT public enregistre la surface de l'eau et non le fond du lit, ce qui introduit un biais systématique sur toutes les mesures à distance. Sur la Marchette, cette erreur n'a pu être estimée qu'indirectement, à partir des données de la station hydrométrique en aval. Or, pour une rivière sans station proche, cette correction est impossible. Une confrontation entre un profil mesuré sur le terrain et le profil correspondant extrait du MNT quantifierait ce biais pour mieux le corriger.

4 Cas d'étude sur l'Orne

Le cas d'étude sur la Marchette a mis en évidence trois manquements qu'il est important de combler pour élaborer la méthode proposée dans ce document.

- Le manque de coordonnées précises pour les profils de terrain n'a pas permis de comparer directement un profil mesuré sur le terrain avec le profil correspondant extrait du MNT.
- Le débit n'est pas mesuré sur le terrain.
- La procédure Wolman-100 pour mesurer la granulométrie du lit a été omise.

Ce second cas d'étude sur l'Orne a été conçu pour y remédier.

L'Orne est une petite rivière proche de Louvain-la-Neuve (voir figure 41), ce qui a permis de l'utiliser comme terrain d'exercice dans le cadre du cours LGCIV2053 : Fluvial hydraulics. Les mesures y ont donc été réalisées par des étudiants, ce qui constitue un contexte différent de la démonstration professionnelle réalisée sur la Marchette et permet d'évaluer la robustesse des méthodes lorsqu'elles sont appliquées par des opérateurs non expérimentés.

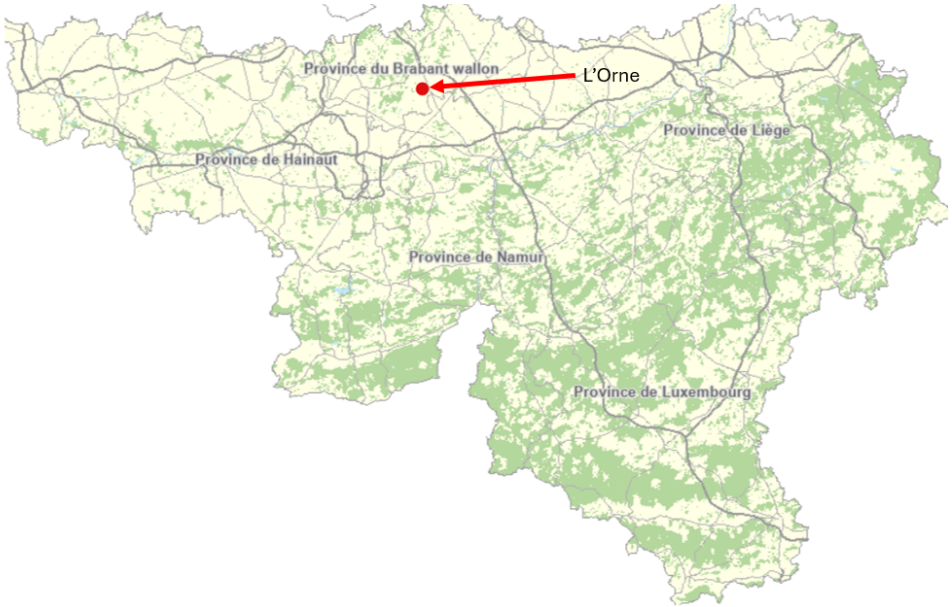


FIGURE 41 – Emplacement de l'Orne en Wallonie (source : WalOnMap)

4.1 Contexte fluvial

La zone étudiée sur l'Orne est reprise à la figure 42. Elle se trouve directement en aval d'une station de mesure hydrométrique. Deux profils en travers sont mesurés par les étudiants (numérotés 1 et 2 sur la carte). Cette fois-ci leur position exacte a été notée.



FIGURE 42 – Carte de la zone étudiée de l'Orne

Par rapport à la Marchette, cette rivière n'est pas aussi protégée des actions humaines. Elle a subi de multiples rectifications, dont une directement en amont des profils mesurés par les étudiants.

Un moulin se trouve aussi en amont de la station de mesure, il influence la morphologie de la rivière en agissant comme un filtre à sédiments.

Selon le principe de la balance de Lane décrit à la section 1.2.4, l'aval du moulin sera donc plus érodé car l'eau va chercher à se recharger en sédiment.

L'Orne aux deux profils mesurés a donc un lit assez creusé. Il est donc peu probable que ces profils soient pris au plein-bord global. Cette prédiction est confirmée par l'analyse à distance à la section suivante.

Les figures 43 et 44 montrent des photos des deux profils étudiés dans ce cas d'étude.



FIGURE 43 – Photo du profil 1 prise lors de la mesure de terrain sur l'Orne



FIGURE 44 – Photo du profil 2 prise lors de la mesure de terrain sur l'Orne

4.2 Comparaison entre profils de terrain et du MNT

Les figures 45 et 46 montrent la superposition des profils mesurés sur le terrain et extraits du MNT pour les deux profils mesurés.

Comme l'altitude absolue des mesures de terrain n'est pas connue avec précision, les deux profils ont été translatés pour faire coïncider leurs berges respectives : les extrémités de la mesure de terrain sont alignées sur les berges correspondantes du MNT. L'incertitude altimétrique de l'ensemble de la mesure de terrain est donc celle du MNT sur le sol sec, soit environ 12 cm selon l'axe vertical.

Deux observations principales ressortent de ces comparaisons :

- **le MNT est fiable au niveau des berges :** pour les deux profils, une fois le recalage effectué, les berges mesurées sur le terrain et celles issues du MNT coïncident bien. Par ailleurs, le minimum du MNT correspond au niveau d'eau observé lors de la mesure de terrain, ce qui confirme que le MNT public s'arrête bien à la surface de l'eau et non au fond du lit.
- **Le MNT ne restitue pas la géométrie réelle du lit entre les berges :** le profil du MNT y est systématiquement plus haut et plus lisse que la mesure de terrain. Cette tendance au lissage s'explique directement par la résolution du MNT : chaque point enregistré correspond à la moyenne des hauteurs mesurées sur une zone de 25 cm^2. Les points situés à l'interface entre la berge et la surface de l'eau moyennent donc ces deux altitudes très différentes, produisant une transition progressive là où la géométrie réelle présente un changement abrupt. Le MNT lisse ainsi le passage entre la berge et le niveau d'eau, ce qui se traduit par une surestimation de la largeur du lit et une sous-estimation de sa profondeur. Cette observation est cohérente avec les conclusions faites sur la Marchette au tableau 8.

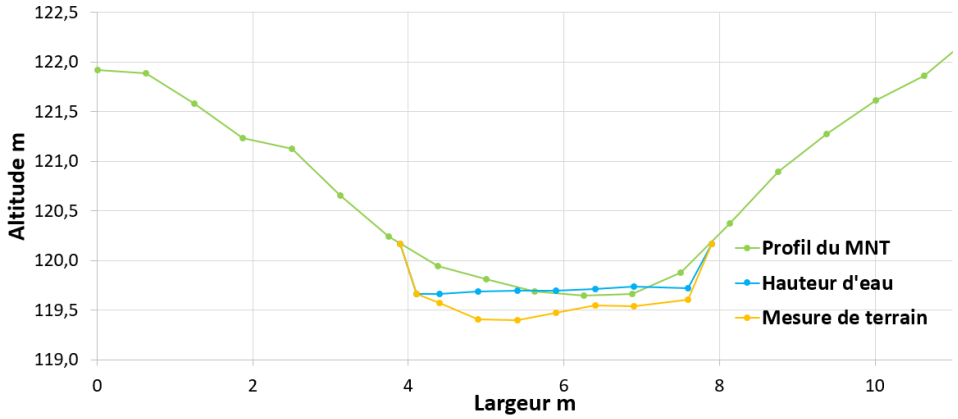


FIGURE 45 – Comparaison du profil 1 mesuré grâce au MNT public et sur le terrain

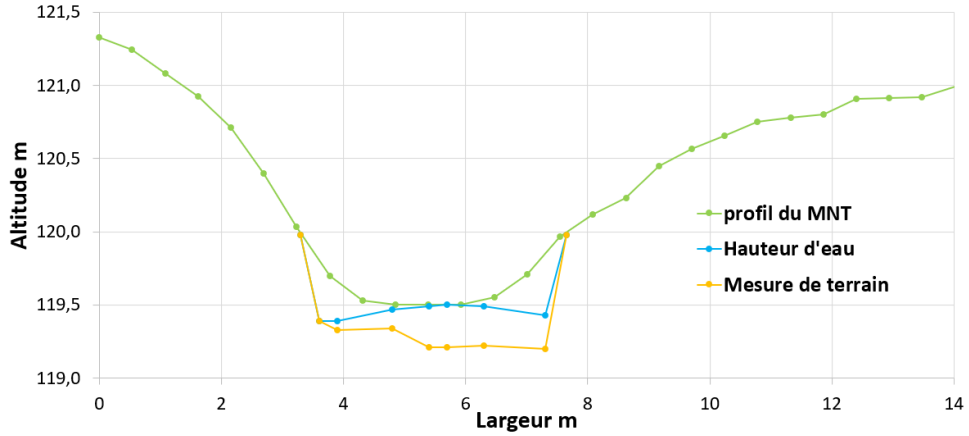


FIGURE 46 – Comparaison du profil 2 mesuré grâce au MNT public et sur le terrain

4.3 Mesures de débit

Le débit est mesuré sur l'Orne à partir d'une perche transparente et est comparé aux données de la station de mesure.

Ces différentes mesures sont ensuite comparées dans le **??**.

4.3.1 Mesures par perche transparente

Sur les deux profils mesurés, la vitesse est mesurée par perche transparente. Le profil de vitesse mesuré sur le profil 2 est montré à la figure 47.

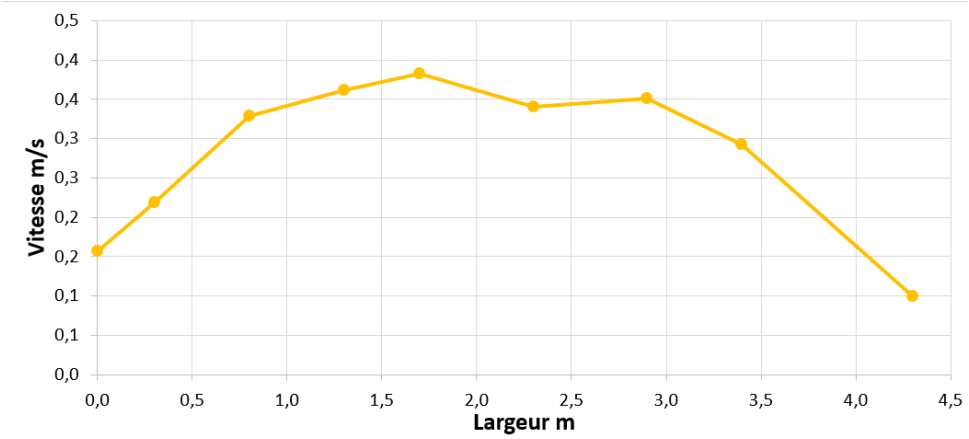


FIGURE 47 – Vitesse de l'écoulement mesurée le long du profil 2 sur l'Orne

Grâce à la mesure de la profondeur de l'eau, la vitesse moyenne dans la colonne d'eau entre deux mesures de vitesse est estimée. Pour les profils 1 et 2, les débits résultants de cette mesure sont respectivement : 0,3 et 0,25 m^3/s.

4.3.2 Débit de la station de mesure hydrométrique

Le débit sur l'Orne était assez constant durant toute la période de mesure. Le 20 mars 2026 au matin, le débit enregistré par la station était de 0,19 m^3/s.

Cette valeur est inférieure à celles mesurées par perche transparente (0,25–0,30 m^3/s), ce qui est attendu. En effet, les instruments de mesure de la station hydrométrique ne sont pas placés exactement au fond de la rivière, ce qui signifie qu'une partie du débit circulant dans la section la plus profonde du lit n'est pas capturée. La station sous-estime donc systématiquement le débit réel.

4.3.3 Estimation du débit par hypothèse de débit uniforme

À titre de comparaison, le débit peut également être estimé à distance à partir de la géométrie des profils mesurés sur le terrain, en appliquant l'hypothèse de débit uniforme de Manning (voir équation 3).

Cette approche nécessite trois paramètres : la géométrie du profil, la pente du lit et le coefficient de rugosité de Manning n. La pente a été estimée à $0,57\%$ pour les deux profils à partir du MNT.

Le coefficient de Manning a été estimé par les étudiants selon la méthode de Cowan. Leurs valeurs respectivement pour les profils 1 et 2 sont : 0,101 et 0,027 $sm^{-1/3}$.

Le débit estimé selon cette méthode est 0,15 m^3/s pour le profil 1 et 0,68 m^3/s pour le profil 2.

4.4 Comparaison des mesures de débit

TABLE 9 – Comparaison des mesures de débit sur l'Orne le 20 mars 2026.

Méthode	**Profil 1** (m^3/s)	**Profil 2** (m^3/s)
Perche transparente	0,30	0,25
Manning (Cowan)	0,15	0,68
Station hydrométrique	0,19	

La comparaison de ces résultats est instructive à plusieurs égards.

Les mesures par perche transparente (0,25 à 0,30 m^3/s) et la station hydrométrique (0,19 m^3/s) sont du même ordre de grandeur, l'écart s'expliquant par la sous-estimation probable de la station. Ces deux mesures convergent donc vers une valeur plausible du débit réel.

En revanche, les débits estimés par l'hypothèse de Manning présentent un écart important : 0,15 m^3/s pour le profil 1 et 0,68 m^3/s pour le profil 2. Cet écart s'explique notamment par la différence de coefficient de Manning estimé par les étudiants : $n = 0,101 s m^{-1/3}$ pour le profil 1 contre $n = 0,027 s m^{-1/3}$ pour le profil 2. Cet écart illustre concrètement à quel point l'estimation du coefficient de Manning par observation visuelle est une étape difficile et sujette à une grande variabilité inter-opérateurs, même lorsqu'elle s'appuie sur une méthode structurée comme celle de Cowan.

4.5 Mesures sédimentaires : Wolman 100

La granulométrie du lit a été mesurée par les étudiants du cours LGCIV2053 : Fluvial hydraulics dans le cadre de leur travail pratique. Ils ont appliqué la méthode Wolman 100, décrite à la section 2.2.4. Elle consiste à prélever aléatoirement une centaine d'éléments dans le lit d'un seuil et à mesurer l'axe B de chacun d'entre eux à l'aide d'un pied à coulisse.

Les résultats de cette mesure sont à la figure 48 ; ils permettent de remplir le paramètre "distribution des éléments du lit" (D50=35 mm et D90=65 mm) et "écart type des éléments du lit" $\sigma_G = 3,84$.

Il est également possible d'estimer la rugosité du lit : $n = 0,156 s m^{-1/3}$. Cette estimation se rapproche de la rugosité mesurée au profil 1 par les étudiants, mais cette valeur ne considère que la rugosité du lit, contrairement à la méthode de Cowan qui prend aussi en compte l'influence des berges.

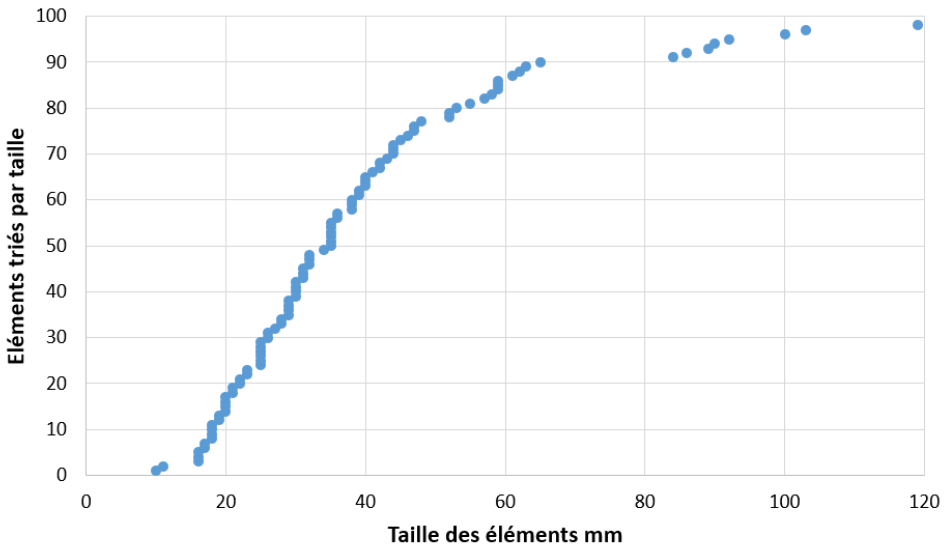


FIGURE 48 – Résultat de l'analyse granulométrique sur l'Orne réalisée par les étudiants du cours LGCIV2053 : Fluvial hydraulics

4.5.1 Bilan du cas d'étude sur l'Orne

Le cas d'étude sur l'Orne a permis de combler les trois manquements identifiés à l'issue du cas d'étude sur la Marchette et d'en tirer plusieurs enseignements.

La perche transparente, même maniée par des étudiants non expérimentés, donne des résultats cohérents avec la station hydrométrique. C'est un instrument fiable et accessible pour estimer le débit sur le terrain. Cette mesure est particulièrement utile car elle permet de corriger le débit de plein-bord obtenu par simulation : la section invisible pour le MNT correspond sur l'Orne à la tranche d'eau entre le fond réel du lit et le niveau d'eau lors du vol lidar.

La confrontation entre profils de terrain et du MNT montre que les deux sources sont complémentaires : le MNT est fiable sur les berges, la mesure de terrain est précise pour le fond. Un profil combiné où les berges sont issues du MNT et le fond est issu du terrain pourrait approcher ainsi une géométrie réelle et complète du lit.

Enfin, la mesure Wolman 100 renseigne les paramètres sédimentaires de la carte d'identité. Elle fournit aussi une estimation de la rugosité du lit. En revanche, celle-ci reste une indication contextuelle : au débit de plein-bord, la hauteur d'eau est suffisamment grande pour que la rugosité du lit joue un rôle secondaire par rapport à celle des berges.

5 Proposition d'une méthode mixte terrain et à distance

L'analyse comparative réalisée sur la Marchette a mis en évidence que les méthodes de terrain et à distance ne sont pas rivales mais complémentaires. La méthode proposée ici s'appuie sur ce constat : l'analyse à distance précède et guide la mesure de terrain, afin que l'opérateur arrive sur site avec une connaissance préalable de la rivière et des endroits à privilégier. Elle vise à être rapide, économique, reproductible et accessible à un opérateur disposant de connaissances de base en SIG.

La méthode se déroule en trois grandes phases : une préparation à distance, une mesure de terrain ciblée et géoréférencée, et un traitement des données combinant les deux sources.

5.1 Étape 1 : Collecte du contexte et des données publiques

Comme pour une mesure de terrain classique, la première étape consiste à rassembler les informations disponibles sur la rivière avant de se déplacer.

Les informations à collecter sont les suivantes :

- L'accessibilité du site en voiture. Combien de mètres doivent être parcourus à pied ? Y-a-t-il des champs ou des propriétés privées à traverser ?
- La fiche de masse d'eau de surface correspondante [30]. Elle fournit des informations utiles sur l'état de conservation, les communes concernées ou la zone géologique.
- Une orthophoto de la zone (disponible sur le Géoportail de la Wallonie[3]).
- La position des stations de mesure hydrométriques proches [20]. Elles ne sont pas indispensables, mais leur historique de débits est utile pour estimer le débit médian et corriger l'erreur du MNT.
- Le MNT public wallon (résolution 50 cm, levé SPW 2021–2022) pour la zone d'étude [27]. C'est la donnée centrale sur laquelle repose toute l'analyse à distance suivante. Il faut garder en mémoire que ce MNT mesure la surface de l'eau et non le fond du lit, ce qui introduit un biais systématique.

5.2 Étape 2 : Construction du modèle simulable

À partir du MNT et de l'orthophoto collectés à l'étape 5.1, un modèle numérique simulable de la rivière est construit pour Watlab. La procédure est décrite à la section 2.3.3, cette étape se déroule aussi à distance.

Le maillage est généré à partir du MNT avec une résolution de 50 cm dans le lit mineur et des mailles plus larges (par exemple 2 m) dans la plaine alluviale pour limiter le temps de calcul. Il est long d'au moins 14 fois la largeur de la rivière si on la mesure à un point d'inflexion (ou dans une partie rectiligne si les méandres sont peu marqués).

Le coefficient de rugosité est estimé à partir de l'orthophoto et des tables de Chow [4] (voir annexe C) : cette estimation est grossière, mais suffisante pour localiser les zones critiques. Elle sera affinée à l'étape 5.6 grâce aux photos prises sur le terrain.

Les conditions limites sont : un débit imposé à l'amont et une condition de sortie libre à l'aval.

5.3 Étape 3 : première simulation et vérification de la pertinence du modèle

Avant de lancer les simulations principales, une simulation préliminaire à débit modéré (choisi proche du débit médian estimé à partir des données de la station hydrométrique du SPW ou estimé depuis la taille du bassin versant), est réalisée sur un tronçon plus long que la zone d'étude, englobant l'aval immédiat.

L'objectif est double :

1. Vérifier que la rivière est modélisée correctement : l'écoulement suit-il le tracé du lit mineur ? Le niveau d'eau est-il cohérent ? Si ce n'est pas le cas, cela signale généralement une anomalie dans le MNT (comme un pont, par exemple) qu'il faut identifier et corriger avant d'aller plus loin.

2. Identifier une singularité hydraulique en aval de la zone d'étude, comme une chute d'eau, un seuil fort pentu ou un élargissement soudain du lit. Elle servira de point de contrôle pour limiter l'influence de la condition limite aval sur les simulations suivantes. Comme montré sur la Marchette (à la section 3.3.4), si le modèle n'a pas de point de contrôle à l'aval, les niveaux d'eau simulés seront significativement plus bas.

   Si aucune singularité naturelle n'est identifiable à proximité immédiate, la zone simulée doit soit être étendue vers l'aval jusqu'à en trouver une, soit le tronçon d'étude doit être déplacé en amont d'une singularité connue.

Cette étape conditionne la suite : si le modèle n'est pas pertinent ou si aucune singularité n'est trouvable, la méthode ne peut pas être appliquée correctement sur cette zone.

5.4 Étape 4 : Simulation à débit croissant et identification des zones critiques

Une fois le modèle validé à l'étape 5.3, la rivière peut être simulée avec des débits croissants jusqu'au premier débordement. L'objectif est d'identifier objectivement les zones hydrauliquement critiques de la rivière sans avoir à se déplacer sur le terrain. C'est-à-dire, trouver les endroits dont le plein-bord sera atteint en premier.

5.4.1 Choix des débits simulés

La première simulation a un débit proche du débit médian déjà estimé pour l'étape 5.3. Pour les suivantes le débit est augmenté jusqu'au premier débordement.

L'augmentation du débit entre chaque simulation n'a pas besoin d'être très petite. En effet, des incréments représentant environ 50 à 100% du débit médian estimé (par exemple pour la Marchette 0,1 à 0,2 m^3/s) sont suffisants pour localiser la zone de débordement avec une précision adéquate. Une mesure plus précise du débit de plein-bord sera réalisée à l'étape 5.6.

Une fois le premier débordement détecté, il est pertinent de continuer à simuler la rivière pour un ou deux paliers supplémentaires afin de confirmer que l'endroit déborde bien et d'observer si d'autres zones débordent à des débits proches.

Chaque simulation est menée jusqu'à l'état de régime permanent, c'est-à-dire jusqu'à ce que les niveaux d'eau se stabilisent. Pour des simulations avec un débit, une longueur et un maillage de résolution similaire à ceux du cas d'étude sur la Marchette, quelques milliers de secondes (entre 1000 et 3000) de simulation suffisent.

5.4.2 Identification des zones critiques

Le résultat de la simulation au débit de débordement permet d'identifier deux types d'informations utiles pour la mesure de terrain :

- La position précise du premier point de débordement dans la zone d'étude. C'est probablement à cet endroit que se trouve le plein-bord de la rivière. Il est donc important de pouvoir mesurer sa géométrie sur le terrain à l'étape 5.5.
- L'existence éventuelle d'autres points de débordement, comme observé sur la Marchette où trois zones débordaient à des débits très similaires (0,8 et 0,9 m^3/s). Ces zones méritent aussi d'être visitées sur le terrain, car elles peuvent correspondre à des anomalies du MNT ou à des singularités réelles de la berge qu'il est important de confirmer visuellement.

5.4.3 Bilan de la préparation

Cette étape marque la fin de la préparation de la mesure de terrain. L'opérateur dispose maintenant d'un document de contexte sur la rivière contenant :

- Les modalités d'accès à la zone d'étude en voiture et à pied.
- Les extrémités de la zone simulée et la position du point de contrôle.
- Les points de débordement relevés lors des simulations.
- La position des éventuelles anomalies du MNT à vérifier sur le terrain.
- Une visualisation sur une carte du résultat de la simulation au débit de plein-bord.

5.5 Étape 5 : Mesure de terrain ciblée et géoréférencée

La préparation réalisée aux étapes précédentes transforme fondamentalement la manière dont la mesure de terrain peut être conduite. L'opérateur arrive désormais sur site avec de bien meilleures informations sur la rivière : il sait où aller et a déjà une idée de ce qu'il va y trouver.

La mesure de terrain a maintenant deux objectifs complémentaires :

1. Vérifier et affiner ce que la simulation a prédit.
2. Mesurer les paramètres que seule une présence sur site permet d'obtenir.

5.5.1 Parcours initial de la rivière

Comme pour une mesure classique, la première action sur site est de parcourir la rivière à pied hors de l'eau.

Ce parcours permet d'observer globalement l'état de la rivière et de localiser physiquement tous les éléments d'intérêt prédits par la simulation (repris dans son document de contexte).

Lors de cette recherche, l'opérateur note ses observations pour chaque point : qu'est-ce qui cause une anomalie dans le MNT ? Le débordement prédit par la simulation est-il possible ? À quoi ressemble le point de contrôle ?

Il repère aussi 1 ou 2 seuils mesurables qui ne sont pas contenus dans sa liste. Ces seuils serviront à compléter la mesure lors des mesures géométriques.

5.5.2 L'étude in situ du tronçon simulé

Une fois le tronçon localisé, l'opérateur entre dans l'eau et le parcourt sur toute sa longueur. Pour se repérer géographiquement le long du tronçon, il note ses coordonnées au départ puis tend un long décamètre-ruban le long d'une berge qui lui sert de référence de distance. Il va ensuite noter la position selon le décamètre et photographier chaque faciès (seuil, plat, mouille, etc).

5.5.3 Mesures géométriques géoréférencées

Les mesures géométriques se concentrent en priorité sur le(s) zone(s) de débordement identifiée(s) par simulation. À chaque zone, un profil en travers est mesuré selon la procédure classique (mètre ruban, niveau, règle pliante, voir section 2.2.3). Il est important pour la suite de l'analyse bien de prendre au moins une mesure sur la berge en dehors de l'eau. Cela permettra de mieux comparer le profil mesuré sur le terrain et celui mesuré à distance.

Lors de chaque mesure, l'opérateur note systématiquement l'emplacement de sa mesure. Pour ce faire, il trace un trait représentant sa mesure le plus précisément possible sur la carte montrant

le résultat de la simulation donné dans son document de contexte. (Ce trait doit ressembler aux traits représentant les profils étudiés sur la figure 27).

L'opérateur achève les mesures géométriques en mesurant 1 ou 2 profils supplémentaires aux seuils qu'il a repérés lors du parcours préliminaire du tronçon. L'emplacement de ces mesures supplémentaires devra lui aussi être noté sur la carte de la même manière.

5.5.4 Mesures de débit

Sur deux des endroits où il mesure la géométrie (dont celui du premier débordement prédit par la simulation), l'opérateur profite du décamètre déjà placé en travers de la rivière pour prendre une mesure de débit à la perche transparente (voir section 4). Il est important de noter l'heure de début et de fin de cette mesure ainsi que l'endroit où elle a été prise. Si une station de mesure hydrométrique est proche de la zone mesurée, ces mesures de débit pourront être comparées aux débits mesurés par les stations de mesure.

5.5.5 Mesures sédimentaires

La granulométrie est mesurée par la méthode Wolman 100 (voir section 3.1.3) sur au moins un seuil dans la zone d'étude, de préférence au niveau du point de premier débordement (si celui-ci est un seuil). Cette mesure est indispensable pour renseigner les paramètres sédimentaires de la carte d'identité.

5.6 Étape 6 : Traitement des données et remplissage de la carte d'identité

Une fois la mesure de terrain terminée, les données brutes collectées aux étapes précédentes sont traitées pour produire les paramètres de la carte d'identité de la rivière.

Ce traitement se fait en trois temps : correction et combinaison des géométries terrain et MNT, estimation du débit sous le MNT, et affinement de la simulation par une meilleure rugosité.

5.6.1 Correction et combinaison des profils géométriques

Le géoréférencement des profils mesurés sur le terrain permet de comparer directement la géométrie terrain avec le profil correspondant extrait du MNT au même endroit (comme dans le cas d'étude sur l'Orne à la section 4).

Pour chaque profil mesuré, la mesure terrain et le profil MNT correspondant sont superposés sur le même graphique en utilisant les berges comme points de référence communs. Les deux berges sont en effet mesurées avec précision par les deux méthodes, ce qui permet de les faire coïncider et de placer les deux profils dans le même repère altimétrique. Une fois ce recalage effectué, le profil combiné est construit en conservant la géométrie du MNT pour les berges et en lui substituant la mesure terrain pour le fond du lit. On obtient ainsi un profil hybride qui bénéficie à la fois de la précision du MNT sur les berges et de la mesure réelle du lit.

5.6.2 Estimation du débit sous le MNT

La mesure de débit réalisée sur le terrain sert à estimer le débit qui circule dans la section sous le MNT, c'est-à-dire la partie du lit invisible avec la simulation.

Pour valider cette estimation, le niveau d'eau mesuré sur le terrain au profil de plein-bord global est comparé à l'altitude minimale du profil MNT correspondant. Si les deux valeurs sont

proches, cela indique que le MNT a été acquis dans des conditions hydrologiques semblables à celles de la mesure de terrain : le débit mesuré constitue alors une bonne approximation du débit qui circule sous le MNT.

Dans ce cas, le débit de plein-bord corrigé est simplement la somme du débit de plein-bord obtenu par simulation et de celui mesuré sur le terrain.

Si en revanche les deux niveaux diffèrent significativement, le débit circulant dans la section sous le MNT est estimé par l'hypothèse d'écoulement uniforme. Cette estimation n'est à utiliser qu'en second recours, car elle génère davantage d'incertitude que la mesure de terrain. La section 4.4 compare sur l'Orne ces deux méthodes pour estimer le débit sous le MNT.

5.6.3 Affinement de la simulation

L'amélioration de la simulation repose sur deux ajustements :

- Les anomalies du MNT identifiées et confirmées sur le terrain, comme un pont ou une berge effondrée, peuvent être corrigées manuellement dans le maillage si besoin. Le MNT datant de 2021, il est en effet possible que des éléments aient changé depuis sa mesure.
- Les photos prises lors du parcours du tronçon permettent d'estimer la rugosité de Manning par la méthode de Cowan sur chaque faciès de la zone simulée, et non plus à partir d'orthophotos publiques comme à l'étape 5.2. Ces rugosités sont ensuite intégrées au modèle, ce qui le rend plus réaliste.

Une fois le modèle amélioré, la recherche du plein-bord est répétée selon la même procédure qu'à l'étape 5.4. Le débit de plein-bord obtenu est plus proche de la réalité, car il repose sur une rugosité mieux estimée et un modèle plus représentatif des conditions réelles.

5.6.4 Calcul des paramètres de la carte d'identité

Une fois la simulation affinée, les paramètres de la carte d'identité peuvent être remplis.

La géométrie de plein-bord (niveau, hauteur, largeur et aire) est obtenue en mesurant le profil combiné au niveau du point de premier débordement. Le reste des paramètres morphologiques est obtenu de la manière suivante :

- La pente du lit est issue du MNT, éventuellement vérifiée et corrigée grâce aux altitudes relevées sur le terrain aux points géoréférencés.
- La longueur du tronçon est celle de la zone simulée et parcourue sur le terrain.
- La sinuosité est celle de ce même tronçon.

Les paramètres de la dynamique fluviale (débit au plein-bord, puissance et rugosité) sont obtenus par les techniques citées précédemment. La rugosité est prise comme celle de la zone de premier débordement.

La pente de la surface de l'eau vient de l'approximation linéaire de la surface de l'eau simulée le long de la rivière.

La vitesse et la hauteur moyennes viennent des mesures de débit sur le terrain.

Les paramètres sédimentaires (distribution granulométrique, écart type) sont issus des mesures terrain (Wolman 100). Ce sont les seuls paramètres qui ne bénéficient d'aucune contribution de la simulation.

6 Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif de développer une méthode de caractérisation hydromorphologique adaptée aux petits cours d'eau wallons, dans le cadre du projet Rivialis. La méthode proposée doit permettre de mesurer rapidement et à moindre coût les paramètres de la carte d'identité hydromorphologique définis par Petitjean et al. [22], afin de constituer la base du diagnostic hydromorphologique de l'application Rivialis.

Pour atteindre cet objectif, trois méthodes d'étude existantes ont d'abord été comparées sur un même cas d'étude, la Marchette. Il en ressort que les méthodes à distance produisent des résultats qualitativement cohérents mais quantitativement imprécis, en raison notamment de l'erreur systématique du MNT public au niveau du lit mineur. Les mesures de terrain, quant à elles, offrent une bonne précision locale mais souffrent d'un manque de référencement spatial, ce qui limite la pertinence de la mesure pour un traitement a posteriori. En particulier, la recherche du plein-bord global, un paramètre central de la carte d'identité, s'avère difficile à réaliser de manière objective par l'une ou l'autre méthode prise isolément.

Ce cas d'étude a également permis d'expérimenter la création de modèles simulables de petites rivières à partir de données publiques. Il en ressort que la simulation numérique est tout à fait applicable aux petits cours d'eau wallons, et qu'elle permet d'identifier objectivement les zones hydrauliquement critiques de la rivière sans nécessiter de déplacement. La gestion de la condition limite aval s'est révélée une source d'erreur non négligeable. C'est pourquoi des techniques de réduction de son impact ont été identifiées et intégrées à la méthode proposée.

Un second cas d'étude sur l'Orne a permis de tester des instruments complémentaires : la perche transparente pour la mesure de débit, dont les résultats se sont révélés cohérents avec la station hydrométrique, et la procédure Wolman 100 pour la granulométrie. Il a également montré que le minimum du MNT coïncide avec le niveau d'eau mesuré sur le terrain, ce qui valide l'utilisation du débit mesuré pour corriger le débit de plein-bord simulé. Enfin, la confrontation des profils géoréférencés avec les profils MNT a permis de construire des profils hybrides approchant la géométrie réelle du lit au plein-bord.

Sur la base de ces expériences, une méthode mixte terrain-distance a été proposée. Son apport principal est d'utiliser la simulation numérique pour préparer la visite de terrain, ce qui permet à l'opérateur d'arriver sur site avec une connaissance préalable des zones critiques à mesurer. Cette préparation réduit le temps passé sur le terrain, diminue les risques liés à la prospection en milieu aquatique, et améliore la pertinence des mesures réalisées. Le géoréférencement systématique des profils mesurés permet ensuite une comparaison directe avec le modèle numérique et l'affinement de celui-ci, notamment par une meilleure estimation de la rugosité grâce aux photos prises sur site. Le modèle affiné et les mesures de terrain combinées forment ainsi une base solide pour la construction du jumeau numérique de la rivière, pièce centrale du dispositif Rivialis.

Cette méthode présente néanmoins des limites. Elle n'a pas encore été expérimentée et se fonde sur des expériences faites sur seulement deux rivières de taille similaire (environ 30 km^2 de bassin versant). Sa robustesse reste à confirmer, notamment sur des rivières plus petites ou avec des modifications anthropiques plus importantes. La précision du MNT public reste également une contrainte structurelle que les mesures de terrain ne corrigent que partiellement. La méthode suppose une certaine maîtrise des logiciels SIG et de Watlab, ce qui peut constituer un frein à son déploiement à grande échelle. Enfin, elle se concentre sur les seuls paramètres hydromorphologiques de la rivière et ne couvre pas l'ensemble de la carte d'identité définie par Petitjean et al. (voir annexe A). Les paramètres liés à la zone riveraine, au bassin versant et à

la biologie mobilisent des protocoles et des compétences distincts, et leur intégration dans une méthode unifiée constitue une perspective naturelle pour la suite du projet Rivialis.

Ces limites dessinent naturellement les axes de développement prioritaires pour la suite du travail. La méthode gagnerait d'abord à être testée sur un panel plus large de petites rivières wallonnes, couvrant des contextes géologiques et morphologiques variés. Certaines étapes à distance pourraient aussi être automatisées, notamment la construction du maillage et l'identification des zones de débordement, ce qui accélérerait encore le processus et le rendrait accessible à des opérateurs moins spécialisés.

L'estimation de la rugosité constitue l'une des sources d'incertitude les plus difficiles à réduire dans la méthode proposée. Que ce soit par les tables de Chow ou par la formule de Cowan, l'opérateur doit classer une rivière dans des catégories discrètes à partir d'une observation visuelle, ce qui introduit inévitablement un biais subjectif. Une première piste d'amélioration serait de constituer une bibliothèque photographique de référence, associant à chaque classe des exemples visuels représentatifs de rivières wallonnes. Un tel outil permettrait à l'opérateur de comparer directement ce qu'il observe sur le terrain à des cas concrets plutôt qu'à des descriptions textuelles, et réduirait ainsi la variabilité inter-opérateurs.

Une solution plus ambitieuse serait d'estimer automatiquement la rugosité grâce à des modèles d'intelligence artificielle, entraînés sur des bases de données associant des photos de rivières wallonnes à des valeurs de rugosité mesurées par des experts. Il suffirait alors à l'opérateur de photographier la rivière lors du parcours du tronçon pour que le modèle estime automatiquement la rugosité locale. Ce type d'outil, déjà opérationnel dans d'autres domaines comme la reconnaissance de plantes ou d'objets, s'intégrerait naturellement dans l'application actuellement développée par Rivialis et constitue à ce titre l'une des perspectives pour la suite du projet.

Références

[1] Jean-Marc Baudoin et al. CARHYCE - Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau. Proto 31 mai 2017. DOI : 10.13140/RG.2.2.14896.79363/1.

[2] Tobias Bruyère et Université de Liège {\textgreater} Gembloux Agro-Bio Tech. "Modélisation hydraulique d'un tronçon de la Lesse en vue d'y établir un seuil de hauteur d'eau au passage des kayaks." In : (28 août 2025). Accepted : 2025-09-12T02 :02 :27Z. URL : https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/24123 (visité le 10/05/2026).

[3] Catalogue des données | Géoportail de la Wallonie. URL : https://geoportail.wallonie.be/catalogue-donnees (visité le 28/04/2026).

[4] Ven Te Chow. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Civil Engineering Series. New York : McGraw-Hill Book Company, 1959.

[5] Climate Preparedness 2025. URL : https://discomap.eea.europa.eu/ClimatePreparedness2025?page=Floods (visité le 27/05/2026).

[6] ENV - Bibliothèque. URL : https://webgate.ec.europa.eu/circabc-ewpp/ui/group/c04f478b-d4dc-44f9-a211-087c01165b2c/library/faada4be-9fc3-4a48-b972-f71e356019d5?p=2&n=10&sort=modified_DESC (visité le 28/05/2026).

[7] Antoine Fourquet. "Détermination des incertitudes sur les mesures de débit en rivières". In : (2019). URL : https://hdl.handle.net/2078.2/12542 (visité le 29/04/2026).

[8] Gest'eau. Partage d'expériences, cours d'eau. URL : https://www.gesteau.fr/partage-experiences/cours-deau (visité le 28/05/2026).

[9] GreenWin. URL : https://www.greenwin.be/fr/successStory/consult/55 (visité le 28/05/2026).

[10] Zoé Hallard. "Développement d'un indice de qualité pour les projets de renaturation des petits cours d'eau". In : (2025). URL : https://hdl.handle.net/2078.2/42861 (visité le 27/04/2026).

[11] INSPIRE | Géoportail de la Wallonie. URL : https://geoportail.wallonie.be/INSPIRE (visité le 29/04/2026).

[12] Zbigniew W. Kundzewicz. "Flood protection—sustainability issues". In : Hydrological Sciences Journal 44.4 (1999), p. 559-571. ISSN : 0262-6667. DOI : 10.1080/02626669909492252.

[13] Fédération de pêche de l'Orne. Restauration morphologique des cours d'eau. URL : https://www.peche-orne.fr/2165-restauration-morphologique-des-cours-d-eau.htm (visité le 28/05/2026).

[14] E. W. Lane. "The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering". In : 1955. URL : https://www.semanticscholar.org/paper/The-Importance-of-Fluvial-Morphology-in-Hydraulic-Lane/2ab4ff08d00b2abd5962af72608bde30bbd3a456 (visité le 28/05/2026).

[15] Mikaël Le Bihan. Méthodologie d'évaluation de l'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bass Rapp. tech. Version V2.4, 40 pages. Office français de la biodiversité, Direction Régionale Bretagne, mai 2023. URL : https://www.creseb.fr/voy_content/uploads/2023/07/%2020230501NoteTechniqueTBV_V2.4.pdf.

[16] Luna B. Leopold et M. Gordon Wolman. "River meanders". In : GSA Bulletin 71.6 (1960), p. 769-793. ISSN : 0016-7606. DOI : 10.1130/0016-7606(1960)71[769:RM]2.0.CO;2.

[17] M. Gordon Wolman. A Method of Sampling Coarse River-Bed Material. URL : https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/data/studies/gs002/Wolman_Pebble_Count.pdf (visité le 31/05/2026).

[18] Jean-René Malavoi et Jean-Paul Bravard. "Éléments d'hydromorphologie fluviale. Édité par l'Onema (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), 2010, 224 p.En ligne sur : http ://www.onema.fr/hydromorphologie-fluviale." In : Physio-Géo Volume 5 (3 jan. 2011), p. 1-1. DOI : 10.4000/physio-geo.1532.

[19] Arnaud Moinil. "Inondations à Dion-le-Mont : Analyse et étude de mesures de protection dans la partie amont du bassin versant du Pisselet". In : (2025). URL : https://hdl.handle.net/2078.2/42865 (visité le 10/05/2026).

[20] NSI00017. Débit. URL : https://hydrometrie.wallonie.be/home/observations/debit.html (visité le 29/04/2026).

[21] François Petit et al. "Évaluation des puissances spécifiques de rivières de moyenne et haute Belgique". In : Bulletin de la Société Géographique de Liège (1er jan. 2005). ISSN : 0770-7576, 2507-0711. URL : https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=1904 (visité le 31/05/2026).

[22] Martin Petitjean et al. "Identification of Key Metrics for Quality Assessment of Small-River Restoration Projects from Publicly Available Sources and Field Data in Wallonia". In : Water 17.17 (30 août 2025), p. 2564. ISSN : 2073-4441. DOI : 10.3390/w17172564. URL : https://www.mdpi.com/2073-4441/17/17/2564 (visité le 27/04/2026).

[23] Robin Petrossians. Démonstration de la méthode de mesure d'une petite rivière sur le terrain uti Communication personnelle. la rivière étudiée est la Marchette. 13 oct. 2025.

[24] Danielle Katharine Petsch et al. "Ecosystem services provided by river-floodplain ecosystems". In : Hydrobiologia 850.12 (1er juill. 2023), p. 2563-2584. ISSN : 1573-5117. DOI : 10.1007/s10750-022-04916-7. URL : https://doi.org/10.1007/s10750-022-04916-7 (visité le 27/05/2026).

[25] Robin G. Pike, Todd E. Redding et Carl J. Schwarz. "Development and testing of a modified transparent velocity-head rod for stream discharge measurements". In : Canadian Water Resources Journal 41.3 (2016), p. 372-384. ISSN : 0701-1784. DOI : 10.1080/07011784.2015.1127776.

[26] Qu'est-ce qu'un bassin versant ? - Fondation Rivières. Section : Chronicles. 12 juill. 2022. URL : https://fondationrivieres.org/en/quest-ce-quun-bassin-versant/ (visité le 28/05/2026).

[27] Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2021-2022 | Géoportail de la Wallonie URL : https://geoportail.wallonie.be/catalogue/a004e570-99d6-4fe5-b83d-49b774409278.html#Informations (visité le 02/05/2026).

[28] Stefania Santoro et al. "Assessing stakeholders' risk perception to promote Nature Based Solutions as flood protection strategies : the case of the Glinščica river (Slovenia)". In : Science of the Total Environment 655 (2019), p. 188-201. ISSN : 0048-9697. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2018.11.116.

[29] Spatial without Compromise · QGIS. URL : https://qgis.org/ (visité le 20/05/2026).

[30] SPW. concept-de-masse-d-eau. L'Environnement en Wallonie. URL : https://environnement.wallonie.be/home/milieux/eau/concepts/concept-de-masse-d-eau.html (visité le 28/04/2026).

[31] SPW. Directive-Cadre sur l'Eau. L'Environnement en Wallonie. URL : https://environnement.wallonie.be/home/milieux/eau/concepts/directive-cadre-sur-l-eau.html (visité le 27/05/2026).

[32] Watlab documentation — Watlab 0.6.1 documentation. URL : https://sites.uclouvain.be/hydraulics-group/watlab/index.html (visité le 06/05/2026).

A Tableau complet des paramètres de la carte d'identité d'une petite rivière selon Petitjean et al. [22]

Category	Parameter	Symbol and Units
River morphology	Bankfull level	z_b (m)
	Bankfull width	l_b (m)
	Bankfull depth	h_b (m)
	Width-to-depth ratio	l_b/h_b (-)
	Bankfull cross-section	A_b (m^2)
	Bed slope	S_0 (-)
	Reach length	L_r (m)
	Sinuosity	SI (-)
River and sediments dynamic	Bankfull discharge	Q_b (m^3/s)
	Stream power	Ω_b (W)
	Water surface slope	S_w (-)
	Mean water velocity	V_w (m/s)
	Mean water depth	h_w (m)
	Inundation width for Q_x	l_x (m)
	Water depth for Q_x	$h_{w,x}$ (m)
	Bank material GSD	
	Bank material texture	
	Bed material GSD	
	Sorting of bed GSD	σ_G (-)
	Bed facies	
	Roughness coefficient	n ($sm^{-1/3}$)
	Clogging	
	Bed material mobility per sediment class for Q_b	Shields

	LULC	% agriculture, % permanent vegetation, % impervious, % softwood
Riparian zone	Vegetation height	(m)
	Vegetation diversity	(%)
	Stream shade	
	Grove (spruce or poplar)	(Y/N)
	Erosion and sediment transport	(Y/N)
	Bank tillage	(Y/N)
Upstream catchment	LULC	% agriculture, % permanent vegetation, % impervious
	Erosion sensitivity	(% class area)
	Erosion-prone crops in the last five years	(% area)
Biology	Habitats	
	Bed vegetation	(% bed area)
	Macro-invertebrates	
Miscelaneous	Obstacles	(Y/N)
	Pollution	(Y/N)
	Invasive species	(Y/N)

B table de l'OFB pour 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 49 – Évaluation du matériau des berges "nb"[15]

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 50 – Évaluation du degré d'irrégularité "n1"[15]

Variation de la section	n_2		*Descriptif*
	min	max	
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 51 – Évaluation de la variation de section "n2" [15]

Effet des obstructions	n_3		*Descriptif*
	min	max	
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 52 – Évaluation de l'effet des obstructions "n3"[15]

Quantité de végétation	n_4		*Descriptif*
	min	max	
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 53 – Évaluation de la quantité de végétation "n4"[15]

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
Natural streams - minor streams (top width at floodstage < 100 ft)			
1. Main Channels			
a. clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. same as "d" with more stones	0.045	0.050	0.060
g. sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150

FIGURE 55 – Tables de valeur du coefficient de rugosité de Manning "n" proposée par Chow pour des rivières naturelles [4]

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

FIGURE 54 – Évaluation de la sinusoité « m »[15]

C Tables de valeur du coefficient de rugosité de Manning "n" proposée par Chow [4]

3. Floodplains			
a. Pasture, no brush			
1.short grass	0.025	0.030	0.035
2. high grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. no crop	0.020	0.030	0.040
2. mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
2. cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
3. same as above, but with heavy growth of sprouts	0.050	0.060	0.080
4. heavy stand of timber, a few down trees, little undergrowth, flood stage below branches	0.080	0.100	0.120
5. same as 4. with flood stage reaching branches	0.100	0.120	0.160

FIGURE 56 – Tables de valeur du coefficient de rugosité de Manning "n" proposée par Chow pour les plaines aluviales [4]

D Méthode Wolman-100 pour la détermination de la distribution des éléments du lit

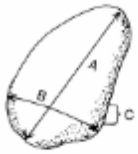
Wolman Pebble Count

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	5-8
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.



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

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.

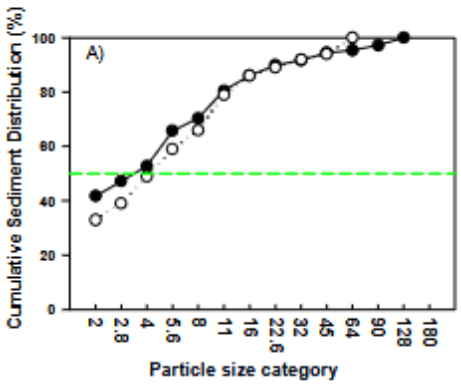


FIGURE 57 – Description complète de la méthode de Wolman [17]

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