



HAL
open science

Calcul de la largeur à pleins bords de grands cours d'eau à partir de MNT LiDAR

Nicolas Fermen

► **To cite this version:**

Nicolas Fermen. Calcul de la largeur à pleins bords de grands cours d'eau à partir de MNT LiDAR. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03545779

HAL Id: dumas-03545779

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03545779>

Submitted on 27 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Nicolas FERMEN

**Calcul de la largeur à pleins bords de grands cours d'eau à partir de MNT
LiDAR.**

Soutenu le 09 septembre 2021

JURY

Madame Marie FOURNIER	Président du jury
Madame Nathalie THOMMERET	Maître de stage n°1
Monsieur Thomas DEPRET	Maître de stage n°2
Monsieur Mathieu BONNEFOND	Enseignant référent

Remerciements

Au terme de ce projet de recherche, mes premiers remerciements s'adressent à mon maître de stage, Nathalie Thommeret, ainsi qu'à mon encadrant, Thomas Depret, qui ont su se rendre régulièrement disponibles pour m'aider dans l'avancée de mon travail et m'épauler dans les moments difficiles où le temps venait à manquer.

Je remercie également mon enseignant référent, M. Bonnefond, pour avoir supervisé ce travail et m'avoir fourni des indications pour la rédaction de mon mémoire.

Enfin, je tiens à remercier Frédéric Gob et les autres membres du Laboratoire de Géographie Physique de Meudon présents lors la sortie terrain à Saint-Florentin, pour m'avoir accepté dans la mission et m'avoir fait connaître le bonheur d'un relevé hydromorphologique parmi les champs d'orties !

Liste des abréviations

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler

CARHYCE : Caractérisation Hydromorphologie des Cours d'Eau

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques

LiDAR : Light Detection And Ranging

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NQE : Normes de Qualité Environnementales

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économique

RADAR : Radio Detection And Ranging

SYRAH-CE : Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Introduction	6
I Contexte scientifique et sites d'études	8
I.1 DIRECTIVE CADRE SUR L'EAU ET ALTERATION MORPHOLOGIQUE DES COURS D'EAU	8
I.1.1 UN ACTE JURIDIQUE POUR UNE POLITIQUE DE L'EAU AU SERVICE DU BON ETAT ECOLOGIQUE ...	8
I.1.2 LE FONCTIONNEMENT HYDROMORPHOLOGIQUE ET SES ALTERATIONS	10
I.1.3 DES OUTILS D'ANALYSE NATIONAUX : CARHYCE ET SYRAH	12
I.2 GEOMETRIE DU LIT A PLEINS BORDS	14
I.2.1 PARAMETRES A PLEINS BORDS : ELEMENTS DE DEFINITION	14
I.2.2 INTERET POUR LA CARACTERISATION ET LA COMPARAISON DES COURS D'EAU	17
I.3 LIDAR ET MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN	18
I.3.1 PRINCIPE DES TECHNOLOGIES LIDAR	18
I.3.1.1 GENERALITES	18
I.3.1.2 LE LIDAR TOPOGRAPHIQUE, BATHYMETRIQUE ET TOPO-BATHYMETRIQUE	19
I.3.2 MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN.....	21
I.3.2.1 ÉLEMENTS DE DEFINITION	21
I.3.2.2 RGE ALTI	24
I.3.2.3 DESCRIPTION DES DONNEES UTILISEES	25
I.4 PRESENTATION DU SITE D'ETUDE	26
I.4.1 LOCALISATION	26
I.4.2 CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES	27
II Méthodes	28
II.1 METHODES EXISTANTES DANS LA LITTERATURE	28
II.1.1 CALCUL DE LA PROFONDEUR HYDRAULIQUE	28
II.1.2 RECHERCHE DE LA COURBURE MINIMALE DU RELIEF	30
II.1.2.1 IDENTIFICATION DES TRONÇONS HOMOGENES ET DES PLAINES ALLUVIALES ASSOCIEES.....	30
II.1.2.2 GENERATION DES TRANSECTS	31
II.1.2.3 CARACTERISATION DE LA LARGEUR DE LA BERGE	32
II.1.3 RESULTATS ET LIMITES DU CALCUL PAR PROFONDEUR HYDRAULIQUE.....	33
II.2 METHODE MISE EN PLACE.....	34
II.2.1 PRINCIPE GENERAL ET MISE EN ŒUVRE	35
II.2.1.1 LES GRANDES ETAPES	35
II.2.1.2 SECTEUR TEST POUR L'ELABORATION DE LA METHODE	37
II.2.1.3 L'ENVIRONNEMENT SPATIAL DANS R	38
II.2.2 GENERATION DES TRANSECTS	40
II.2.2.1 RE-CALCUL DE LA LIGNE CENTRALE	40
II.2.2.2 POSITIONNEMENT ET CALCUL DES SEGMENTS PERPENDICULAIRES A LA LIGNE CENTRALE ..	43
II.2.2.3 EXTRACTION DES ALTITUDES	44
II.2.3 DETERMINATION DU NIVEAU A PLEINS BORDS SUR UN TRANSECT	45
II.2.3.1 CALCUL DE LA PROFONDEUR HYDRAULIQUE	46
II.2.3.2 LISSAGE.....	49

II.2.4	COMPARAISON DE CRITERES DE SELECTION DE LA RUPTURE DE PENTE	50
II.2.4.1	AMPLITUDE LA PLUS GRANDE.....	50
II.2.4.2	ALTITUDE LA PLUS PROCHE DU TRANSECT PRECEDENT	50
II.2.5	CALCUL DES LARGEURS MOYENNES PAR TRONÇON.....	51
III	Résultats, discussion et perspectives	52
III.1	ÉVALUATION QUANTITATIVE PAR COMPARAISON AVEC UNE EXPERTISE	52
III.2	ÉVALUATION QUALITATIVE	54
III.2.1	ANALYSE DES CRITERES DE SELECTION	54
III.2.2	LIMITES SUR DES ZONES COMPLEXES.....	57
III.2.2.1	ZONES A GRAVIERES.....	57
III.2.2.2	ZONES A CHENAUX MULTIPLES.....	59
III.3	CARTOGRAPHIE DES LARGEURS A PLEINS BORDS MOYENNEES	61
III.4	VALIDATION EXTERNE : APPLICATION A UN AUTRE COURS D'EAU	61
III.4.1	ACQUISITION DES DONNEES	62
III.4.2	ÉVALUATION COMPARATIVE	62
III.5	PERSPECTIVES	65
III.5.1	MATERIALIZATION D'UNE LIGNE CENTRALE DIRECTEMENT A PARTIR D'UN MNT	65
III.5.2	ANALYSE DE L'EFFET DE LA RESOLUTION DU MNT.....	65
III.5.3	GRAVIERES ET RESERVOIRS	66
III.5.4	CALCUL DE LA PROFONDEUR A PLEINS BORDS.....	67
	Conclusion.....	68
	Bibliographie	69

Introduction

Dès l'année 2000, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) a introduit la nécessité d'encadrer les milieux aquatiques sur l'ensemble du territoire européen dans le but d'assurer la restauration et la préservation de leur bon état. La qualification de celui-ci a été définie, a évolué et repose à ce jour sur deux analyses : chimique et écologique (cette dernière incluant des études biologiques, physicochimiques et hydromorphologiques). Le volet d'évaluation hydromorphologique des cours d'eau s'appuie notamment sur la notion de géométrie du chenal à pleins bords (niveau, largeur, profondeur, ...). Le débit à pleins bords est défini comme « la capacité d'écoulement du lit mineur juste avant débordement dans la plaine d'inondation » (Wolman et Leopold., 1957). Ses caractéristiques sont le reflet de l'action sur le long terme du régime hydrologique et sédimentaire. Elles résultent plus particulièrement de l'interaction entre les variables de contrôle primaire que sont les crues et les volumes de sédiments charriés, constituant ainsi des éléments clefs pour la description de la réponse érosive des cours d'eau et de leur adaptation aux différents facteurs pouvant perturber leur dynamique. Alors que les paramètres de pleins bords peuvent être déterminés aisément sur le terrain pour des petits cours d'eau (Baudouin *et al.*, 2017) à l'image du protocole d'acquisition national CARHYCE, les mesures sont plus difficiles à mettre en œuvre pour les grands chenaux et sur de longs linéaires (coût, accessibilité).

L'émergence de concepts innovants dans la littérature a poussé la réflexion des enjeux d'acquisition de ces paramètres à l'aide de procédures automatisées. Ce travail a pour objectif de développer une méthode reproductible de cartographie automatisée du niveau à pleins bords et de calcul des largeurs associées à partir de Modèles Numériques de Terrain (MNT) disponibles à l'échelle du territoire français. Pour cela nous travaillerons sur un tronçon de la rivière du Cher à l'aide d'un MNT de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), au pas de 1 m, issu de données lidar couvrant les plaines alluviales des grands cours d'eau. Il s'agira de comprendre comment exploiter un MNT pour l'étude descriptive d'un chenal à grande échelle.

Ce mémoire s'inscrit dans un projet de recherche au Laboratoire Géomatique et Foncier de l'École supérieure d'ingénieurs géomètres et topographes et s'organise en trois temps : nous débuterons notre écrit par une contextualisation de l'intérêt porté par l'étude des paramètres de géométrie du chenal à pleins bords dans le cadre de la DCE, ainsi que par un développement sur les ressources MNT LiDAR employées (Partie 1) ; par la suite, nous

présenterons les différents concepts émergents identifiés dans la littérature permettant la cartographie automatique des largeurs d'un cours d'eau à partir d'un MNT, et poursuivrons en développant la méthode élaborée lors de notre étude pour satisfaire cet objectif (Partie 2) ; enfin, nous discuterons de la qualité des résultats obtenus et des perspectives de travaux complémentaires pouvant donner suite à ce travail (Partie 3).

I Contexte scientifique et sites d'études

I.1 Directive Cadre sur l'Eau et altération morphologique des cours d'eau

I.1.1 Un acte juridique pour une politique de l'eau au service du bon état écologique

En France, la gestion de l'eau a suscité de nombreux questionnements dont certaines réponses sont apparues dès la fin du XVIII^{ème} siècle. Les premières règles établies sont associées à des textes napoléoniens tels que le code civil définissant notamment l'usage de l'eau, ainsi que le code du domaine public fluvial. A cette époque, seule la notion de régime de propriété à l'égard des ressources en eau était abordée (vie-publique, 2019).

Il faudra attendre plusieurs années pour constater une évolution des mœurs. Ainsi, le 16 décembre 1964, est promulgué un texte de loi visant à définir une organisation spécifique à la gestion des ressources en eau. La France est scindée en six bassins hydrographiques, et les pouvoirs publics concèdent pour chacun d'entre eux la prise en charge de sa gestion à deux organismes distincts. Les comités de bassins représentent l'État, les collectivités, les usagers et autres personnes qualifiées. Leur but est de définir une politique de gestion des ressources en eau en considération des orientations nationales et des besoins du territoire. Les agences de l'eau sont des établissements publics à caractère administratif composés d'un président, d'un préfet coordonnateur du bassin et de membres représentatifs des collectivités et des usagers. Elles détiennent le pouvoir exécutif et mettent en œuvre la politique décidée par le comité. La lutte contre la pollution est au cœur de cette nouvelle loi. Ainsi, le principe pollueur-payeur a été officialisé en 1972 par l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE) : celui dont l'activité est considérée comme polluante devra prendre en charge le coût engendré par les mesures de prévention et de lutte nécessaires à la réduction des facteurs polluants de celle-ci afin de retrouver un état acceptable de l'environnement.

La réglementation complémentaire référencée n° 92-3 du 3 janvier 1992, dite loi sur l'eau, vient garantir une gestion équilibrée des ressources en eau, intégrées officiellement comme bien commun de la Nation. Les objectifs assurés sont « une préservation des écosystèmes aquatiques et des zones humides, la protection contre toute pollution et la restauration de la qualité des eaux de surface et souterraines, le développement et la protection de la ressource en eau » (Légifrance, 2006). Cette loi a également permis de préciser les attentes et de mettre à jour les grilles d'interprétations utilisées jusqu'à lors pour recenser la qualité des milieux aquatiques.

C'est avec la Directive européenne Cadre sur l'Eau (DCE) qui a suivi, référencée 2000/60/CE et adoptée le 20 octobre 2000 par la commission européenne, que l'hydromorphologie s'est introduite dans la législation. La DCE fait état de l'importance de retrouver et de conserver le bon état écologique des milieux aquatiques à l'échelle de l'Europe. Transposée en droit français le 30 décembre 2006 à travers la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA), la restauration et la protection de la qualité des eaux souterraines et de surface est devenue un objectif à atteindre. Toutefois, il a été laissé aux états membres concernés la liberté de parvenir à ce bon état selon leurs propres stratégies. La DCE définit le bon état écologique comme un faible écart à une situation de référence (Gob *et al.*, 2014). S'il présente un fort éloignement à celle-ci, le milieu aquatique sera considéré comme dégradé. Il s'agit donc de déterminer quelles références prendre en considération pour évaluer les masses d'eau.

L'évaluation qualitative des eaux de surface repose sur deux domaines d'étude : l'état écologique et l'état chimique (Figure 1). « L'État chimique d'une masse d'eau de surface est déterminé au regard du respect des Normes de Qualité Environnementales (NQE) par le biais de valeurs seuils » (eaufrance, 2019). L'État écologique a quant à lui pour objectif d'aborder l'écosystème dans son ensemble et repose sur trois critères qualitatifs : la biologie (composition des biocénoses aquatiques), la physico-chimie de l'eau (oxygène, température, ...) et l'hydromorphologie (qualité physique du milieu). Pour chacun de ces éléments, la qualité est définie sur la base d'indicateurs. Ceux-ci doivent répondre à un niveau d'exigence fixé pour attester du bon état du milieu aquatique.



Figure 1 : Critères de détermination du bon état des eaux de surface
Source : Agence française pour la biodiversité

Jusqu'à récemment, il n'existait que peu d'indicateurs pour l'évaluation hydromorphologique des cours d'eau. Le nouveau cadre réglementaire induit par la DCE en a permis le développement et l'initiation d'une réflexion sur les référentiels dans ce domaine.

I.1.2 Le fonctionnement hydromorphologique et ses altérations

Un cours d'eau se définit comme « un système naturel assurant la collecte, le transfert, l'évacuation ou le stockage des eaux de ruissellement et des matériaux minéraux ou organiques issus de l'érosion » (eaufrance, 2019). Il s'agit de milieux dynamiques dans lesquels trois types de connectivité, c'est-à-dire les processus d'échange et d'interaction qui s'opèrent entre les habitats aquatiques ou terrestres, sont recensés (Figure 2).

Une connectivité longitudinale reflète les échanges effectués entre l'amont et l'aval du chenal. Ces interactions peuvent avoir lieu au sein du même chenal ou entre le canal principal et ses affluents. Elles ont pour but la diffusion des organismes, la migration de poissons ou encore la dispersion de graines végétales et sont donc primordiales pour la sauvegarde de nombreuses espèces.

Une connectivité latérale désigne la dynamique existante entre le cours d'eau, les berges et la plaine alluviale notamment. Ainsi, celle-ci est essentielle pour bon nombre d'espèces telles que les amphibiens ou les insectes.

Une connectivité verticale traduit les échanges réalisés entre le cours d'eau et sa zone hyporhéique, c'est-à-dire l'ensemble des sédiments saturés en eau situés au-dessous du cours d'eau et sur lequel l'eau s'écoule et qui constitue donc une jonction entre eau souterraine et eau de surface. Elle s'avère importante pour de nombreux organismes ainsi que pour les eaux souterraines.

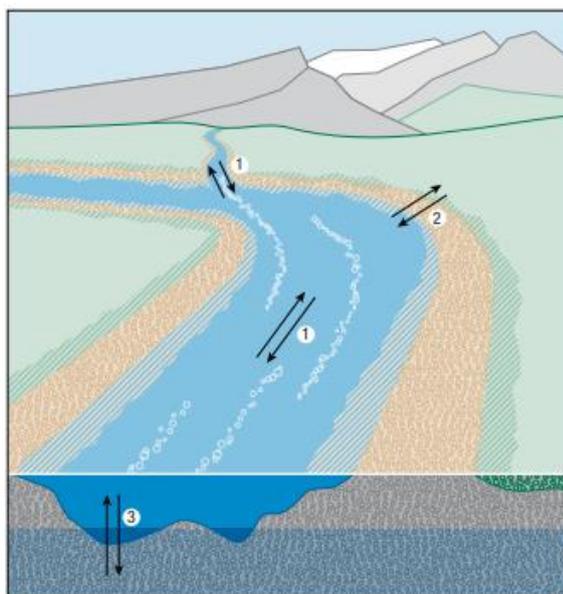


Figure 2 : Schéma de principe des connectivités d'un cours d'eau

Source : Malmqvist, 2002

- 1) Connectivité longitudinale, 2) Connectivité latérale, 3) Connectivité verticale

Le cours d'eau s'organise autour de plusieurs structures. Le lit mineur représente la zone formée par le fond du lit, les berges, ainsi que par les éventuels bancs de sédiments présents. Le lit majeur est quant à lui défini par la plaine d'inondation ainsi que les annexes fluviales telles que des bras morts (Figure 3).

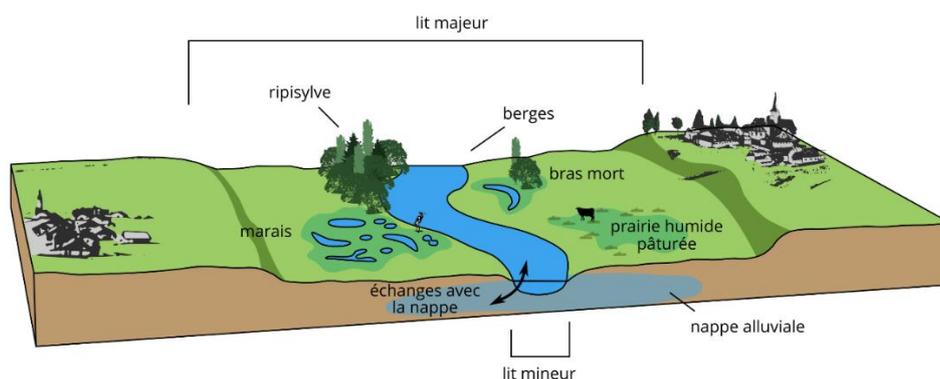


Figure 3 : Schéma de structure d'un cours d'eau

Source : Office Internationale de l'Eau

De nombreux écrits ont évoqué le déséquilibre engendré par des altérations morphologiques de ces structures. Au milieu du XX^{ème} siècle, les premières extractions de sédiments en lit mineur (sables et graviers notamment) sont apparues et se sont

considérablement accélérées dans les années 1970, en France ainsi que dans l'ensemble des pays développés (Rollet *et al.*, 2008). Au cours de ces opérations, le transport des sédiments d'amont en aval s'en trouvaient affectées. En effet, les fosses d'extraction retiennent les sédiments et empêchent leur transport. Un tel impact négatif lié à un arrêt des connectivités latérales peut mener à des phénomènes d'érosions compensatoires, faute d'apports de sédiments (Rollet *et al.*, 2008). Ces réponses érosives modifient la forme et la dynamique des cours d'eaux en influant notamment sur leurs débits (De Rosa *et al.*, 2014). Il en va de même pour les travaux hydrauliques réalisés au sein du lit du chenal tels que l'altération de la forme en plan par la rectification (suppression des boucles de méandres pour faciliter le travail agricole), le recalibrage (pour faciliter la gestion des crues et éviter les inondations) et la modification des écoulements (notamment suite à la création de retenue dans le but d'écarter les crues et soutenir les étiages ainsi que l'altération du transport solide).

Afin de suivre durablement les réponses d'un cours d'eau aux pressions exercées, la France a développé deux outils spécifiques à l'analyse des paramètres hydromorphologiques.

I.1.3 Des outils d'analyse nationaux : Carhyce et Syrah

L'application et le suivi de la Directive Cadre sur l'Eau ont été facilités grâce à la mise en place d'outils nationaux, telles que les bases de données SYRAH-CE (Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau) faisant état des potentielles perturbations anthropiques pouvant dégrader le milieu aquatique à l'échelle de tronçons hydrographiques, et CARHYCE (Caractérisation Hydromorphologique des Cours d'Eau) résultant d'un protocole d'acquisition de données hydromorphologiques à l'échelle locale de la station.

SYRAH-CE désigne un système d'aide à la décision dont la création remonte à l'année 2006 par le ministère de l'écologie en collaboration avec les agences de l'eau (data.gouv). Il a pour objectif d'étudier les altérations morphologiques provoquées par l'action anthropique. Cette base de données propose une visualisation de l'information à deux échelles : une cartographie des zones de pressions hydromorphologiques affectant les bassins et sous-bassins avec le SYRAH-Atlas large échelle, et une identification des tronçons de cours d'eau sujet à des risques d'altération hydromorphologique avec l'outil SYRAH_Troncon.

L'outil CARHYCE repose sur un protocole de mesure terrain reproductible et objectif permettant de caractériser l'hydromorphologie des cours d'eau à l'échelle stationnelle. Les informations collectées ont permis la construction d'une base de données riche, décrivant plus de 2500 tronçons de cours d'eau, avec pour objectif d'alimenter les connaissances sur l'état de ces masses d'eau (Gob *et al.*, 2014). Ce protocole permet de décrire la géométrie du lit, sa granulométrie, la composition des berges et la ripisylve.

Les données obtenues sur le terrain respectent un procédé d'acquisition basé sur le lit à pleins bords (Figure 4). La géométrie est décrite par 15 profils transversaux (transects). Leurs positionnements et leurs échantillonnages de mesure sont définis à partir d'une valeur de largeur à pleins bords estimée sur photo aérienne ou directement sur le terrain.

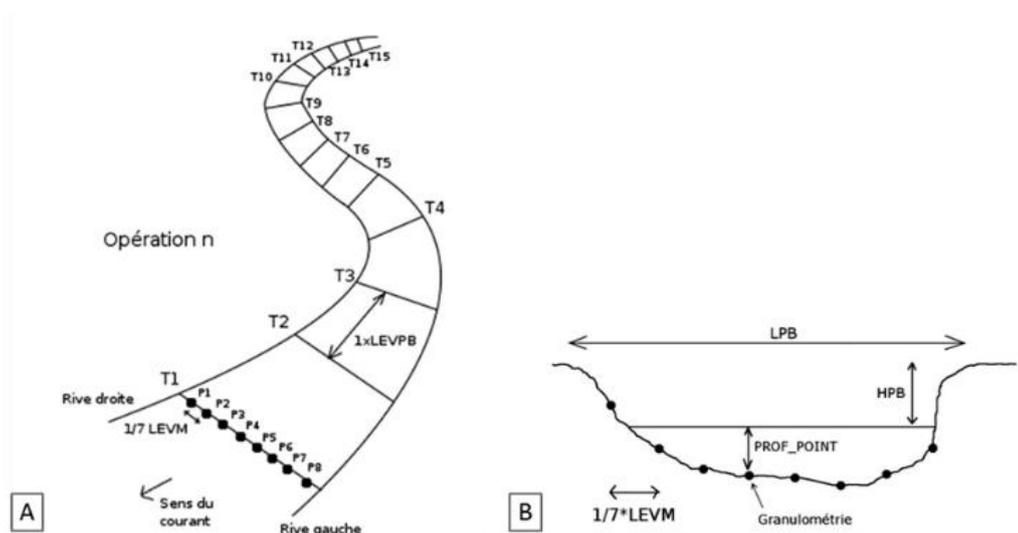


Figure 4 : Principe du protocole d'acquisition CARHYCE
Source : Gob *et al.*, 2014

A : Une acquisition est toujours réalisée d'aval en amont sur 15 transects de référence, espacés entre eux d'une largeur évaluée à pleins bords (LEVPB).

B : Pour chaque profil en travers, la largeur plein bord (LPB) et la hauteur plein bord (HPB) sont mesurées. La profondeur (PROF_POINT) et la granulométrie sont également relevées selon un espacement régulier à hauteur de 1/7 fois la largeur mouillée évaluée (LMEV).

Les outils CARHYCE et SYRAH sont complémentaires puisqu'ils agissent à des échelles différentes du cours d'eau et analysent des variables de contrôle, comme la pression anthropique, ou de réponse, telle que la géométrie du lit et les paramètres de pleins bords associés (Figure 5).

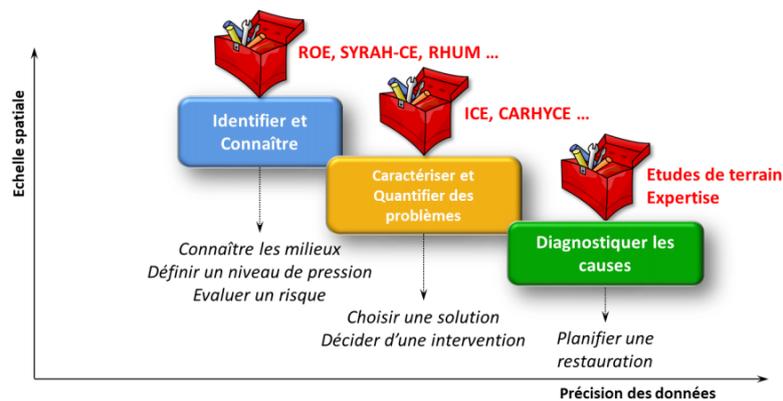


Figure 5 : Champs d'action des outils nationaux CARHYCE et SYRAH
Source : Gob et al., 2014

I.2 Géométrie du lit à pleins bords

Afin de retracer l'histoire des cours d'eau et de mesurer l'action anthropique, il est primordial d'avoir recours à l'étude l'hydromorphologique de ces milieux et plus particulièrement aux caractéristiques du chenal à pleins bords. Ces dernières sont le reflet de l'action sur le long terme du régime hydrologique comme les phénomènes de crues, et sédimentaire tel que le volume de sédiments charriés. Ainsi, la géométrie des rivières, à travers la largeur à pleins bords, constitue un critère d'identification des perturbations ou déséquilibres pouvant les affecter. Pour les étudier, différentes méthodes sont possibles comme des enquêtes de terrain, de la photo-interprétation, ou exploiter l'information d'un modèle numérique de terrain acquis par technologie Lidar.

I.2.1 Paramètres à pleins bords : éléments de définition

La masse d'eau sillonnant le lit des rivières varie au cours du temps. Les débits les plus faibles sont les plus fréquents et n'ont pas un impact significatif sur la morphologie du cours d'eau (De Rosa *et al.*, 2014). Les plus puissants interviennent suite à des événements ponctuels tels que des phénomènes de crues. Le chenal n'est généralement pas en mesure de contenir ces débits et un débordement a lieu. Cependant, malgré leur forte capacité érosive ils ne sont pas assez fréquents pour façonner le lit du cours d'eau. De Rosa *et al.* (2014) soulignent le rôle majeur d'un débit intermédiaire, appelé « débit formateur ». Il a été admis par Léopold *et al.* (1964) que celui-ci peut-être apparenté au débit de pleins bords, correspondant à une période de retour comprise entre 1 et 2 ans. Le débit de pleins bords a

été défini comme étant « la capacité d'écoulement du lit mineur juste avant de se déverser dans la plaine d'inondation » (Wolman et Leopold, 1957). Il constitue un indicateur hydromorphologique important dans la caractérisation de la géométrie des milieux aquatiques. En effet, il s'agit d'un débit intermédiaire morphogène façonnant le lit des cours d'eaux et en permet l'analyse de sa dynamique. C'est pourquoi il est essentiel de s'intéresser aux paramètres de pleins bords qui le définissent tels que le niveau ou la largeur.

Sur le terrain, la détermination du niveau de pleins bords passe par la recherche de multiples facteurs visibles tels qu'une rupture de pente entre la berge et la plaine d'inondation, des traces telles que la limite d'affouillements des sols, des marques sur les roches ou un dépôt de sédiments, ou encore les limites de végétation. Ainsi, cette détermination peut s'effectuer en considérant de multiples définitions dont cinq d'entre elles ont été comparées dans les travaux de Navratil (2005). Le haut de berge (ToB) et la rupture de pente (Bi) ont été identifiés par l'auteur après diverses expérimentations comme approchant le plein bord de la manière la plus réaliste, minimisant l'erreur de détermination (Figure 6 et Tableau 1).

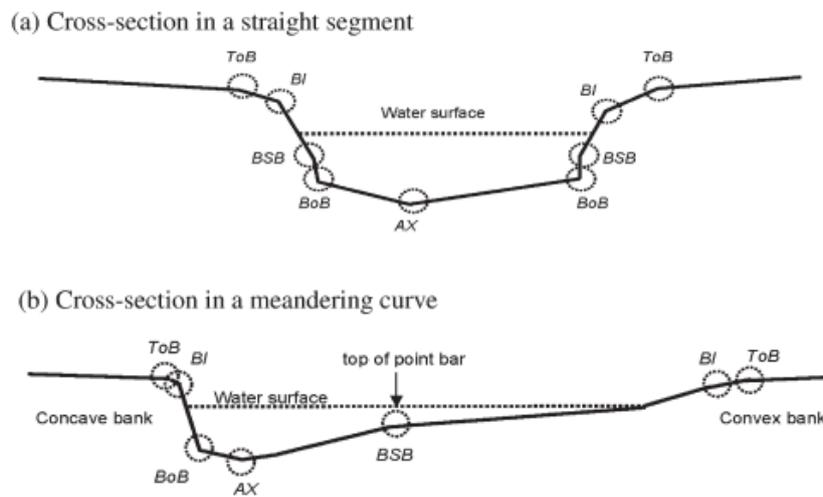


Figure 6 : Schéma de principe des différentes références de détermination du niveau à pleins bords
Source : Navratil et al., 2006

Tableau 1 : Définition des critères de référence
 Source : Navratil *et al.*, 2006

Identification	Definition	Description
BI	Bank Inflection	Break in bank slope, i.e. the end of the abrupt part of the channel's bank.
ToB	Top of Bank	Beginning of the floodplain, i.e. a relatively horizontal area.
WOL	Wolman (1955)	Channel width to mean depth minimum ratio.
WIL	Williams (1978)	Significant change in the relation between the wetted area and the top channel width.
RIL	Riley (1972)	First maximum local bank slope (Riley Bench Index Ri), from upper to lower elevation.

Copyright © 2006 John Wiley & Sons, Ltd.

Earth Surf. Process. Landforms **31**, 1345–1363 (2006)
 DOI: 10.1002/esp

Cependant dans la pratique, il n'est pas aisé de déterminer les paramètres de géométrie à pleins bords. Même si la théorie s'applique aisément aux cas simples, l'identification sur le terrain peut-être ardue lorsque la ripisylve se densifie, lors de la présence d'îles ou encore lorsque la section étudiée est très dissymétrique (Kreutzenberger *et al.*, 2017). Une île est un amas de sédiments émergé et végétalisé, abritant notamment plusieurs espèces pionnières locales au début de la succession écologique liée à sa formation. Celle-ci divise le chenal principal en deux bras singuliers. Il est alors nécessaire de prendre en considération les deux parties distinctes du lit mineur pour conserver une cohérence de calcul. (Figure 7)

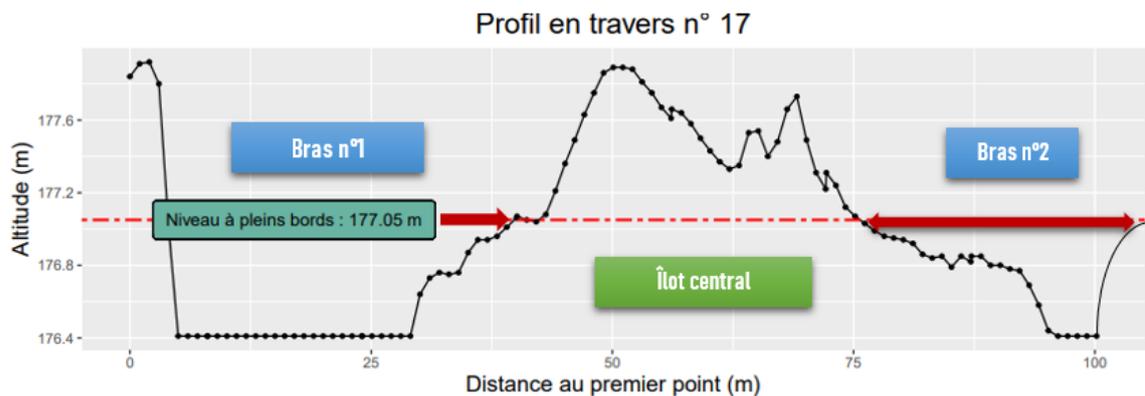


Figure 7 : Détermination des paramètres de pleins bords sur un site à chenaux multiples

Le niveau à pleins bords est positionné au niveau de la berge la plus basse tandis que la largeur associée est obtenue en sommant la largeur des deux bras constituant le lit mineur (flèches rouges).

De plus, la détermination de la largeur de pleins bords à l'échelle d'une section transversale peut-être ambiguë en cas d'érosion locale, sédimentation ou la présence de végétation dense. (Figure 8)

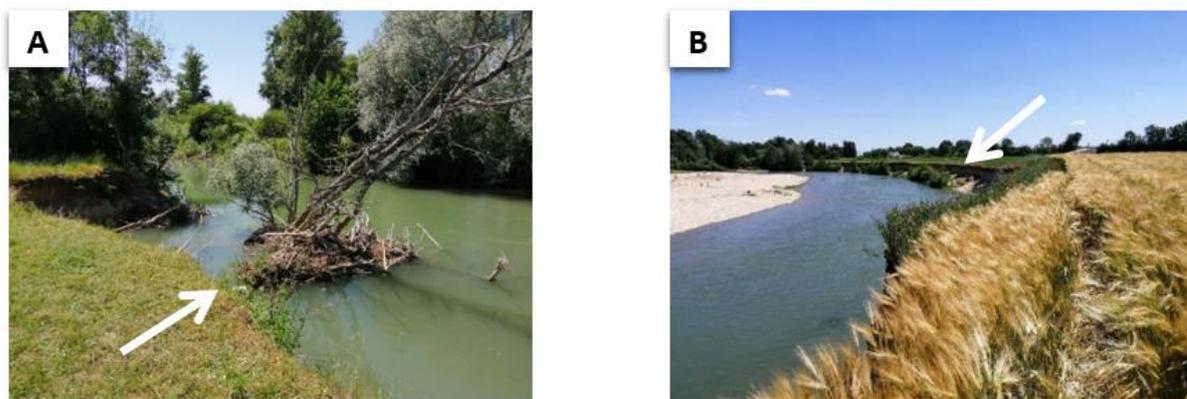


Figure 8 : Photographies du niveau à pleins bords selon la définition haut de berge

A : Végétation dense B : Forte érosion locale

Les flèches blanches matérialisent le haut de berge.

I.2.2 Intérêt pour la caractérisation et la comparaison des cours d'eau

Le niveau à pleins bords est un élément essentiel dans la compréhension du bon état des milieux aquatiques. Ce paramètre hydromorphologique permet principalement de comparer la morphologie des tronçons de cours d'eau mais également de quantifier l'influence anthropique sur le milieu (Navratil *et al.*, 2006). En complément de son action morphogène, le débit de pleins bords joue un rôle écologique pour les habitats et favorisent les échanges d'eau, de nutriment, de matières dissoutes au sein du système fluvial (Navratil *et al.*, 2006). Localement, le niveau de débordement peut-être fortement impacté par les variations du réseau hydrographique. Par exemple, les courbes et méandres peuvent influencer significativement à petite échelle. Sur des petits cours d'eau, des surlargeurs dues à des phénomènes externes très ponctuels, tels que le piétinement de la berge par des bovins ou la destruction de celle-ci suite à un arbre arraché lors d'une tempête, peuvent être présentes. Il est donc préférable de considérer un niveau moyen sur un tronçon correspondant à une longueur d'environ 15 à 20 fois la largeur de pleins bords Navratil (2005). L'auteur a également démontré que pour disposer d'une largeur suffisamment cohérente et représentative, il est indispensable de calculer une valeur moyenne sur 10 à 15 profils en travers. C'est pourquoi la nécessité d'étudier des tronçons étendus pouvant induire de fortes

distances inter-transects pose la question des limites d'acquisition terrain et l'exploitation de données plus adaptées telles que des ressources LiDAR représentant des grands linéaires de cours d'eau.

I.3 Lidar et Modèle Numérique de Terrain

I.3.1 Principe des technologies LiDAR

I.3.1.1 Généralités

La technologie LiDAR (Light Detection And Ranging) repose sur un principe de télédétection active. Elle emploie sa propre source d'énergie contrairement à celles dites passives comme l'imagerie optique, utilisant la lumière solaire ou encore le rayonnement thermique émis par les objets (Flamant, 2008) (Figure 9 A). Ainsi, un émetteur envoie un signal qui, après avoir heurté une surface (sol, arbre, bâtiment), sera réfléchi et mesuré en termes de temps de retour et d'intensité (Figure 9 B).

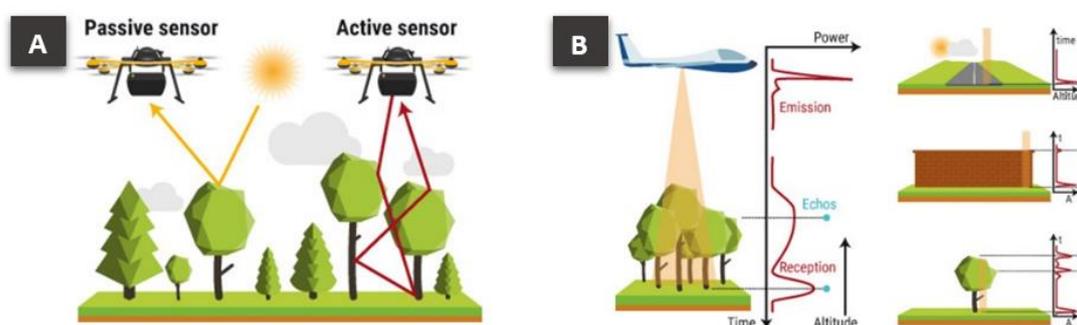


Figure 9 : Schémas de principe du LiDAR

Source : Yellowscan-lidar.com

A : Principe de télédétection active et passive

B : Principe de fonctionnement LiDAR

À la différence d'autres technologies telles que le RADAR (Radio Detection And Ranging) utilisant les ondes radio, un faisceau laser lumineux est utilisé ici. L'impulsion émise par le système LiDAR est répétée rapidement de façon à enregistrer un nombre d'acquisition pouvant aller jusqu'au million pour une zone couverte. Ce procédé permet de produire un nuage de points 3D monochrome correspondant à un réseau densifié du secteur cartographié.

En fonction des applications, deux gammes de longueurs d'onde sont à disposition : le proche infra-rouge pour décrire la topographie de façon continue sur tout

type de surface (qu'elle soit végétalisée ou non), et le vert spécifique à un usage bathymétrique (Axelson *et al.*, 2010 ; Lague *et al.*, 2016).

I.3.1.2 Le lidar topographique, bathymétrique et topo-bathymétrique

Pour l'étude des milieux aquatiques et en particulier des cours d'eau, nous nous intéressons à deux types de surfaces : les surfaces immergées (fond du lit) et les surfaces émergées (berges et la plaine alluviale).

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, les systèmes topographiques ne permettent pas de décrire le chenal en eau. Ils présentent toutefois une fréquence de balayage du faisceau supérieure à celles des systèmes bathymétriques et s'utilisent pour cartographier plus précisément le terrain hors eau. (Faux *et al.*, 2009). La précision des points obtenus est inférieure à 10 cm en altimétrie et à 20 cm en planimétrie (Lague *et al.*, 2016).

Le domaine proche infrarouge du spectre électromagnétique est compris entre 700 et 1600 nanomètre (Figure 10). Cette plage de fréquence permet à l'onde lumineuse de s'affranchir du couvert végétal et de le traverser. Son utilisation est donc particulièrement adaptée dans le but d'obtenir un modèle numérique de terrain d'un secteur masqué par la végétation et distingue cette technologie de la photogrammétrie notamment. Cependant, les LiDARs topographiques couplés à ce genre d'onde ne peuvent pénétrer les surfaces en eau et par conséquent ne fournissent pas d'informations sur les fonds aquatiques.

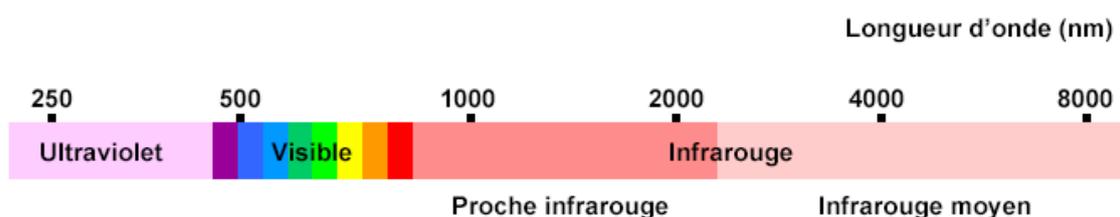


Figure 10: Spectre électromagnétique
Source : Géoportail.gouv

Plus adapté à l'étude approfondie des milieux aquatiques, le LiDAR dit bathymétrique, utilisant un faisceau laser de longueur d'onde appartenant à une gamme de fréquence verte, permet de pénétrer l'eau et topographier le fond du lit. Les fréquences de balayage atteintes par les émetteurs sont toutefois plus faibles en comparaison avec leurs homologues œuvrant en proche-infrarouge. Par conséquent, le maillage du MNT produit est

plus grossier (1 point/10 m² en moyenne, 1 point /1 m² pour un LiDAR topographique) et ce pour la plupart des appareils présents sur le marché. De plus, ce système ne permet pas de détecter les faibles profondeurs (< 0.5 m) qui sont essentielles pour les cours d'eau.

Le LiDAR dit topo-bathymétrique (tel que le EAARL ou le LiDAR Optech TITAN DW) a été développé pour pallier à ces limites. Il s'agit d'une technologie lidar combinant les systèmes d'acquisition aquatique et terrestre. Ainsi, un laser vert est couplé à un laser infra-rouge (Figure 11).

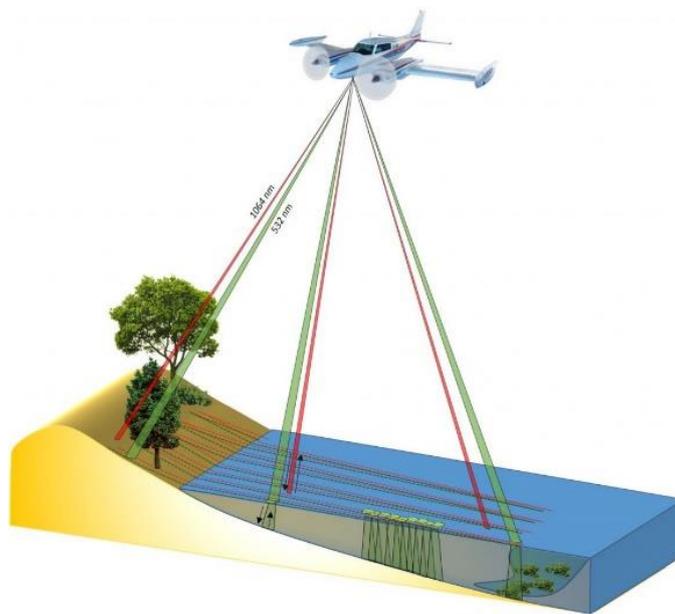


Figure 11: Principe d'acquisition d'un LiDAR topo-bathymétrique
Source : Lague et al., 2016

Une longueur d'onde proche infrarouge (fréquence 1064 nm) est utilisée pour cartographier le sol sous la végétation tandis qu'une longueur d'onde verte (532 nm) permet de d'acquérir l'information sous les surfaces en eau.

Ce système a été conçu pour l'étude de zones peu accessibles, présentant des restrictions d'accès ou des limites de sécurité au regard des caractéristiques du chenal. (Mc Kean *et al.*, 2009). Le capteur, tel que celui de l'EAARL, est constitué d'un faisceau laser à balayage à courte durée d'impulsion et à fréquence plus élevée que la gamme des lidars bathymétriques. Cette configuration de pulsations permet au système télémétrique de ne pas perdre en énergie. La tâche associée au laser est comprise entre 15 et 20 cm, peu importe la distance. Le trajet de chaque onde est étudié par un photo-détecteur pour en définir son amplitude et sa forme, nécessaires à une compréhension précise du temps de trajet parcouru

par le faisceau. Il est ainsi possible de réaliser une acquisition de données à haute résolution des zones aquatiques au relief prononcé tel que le lit des cours d'eau et les berges.

Actuellement, les deux limites principales concernent l'acquisition pour des profondeurs supérieures à 4 m et les caractéristiques de l'eau (turbidité ou présence de végétation aquatique) (Lague *et al.*, 2016).

I.3.2 Modèle Numérique de Terrain

I.3.2.1 Éléments de définition

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une description numérique tridimensionnelle du relief terrestre. Il est à différencier du modèle numérique de surface (MNS) qui prend en considération le sursol, c'est à dire les structures occupant le sol telles que la végétation ou les bâtiments (Figure 12).

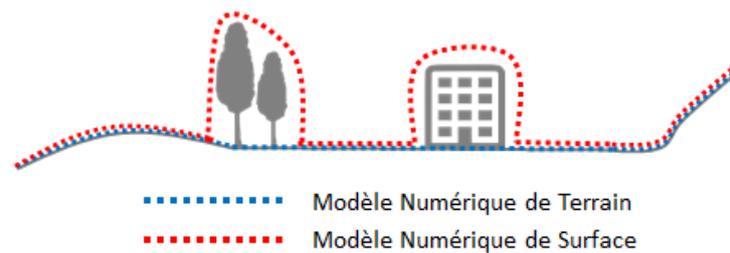


Figure 12: Différence entre MNT et MNS

Source : IGN

Comme indiqué précédemment, l'utilisation d'un nuage de points LiDAR permet de décrire le terrain sous la végétation notamment (Figure 13). Le MNT ne présente pas d'information aux endroits où le sol n'est pas défini comme c'est le cas pour les surfaces en eau où le faisceau laser du système LiDAR topographique se fait absorber très largement. De plus, pour les berges ou autres zones abruptes, le sol peut-être mal défini.

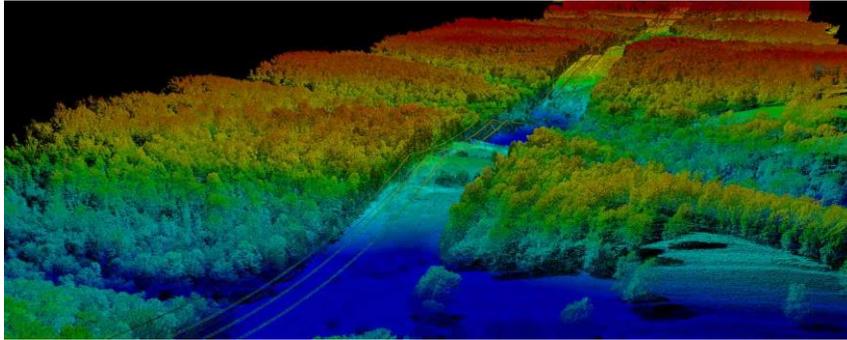


Figure 13 : Nuage de points acquis par LiDAR
Source : Escadrone

Une fois les points du sursol écartés, une interpolation des données du sol est réalisée en suivant un maillage prédéfini (IGN). Ce dernier peut-être régulier, généralement de forme rectangulaire ou carré. Dans ce cas, la création du MNT conduira à générer des données raster, c'est-à-dire une grille de pixels homogènes ordonnés en ligne et en colonne et dont la taille de la maille influe sur la qualité du MNT. Plus celles-ci seront étroites, plus le niveau de détail sera élevé. A chacun des nœuds du maillage est associée une information altimétrique. (Figure 14)

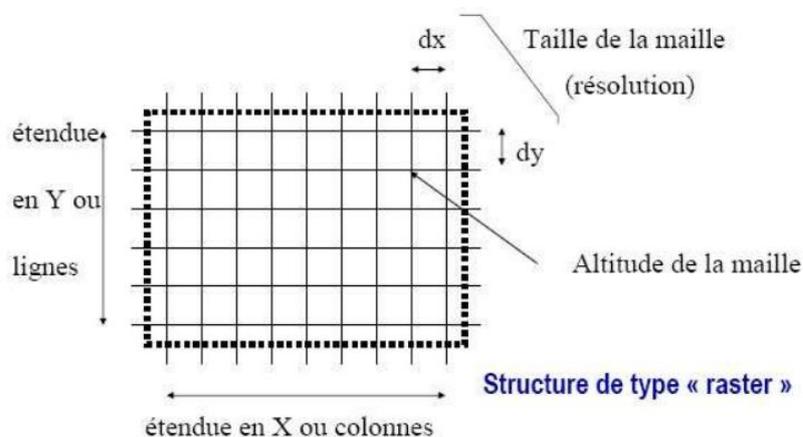


Figure 14 : Maillage régulier carré
Source : Univ-montp3.fr

Une autre possibilité consiste en l'utilisation d'une triangulation irrégulière pour le maillage donnant lieu à un MNT TIN (Triangular Irregular Network). Contrairement à un maillage régulier, cette méthode présente l'avantage de contrôler la densification des données souhaitées selon les zones. Ainsi, si le nuage de points est peu fourni au niveau d'un

site spécifique alors il est possible de limiter les interpolations selon les données disponibles pour réduire les biais sur la zone (Figure 15).

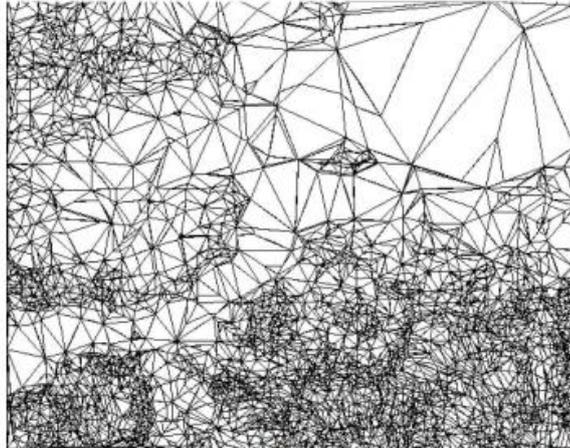


Figure 15 : Maillage irrégulier
Source : Univ-montp3.fr

Les MNT peuvent être représentés selon plusieurs procédés. La technique d'ombrage permet de mettre en évidence la topographie du terrain (El Hage, 2012). (Figure 16)



Figure 16 : Section du MNT du Cher représentée selon la méthode d'ombrage

Aujourd'hui peu de méthodes permettent de travailler efficacement directement à partir d'un nuage de points car cela implique de réaliser des calculs à partir de données volumineuses. Le recours à un MNT est souvent préféré et dans le cadre de notre étude un format raster sera utilisé. Un maillage TIN peut-être une solution alternative mais ne présente ici aucun avantage puisque la densité de points du nuage acquis par LiDAR est suffisante et permet de couvrir avec un degré de détail identique l'ensemble de la plaine alluviale des

grands cours d'eau. De plus, de par la méthode d'acquisition proche infra-rouge, il n'est pas possible d'obtenir la forme du fond du lit. Une interpolation selon un maillage irrégulier n'est pas donc pertinente puisque les biais seraient trop importants.

I.3.2.2 RGE ALTI

Divers organismes assurent la mise à disposition de ressources MNT LiDAR suite à des campagnes d'acquisition. Celles-ci s'inscrivent dans le cadre de la directive européenne dite « inondation » et référencée 2007/60/CE. Les états membres de l'union européenne doivent assurer la sécurité des populations exposées aux risques d'inondation en ayant connaissance de leur territoire. Ainsi, la France a mis en place une stratégie d'évaluation préliminaire des risques visant à effectuer un état des lieux de ses milieux aquatiques. C'est pourquoi depuis 2007 des organismes assurent des relevés LiDAR à grande échelle des plaines alluviales des cours d'eau français.

C'est notamment le cas de l'Institut géographique National (IGN) qui procède à la mise à jour continue du RGE ALTI grâce à ses différents levés et permet d'alimenter la connaissance du territoire. Le RGE ALTI est un « modèle numérique de terrain maillé qui a pour vocation la description du relief français » (RGE ALTI). Les MNT sont calculés au pas de 1m, avec des dérivés proposés au pas 5m pour offrir une gamme de résolutions plus large en fonction des besoins. Cette base de données s'adapte efficacement à notre problématique d'étude puisque des ressources MNT sont disponibles pour chacune des grandes plaines alluviales françaises et permettent ainsi d'assurer le critère de reproductibilité de la méthode développée en offrant la possibilité d'une application sur l'ensemble des grands cours d'eau.

La Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL) réalise également des campagnes d'acquisition en missionnant des sociétés spécialisées. Cependant, des différences de traitement sur les produits livrés sont visibles. Par exemple, les MNT en provenance de la DREAL présentent une absence de données au niveau des surfaces en eau (Figure 17). Sur les MNT du RGE ALTI, ces dernières sont mises à plat par plan inclinés ou paliers successifs (RGE ALTI) (Figure 18).

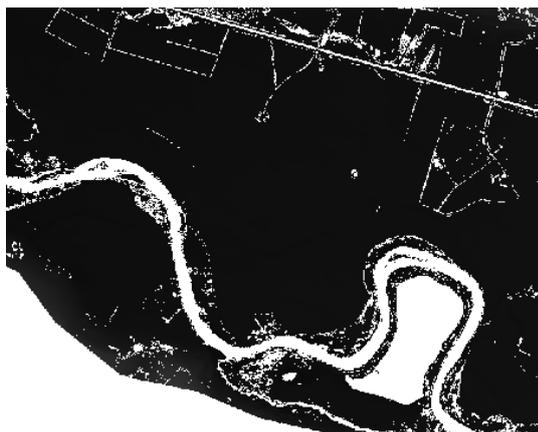


Figure 17 : Absence de données au niveau des surfaces en eau sur un MNT DREAL

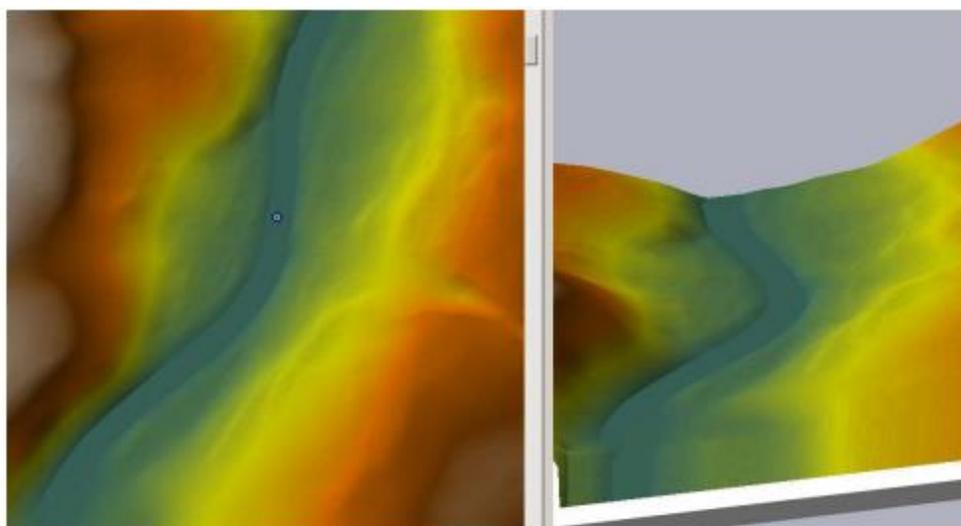


Figure 18 : MNT du RGE ALTI : Surfaces en eau mises à plat
Source : RGE ALTI

I.3.2.3 Description des données utilisées

Pour nos travaux, un MNT raster du Cher a été utilisé. Celui-ci est issu d'un relevé lidar aéroporté topographique pour le compte de DREAL réalisé en 2011.

La DREAL centre Val-de-Loire propose un accès gratuit aux ressources MNT descriptives du bassin hydrographique associé à la Loire (<http://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr/modele-numerique-de-terrain-mnt-a2091.html>).

Une partie du site amont du Cher s'écoule dans des zones engorgées ou au sein de vallées très encaissées. Les données brutes LiDAR ne sont pas disponibles pour cette zone. Ainsi, les ressources à disposition couvrent le secteur compris entre Montluçon et la confluence avec la Loire. Le nuage de point a été acquis lors d'une période de basses eaux.

Il offre une précision planimétrique de 0.03 m et de 0.015m en altimétrie. Le nuage a été interpolé suivant un maillage régulier au pas de 1m.

I.4 Présentation du site d'étude

I.4.1 Localisation

Le Cher est l'un des principaux affluents de la Loire. Il prend sa source près de la commune de Mérinchal dans la Creuse (23), à 717m d'altitude, et traverse sept départements dont celui de l'Allier, d'Indre-et-Loire et du Puy-De-Dôme (Figure 19). Celui-ci partage une zone de confluence avec la Loire située à l'aval de Tours, sur le territoire de Villedary, à 38 m d'altitude. Le Cher s'étend sur plus de 365 km de distance, totalisant à lui seul une surface hydrographique d'environ 14 000 km² (Depret, 2014).

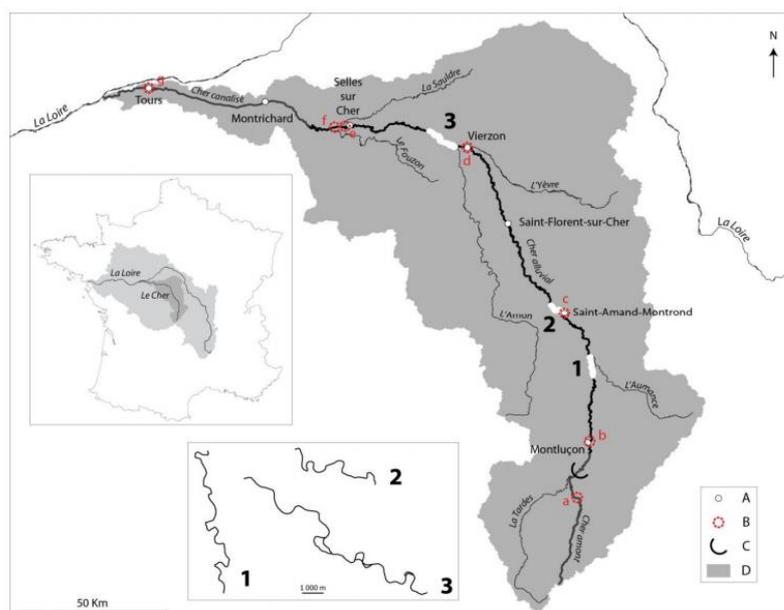


Figure 19 : Bassin versant du Cher
Source : Depret, 2014

Ces travaux s'appuieront dans un premier temps sur un linéaire du Cher situé à l'aval de Saint-Amand-Montrond, délimité au Nord par la commune de Bruère-Allichamps, et pour lequel nous disposons de données comparatives du plein bord validées par photo-interprétation et complétées par des enquêtes terrains.

I.4.2 Caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques

Les caractéristiques géomorphologiques du Cher permettent la division de son linéaire en trois sections principales. A l'amont, et plus précisément de sa source jusqu'à la commune de Montluçon, on observe des secteurs à fortes pentes et des zones engorgées (Figure 20). Des vallées encaissées sont également présentes et la plaine alluviale demeure très étroite (Depret, 2014). L'écoulement du Cher se poursuit jusqu'à Saint-Aignan, déterminant ainsi une deuxième section dans laquelle la plaine alluviale s'élargit considérablement. Enfin, la section joignant Saint-Aignan à la confluence Loire-Cher correspond à une portion canalisée en conséquence des barrages érigés au cours du XIXème siècle pour rendre le tronçon navigable.

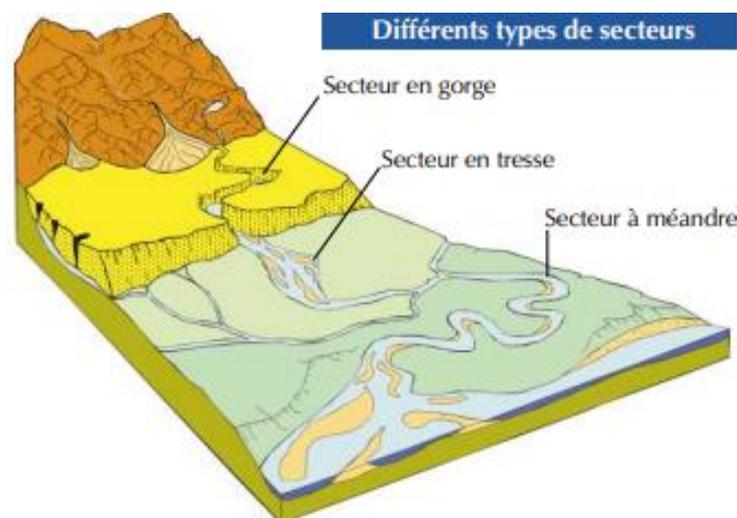


Figure 20: Schéma de principe d'un secteur en gorge, en tresse et à méandre
Source : Seq-Physique

Concernant les propriétés hydrologiques, ce cours d'eau accueille trois types de crues : océanique, cévenole et mixte. Les crues océaniques surviennent suite à des dépressions venant de l'Atlantique. Les deuxièmes correspondent à des épisodes de remontée d'air chaud méditerranéen et au déversement associé de précipitations orageuses sur l'amont du bassin hydrographique (Depret, 2014). Les crues mixtes quant à elles qualifient une combinaison des deux précédentes et agissent sur l'entièreté du bassin.

II Méthodes

II.1 Méthodes existantes dans la littérature

L'émergence et la démocratisation relativement récente des données topographiques haute fréquence tel quel les MNT pose la question de la détermination numérique des paramètres à pleins bords. La littérature a permis d'identifier deux grands groupes de méthodes.

II.1.1 Calcul de la profondeur hydraulique

Un premier type d'approche, développé par Faux et al. (2009) et De Rosa et al. (2019), repose sur l'étude de la variation de la profondeur hydraulique au droit de profils transversaux. La profondeur hydraulique correspond au rapport de la surface de la section mouillée du chenal et de la largeur au miroir (Figure 21). Dans cette méthode, chaque profil en travers est traité indépendamment des autres. Les paramètres pris en entrée sont au nombre de deux : un MNT représentant le cours d'eau étudié, une ligne vectorielle définissant le centre du chenal. C'est à partir de cette dernière que les transects sont générés.

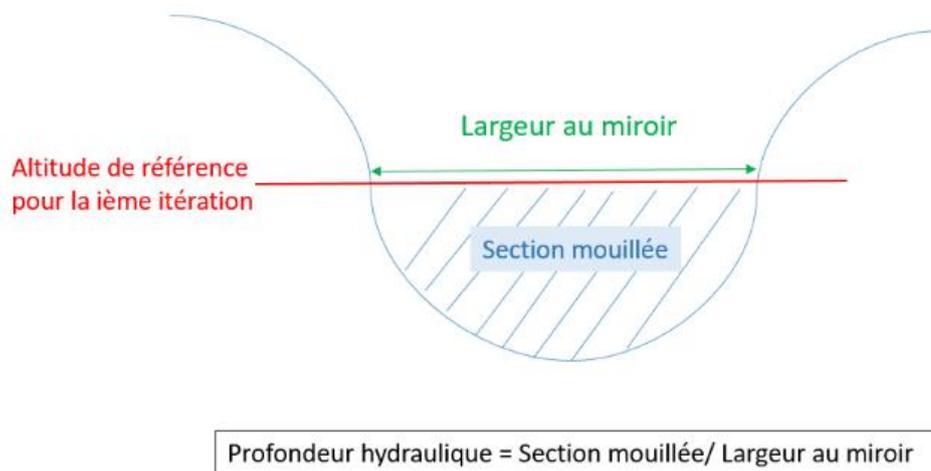


Figure 21: Schéma de principe du calcul de profondeur hydraulique

Pour une altitude donnée, on effectue le rapport entre la valeur de la surface mouillée (ici en bleue) et la largeur parallèle à cette surface reliant les 2 berges (ici en vert).

La mise en place d'itérations successives permet d'obtenir une valeur de profondeur hydraulique associée à chaque niveau d'altitude. On considère ensuite que la valeur maximale de la courbe de la profondeur hydraulique en fonction de l'altitude correspond au niveau de plein bord. En effet dès lors que les eaux atteignent ce seuil, elles se déversent dans la plaine d'inondation et la surface 2D du profil en travers n'augmente plus significativement en comparaison de la largeur au miroir qui continue à croître (Figure 22). Le résultat du rapport de la surface de la section mouillée par la largeur décroît passé ce point.

Une procédure de lissage de la courbe de profondeur hydraulique est mise en œuvre pour éliminer l'éventuel bruit provoqué par un masque de végétation dense ou à des variations naturelles très locales du lit, créant ainsi des maxima locaux pouvant tromper la reconnaissance du plein bord.

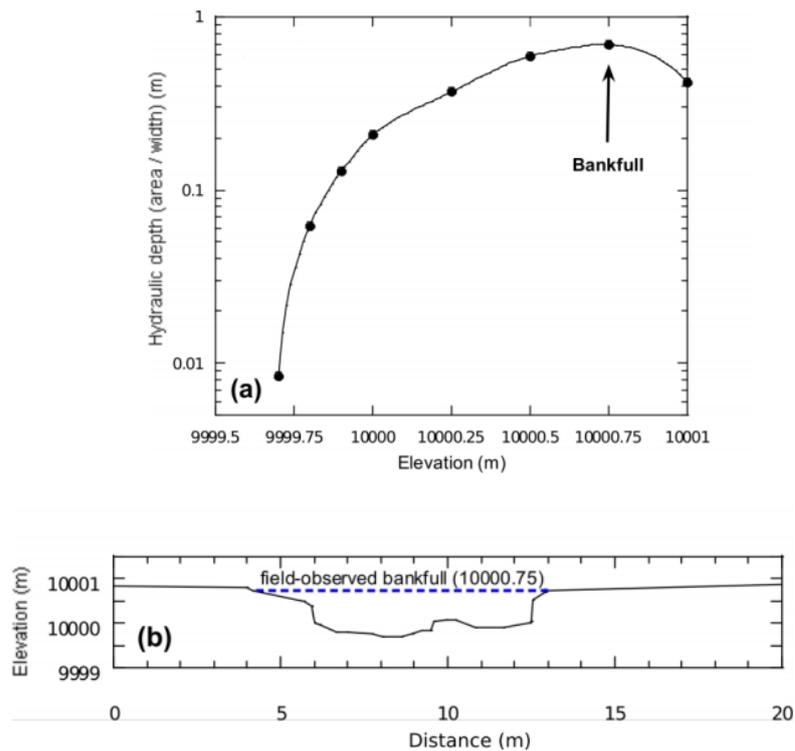


Figure 22: Courbe de profondeur hydraulique en fonction de l'altitude

Source : De Rosa *et al.*, 2019

- A : Le maximum de la courbe de profondeur hydraulique en fonction de l'altitude (ici selon des valeurs arbitraires) est identifiée comme niveau à plein bord.
- B : Ce niveau est reporté sur le profils en travers correspondant et semble bien coïncider avec le critère haut de berge.

II.1.2 Recherche de la courbure minimale du relief

Une seconde méthodologie de reconnaissance du niveau de pleins bords à partir d'un MNT a été initiée par Sofia *et al.* (2015). Basée sur l'analyse des courbures du relief du terrain, elle vise à exploiter la géométrie du MNT pour calculer des largeurs, notamment celle relative au plein bord (Figure 23).

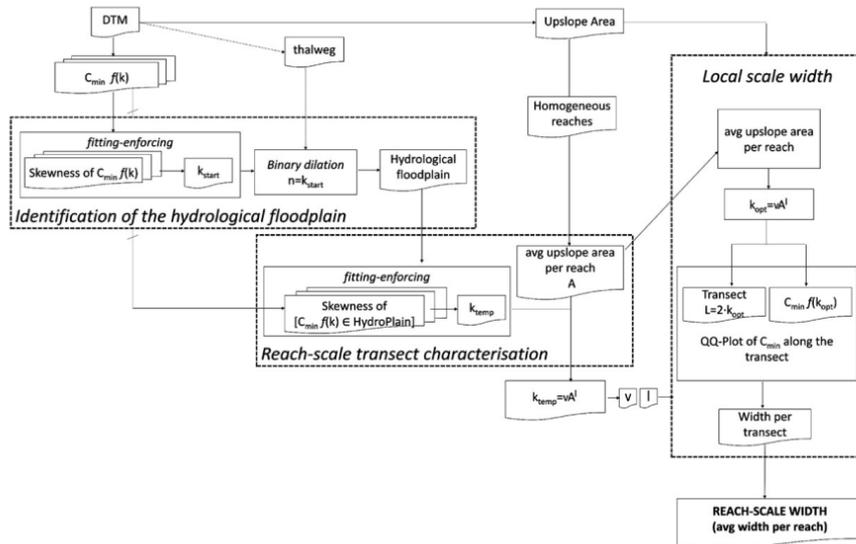


Figure 23 : Procédure de détermination de la largeur à pleins bords par analyse des courbures du relief
Source : Sofia *et al.*, 2015

La procédure nécessite un MNT (DTM) ainsi qu'un raster représentant le thalweg (ligne des points de plus basse altitude du lit de la rivière) et suit 3 étapes distinctes : l'identification de tronçons homogènes et de la plaine alluviale, une caractérisation des transects orthogonaux au thalweg, le calcul des largeurs associées.

II.1.2.1 Identification des tronçons homogènes et des plaines alluviales associées

Une analyse préalable permet d'identifier des sections homogènes du cours d'eau en considérant une augmentation progressive du bassin versant (Figure 23 a). Pour chacun des tronçons reconnus, la plaine alluviale associée est déterminée en utilisant la notion de courbure minimale (C_{min} , équation 1) sur le MNT LiDAR.

$$C_{min} = k \cdot g \cdot (-a - b - \sqrt{(a - b)^2 + c^2})$$

Équation 1 : Courbure minimale

Ici, utilisée selon une approche d'estimation par noyau, où k correspond à la taille de la fenêtre mobile, g à la résolution du MNT et a , b , c des coefficients issu d'un ajustement à sa surface d'origine.

Suite à une procédure d'ajustement sur les valeurs de C_{min} développée par Sofia *et al.* (2011), le programme génère un masque binaire équidistant de part et d'autre de la ligne de thalweg. Cet espace correspond à la plaine alluviale. (Figure 24)

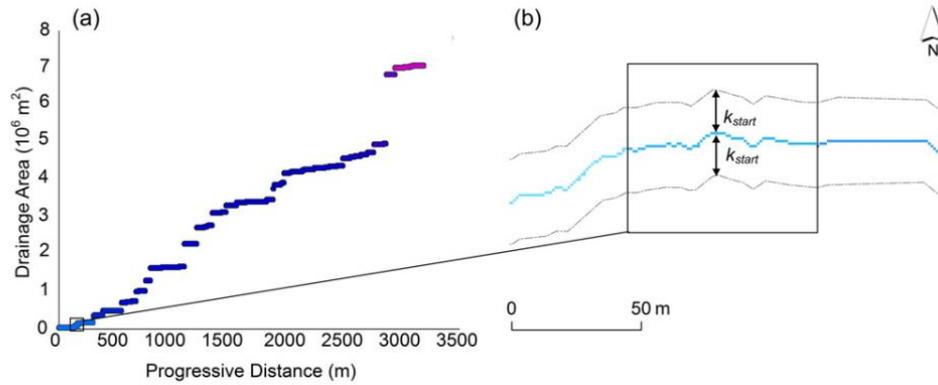


Figure 24 : Détermination de la plaine alluviale pour un tronçon
Source : Sofia et al, 2015

a) Les divers tronçons homogènes

b) Le masque binaire est appliqué de chaque côté de la ligne de thalweg avec une largeur k_{start} équivalente à la valeur du noyau retenu par le processus.

II.1.2.2 Génération des transects

Premièrement, afin de procéder à une étude locale de la largeur à pleins bords pour en observer par la suite une tendance moyenne à l'échelle du tronçon, Sofia *et al.* (2015) procède à la création de transects pour chacune des sections homogènes.

La procédure d'ajustement utilisée précédemment est maintenant réitérée sur les valeurs obtenues par C_{min} dans la plaine alluviale et permet de déterminer une taille de noyau (k_{temp}). Les auteurs ont pu dresser un lien hydraulique entre le bassin versant et le tronçon, matérialisé par l'équation 2.

$$k_{opt} = v \cdot A^l$$

Équation 2 : Relation entre le bassin versant et la courbure du tronçon

Où k_{opt} est la taille optimale du noyau pour évaluer la courbure, A est la surface du bassin versant et v et l correspondent à des constantes dérivées de l'ajustement par les moindres carrés (selon les valeurs k_{temp} obtenues précédemment).

Cette relation élimine les valeurs aberrantes de noyaux déterminées suite à des morphologies naturelles ou artificielles du chenal et agit comme semblable à l'étape de lissage de la méthodologie hydraulique vue dans la partie précédente.

La longueur du transect est retenue équivalente à k_{opt} de part et d'autre du thalweg.

II.1.2.3 Caractérisation de la largeur de la berge

Pour chaque transect, la courbure du relief est assimilée à la géométrie du chenal. Une étude statistique quantile-quantile plot des valeurs de C_{min} le long du thalweg permet d'identifier un seuil pour lequel celles-ci s'éloignent d'une distribution théorique normale, traduisant ainsi le niveau de pleins bords. En effet, Lashermes *et al.* (2007) puis Passalacqua *et al.* (2010) ont démontré qu'une importante variation par rapport à la loi de probabilité de la courbure traduisait un seuil critique pouvant s'apparenter dans ce cas à une rupture nette du relief et à un déversement de l'eau du chenal dans la plaine d'inondation. Cette déviation correspond au premier point n'appartenant pas à la droite de régression linéaire (Figure 25 A). Une fois le seuil déterminé pour le transect, la largeur à pleins bords est obtenue par intersection entre la ligne des valeurs de courbure et du seuil (Figure 25 B).

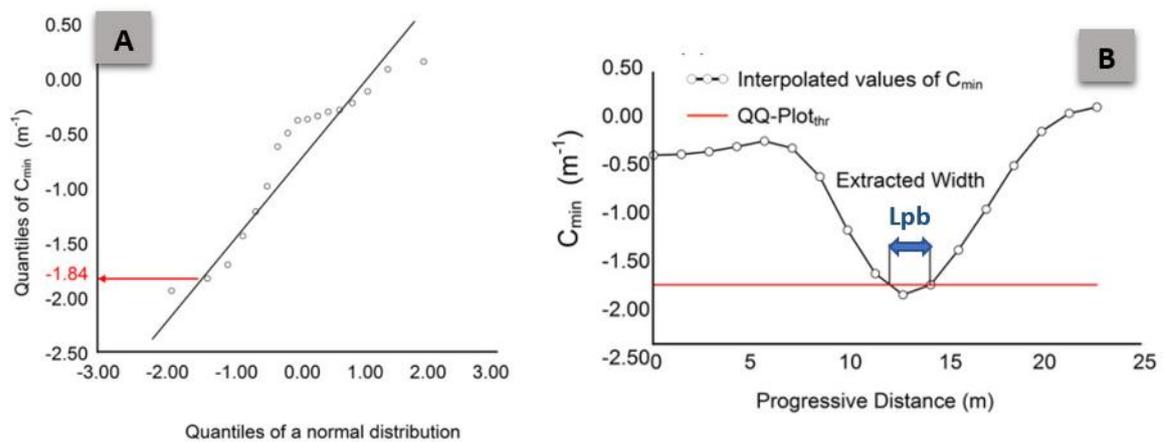


Figure 25: Détermination de la largeur à pleins bords par approche statistique Q-Qplot

Source : Sofia *et al.*, 2015

A : Détermination du seuil selon l'approche Q-Qplot sur les quantiles des valeurs de C_{min} .

B : La largeur à pleins bords (L_{pb}) correspond à l'intersection entre la ligne de courbure et le seuil.

II.1.3 Résultats et limites du calcul par profondeur hydraulique

De Rosa *et al.* (2019) ont analysé les résultats obtenus par l'outil développé en leur opposant des observations déterminées par photo-interprétations et confirmées par des enquêtes terrains complémentaires réalisées par un opérateur spécialisé dans la détermination du niveau plein bord.

Dans le cas d'un cours d'eau à chenal unique comme la rivière du Tibre située en Italie, la méthode de calcul par profondeur hydraulique est capable d'estimer la largeur à pleins bords avec une précision de l'ordre de deux mètres.

Pour la rivière Paglia présentant des tronçons à chenaux multiples, la précision est nettement dégradée avec une dizaine de mètres d'erreur (Tableau 2).

Tableau 2 : Comparaison entre le niveau à pleins bords estimé automatiquement par l'outil et les valeurs obtenues par photo-interprétation.

Source : De Rosa et al., 2019

Description	Tevere Reach	Paglia Reach
real mean bankfull width (m)	36.80	65.79
plugin mean bankfull width (m)	34.87	52.22
difference (m)	1.93	13.58
difference %	5.23%	20.63%
mean difference	1.93	13.58
standard deviation error	5.73	35.67

La méthode semble détecter les paramètres à pleins bords avec cohérence sur des cours d'eau à chenal unique dont le lit présente une rupture de pente bien marquée avec la plaine alluviale au niveau du haut de berge. Cependant, dans le cas d'une rivière à morphologie plus complexe, l'erreur de détermination du niveau à plein bord augmente fortement. On note deux principaux cas limites : les secteurs à chenaux multiples et les zones présentant des banquettes alluviales. Le cas des tronçons à chenaux multiples n'est pas abordé dans la littérature. Sur le deuxième point, les auteurs font le choix de considérer la première terrasse et de retenir l'altitude de la rupture de pente associée à celle-ci comme niveau à pleins bords. En effet, pour une rivière en équilibre il est admis que le niveau à plein bord se situe généralement à hauteur de la première terrasse. Dans le cas contraire, ce raisonnement entrainera une sous-estimation de ce dernier (De Rosa et al, 2019).

Toutefois, il y a parfois une confusion numérique entre terrasse et banquettes alluviales. Par définition, la terrasse correspond à un ancien niveau de la plaine d'inondation formé par des dépôts alluviaux, ne faisant plus partie de celle-ci et ne devant donc pas être inclus dans le chenal à pleins bords (Clozier, 1936). A l'inverse, une banquette alluviale est un replat dans le lit mineur plus haut que le lit d'étiage. C'est un élément en relation avec la dynamique actuelle du cours d'eau et qui doit être inclus. (Figure 26)

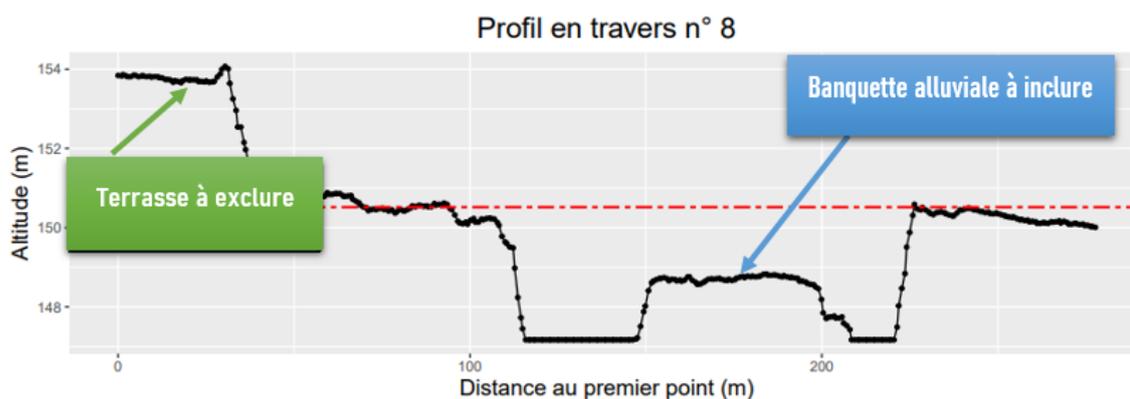


Figure 26: Illustration d'une terrasse et d'une banquette alluviale

II.2 Méthode mise en place

Pour nos travaux, il a été décidé de reproduire l'une des deux méthodes en vue de lui apporter d'éventuelles améliorations. L'approche par profondeur hydraulique développée par De rosa *et al.* (2014) a été retenue puisque celle-ci semble plus adaptée au concept de niveau à pleins bords au sens de notre étude sur de grands cours d'eau parfois artificialisés. En effet, l'interprétation de ce dernier sur un milieu ayant subi des activités anthropiques telles que l'extraction de granulats dans son lit mineur paraît plus difficile par une analyse de courbure de par les variations du relief du lit apportées par ces activités.

Ainsi afin de l'appliquer, de l'évaluer et de tenter d'apporter des améliorations, nous avons reproduit cette méthode sous R et tester d'autres critères de détermination du niveau à pleins bords.

II.2.1 Principe général et mise en œuvre

II.2.1.1 Les grandes étapes

La méthode de détermination des paramètres de géométrie à pleins bords par calcul de profondeur hydraulique repose sur plusieurs étapes : 1) la génération de transects orthogonaux le long du linéaire du cours d'eau ; 2) le calcul de la profondeur hydraulique (Figure 27) ; 3) la détection du niveau de pleins bords à partir du MNT pour chacune des coupes transversales (Figure 28) ; 4) le calcul de la largeur.

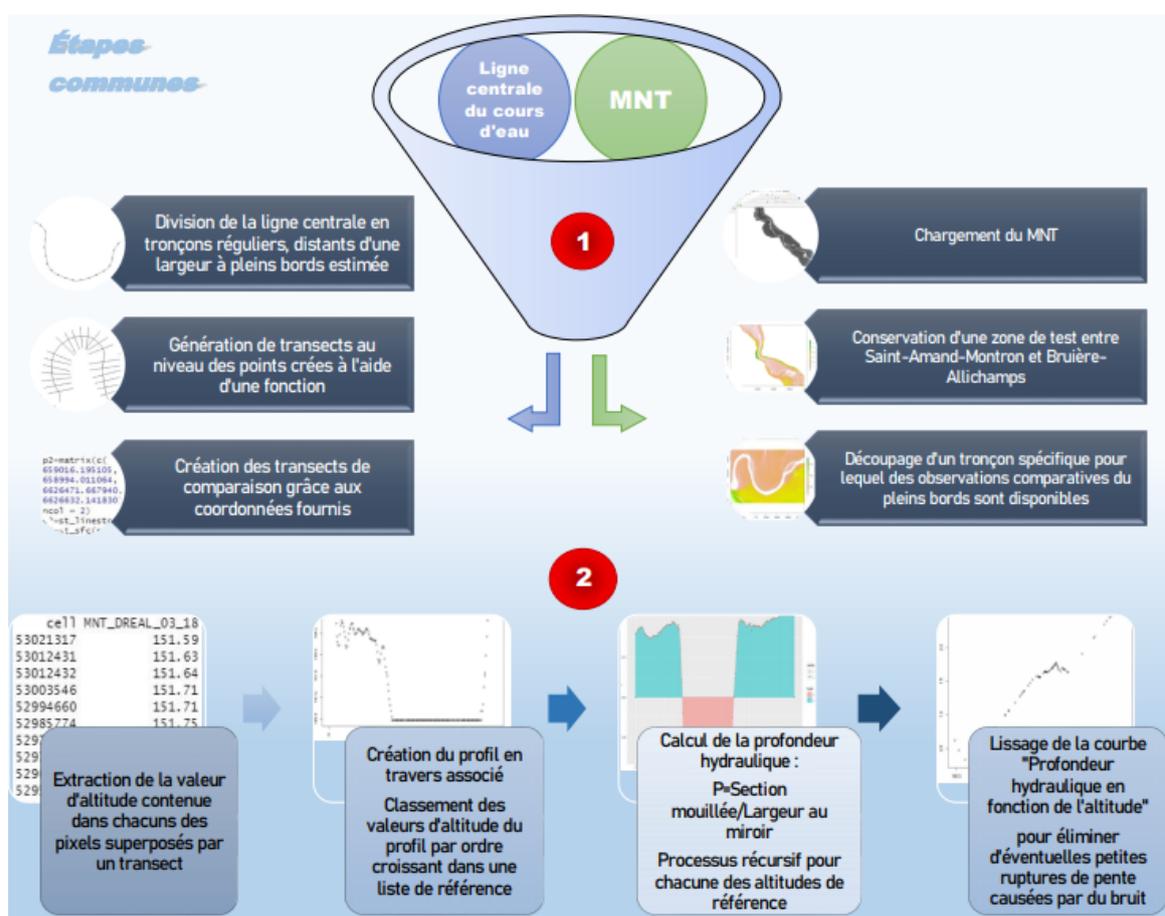


Figure 27 : Schéma de principe des étapes 1 et 2 de la reconnaissance automatique du niveau à pleins bords

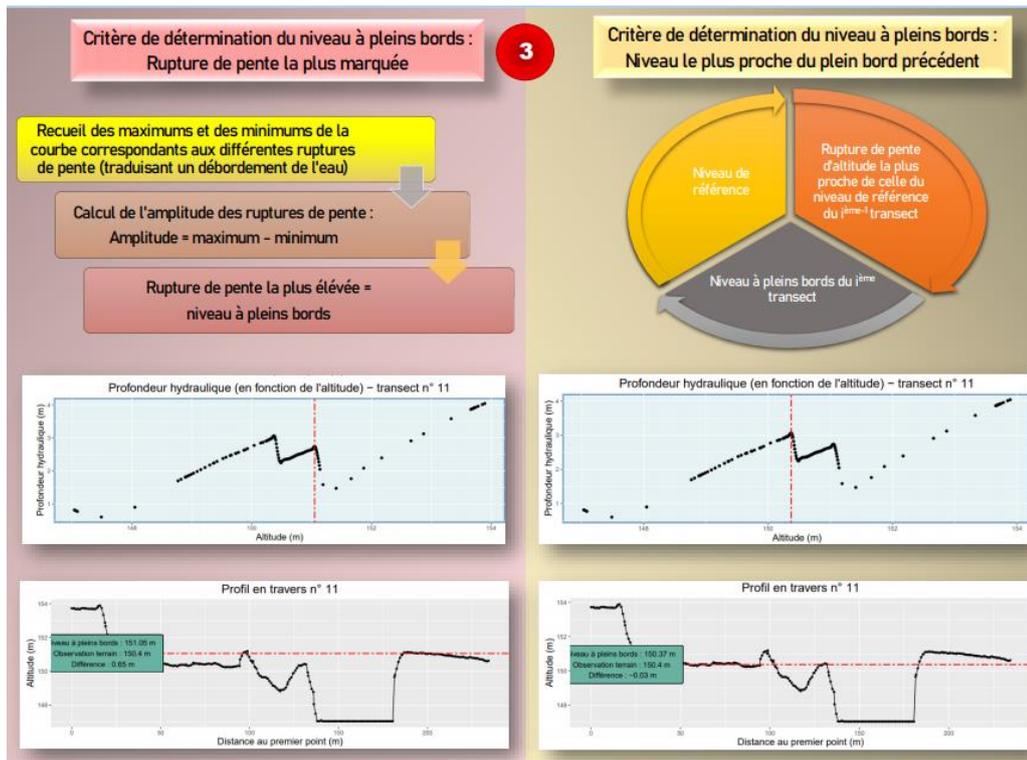


Figure 28 : Schéma de principe de l'étape 3 de la reconnaissance automatique du niveau à pleins bords

Deux ressources sont nécessaires à l'utilisation du programme développé sous R : un MNT ainsi qu'une ligne vectorielle matérialisant le centre du chenal. Un ajustement de la ligne centrale est effectué sur les secteurs à chenaux multiples afin de créer une géométrie nouvelle passant par le milieu des deux bras du cours d'eau. Cette étape est réalisée afin de ne pas introduire d'indépendance entre les bras et de respecter au maximum l'orthogonalité de calcul entre ces derniers, assurant ainsi une cohérence dans la détermination des paramètres de pleins bords.

Des coupes transversales sont ensuite générées le long de la ligne vectorielle modifiée, espacées selon une distance inter-transect égale à une largeur de pleins bords estimée pour le cours d'eau étudié.

Par la suite, un procédé récursif est mis en place dans lequel chacune des itérations va permettre de réaliser successivement les étapes suivantes pour l'ensemble des coupes :

1. Les valeurs d'altitudes sont extraites des pixels du MNT superposés par la ligne de transect conduisant à la formation d'un profil en travers 2D.
2. Une seconde structure itérative propre au calcul de profondeur hydraulique a été programmée. Pour celle-ci, chaque itération prendra en considération de

façon croissante une valeur d'altitude de référence sur l'ensemble des altitudes formant le profil en travers. Les aires entre la droite d'altitude de référence et la courbe du transect sont calculées et la plus grande surface négative est retenue comme section mouillée ainsi que sa largeur associée pour le calcul de profondeur hydraulique. Chaque itération fournit ainsi une valeur de profondeur hydraulique.

3. Une fois l'ensemble des valeurs obtenues pour un profil en travers, il est possible d'établir la courbe de profondeur hydraulique en fonction de l'altitude. Un lissage est effectué sur celle-ci afin d'éliminer le bruit engendré par des ruptures de pentes provoquées notamment par une discontinuité local du relief ou par la présence de végétation dense ayant obstrué le passage du faisceau LiDAR.
4. Des critères permettent de sélectionner la rupture de pente associée au niveau de débordement dans la plaine alluviale. La largeur à plein bord est calculée en conséquence de l'altitude retenue et de la morphologie du secteur (chenal unique ou secteur à double bras).

Enfin, lorsque l'ensemble des transects ont été soumis à ces différentes étapes et que leurs paramètres à pleins bords ont été déterminés automatiquement, les largeurs sont recalculées pour chacun d'entre eux selon une fenêtre glissante et ce afin d'obtenir des largeurs à l'échelle du tronçon et non plus locales, peu significatives. Basé sur le protocole CARHYCE, la moyenne des largeurs de 14 transects amonts est attribuée comme valeur du $i+15^{\text{ème}}$ transect.

II.2.1.2 Secteur test pour l'élaboration de la méthode

Comme indiqué précédemment lors de la description des MNT utilisés, nous avons effectué nos tests sur le linéaire du Cher compris entre Saint-Amand-Montrond et Bruère-Allichamps (Figure 29).

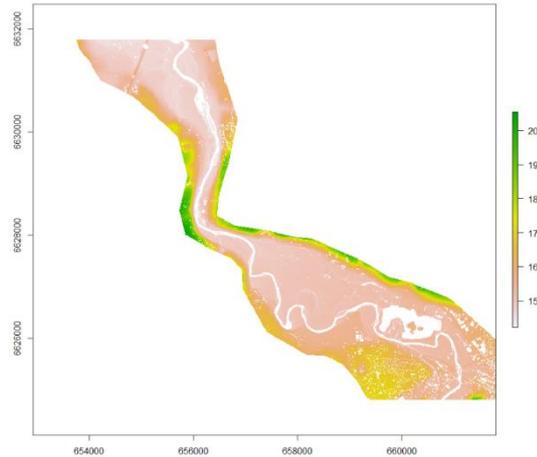


Figure 29 : Secteur utilisé entre Saint-Amand-Montrond et Bruère-Allichamps.

II.2.1.3 L'environnement spatial dans R

R est un langage de programmation open source permettant le traitement et l'organisation d'ensembles de données. Une riche implémentation de tests statistiques et de vastes possibilités graphiques rendent son utilisation particulièrement adaptée à l'étude de données géographiques et biologiques. De plus, de nombreuses fonctionnalités de calculs sont développées par la communauté des utilisateurs de R et disponibles à travers des extensions téléchargeables à partir du CRAN (The Comprehensive R Archive Network) à l'adresse suivante : <https://cran.r-project.org/>

Pour les besoins de notre étude, nous travaillons principalement avec les bibliothèques « sf » et « raster ». La première permet la gestion des objets spatiaux au format vecteur tandis que la seconde offre un panel de fonctions utiles à la lecture, la manipulation et l'écriture de données raster tel que le MNT.

Dans ce travail, nous manipulons des données dont la géométrie spatiale repose essentiellement sur trois types d'entité : point, linestring (une séquence de points reliés entre eux par des lignes droites, sans recoupement), multilinestring (un ensemble de linestrings assemblées entre elles pour ne former qu'une seule et même entité) (Lovelace et Nowosad, *geocomputation with R*) (Figure 30).

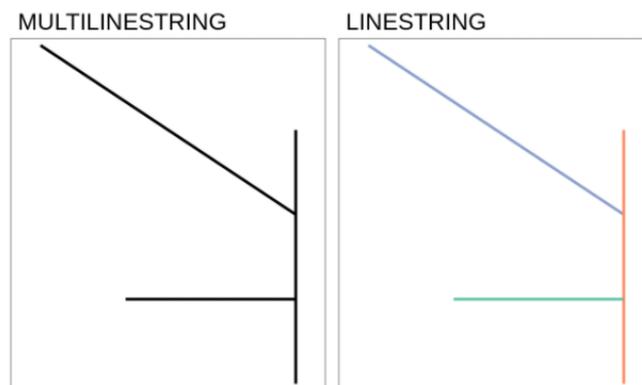


Figure 30 : Caractéristiques des géométries spatiales linéaires de R
Source : Geocomputation with R

Les objets utilisés permettant la gestion des données tout au long de la chaîne de traitement sont également de trois types : vecteur (ensemble de valeurs de même nature telles que numériques, booléennes ou chaînes de caractères), liste (ensemble d'objets de dimension et de nature hétérogènes), tableau de données ou *dataframe* (ensemble de vecteurs de même longueur, de natures diverses et assemblés). (Figure 31)

```

A > vecteur_surfaces
[1] 7.136418e+01 -1.553963e+02 5.131336e-01 -2.899846e-02 1.815916e-03 -1.527402e+01 1.229018e+00 -2.403284e-01

B > liste_coord_globale
[[1]]
[1] 0.000000 1.000000 1.414214 2.236068 3.162278 4.123106 4.472136 5.385165 6.324555 7.280110 7.615773 8.544004 9.486833 10.440307
[15] 11.401754 11.704700 12.649111 13.601471 14.560220 14.866069 15.811388 16.763055 17.720045 18.681542 18.973666 19.924859

[[2]]
[1] 20.25317 20.88061 21.84033 22.13594 23.08679 24.04163 25.00000 25.96151 26.24881 27.20294 28.16026 29.12044 29.41088 30.36445 31.32092 32.28002
[17] 33.24154 33.52611 34.48188 35.44009 36.40055 36.68787 37.64306 38.60052 39.56008 40.52160 40.80441 41.76123 42.72002 43.68066 43.96590 44.92215
[33] 45.88028 46.84015 47.80167 48.08326 49.04080 50.00000 50.96077 51.24451 52.20153 53.16014 54.12024 55.08176 55.36244 56.32051 57.28001 58.24088
[49] 58.52350 59.48109 60.44005 61.40033 62.35185 62.64184 63.60031 64.56005 65.52099 65.80274 66.76077 67.72001 68.68042 69.64194 69.92138 70.88018
[65] 71.84010 72.80110 73.08215 74.04053 75.00000 75.96052 76.92204 77.20104 78.16009 79.12016 80.08121 80.36168 81.32035 82.28001 83.24062 84.20214
[81] 84.48077 85.44004

[[3]]
[1] 86.04018 86.40023 87.36132 87.64131 88.60023 89.56004 90.52072

[[4]]
[1] 90.87030 91.48224

[[5]]
[1] 91.69874 91.76056

[[6]]
[1] 91.88043 92.72001 93.68031 94.64143 94.92102 95.88013 96.84007 97.80082 98.76234 99.04040 100.00000 100.96039 101.92154 102.20078
[15] 103.16007 104.12012 105.08092 106.04244 106.32027 107.28001 108.24047 109.20165 109.48059 110.44003 111.40018 112.36103 113.32255 113.60018
[29] 114.56003 115.52056 116.48176 116.76044 117.72001 118.68024

[[7]]
[1] 119.0406 119.6411 120.6027 120.8801 121.8401 122.8007 123.7619 124.0403 125.0000 125.9603 126.9212 127.8828 128.1601 129.1201 130.0807 131.0420
[17] 131.3202

[[8]]
[1] 132.0399 132.2800 133.2404 134.2013 135.1629 135.4400 136.4001 137.3608 139.5600 140.5205 141.4814 142.4430

C > surfaces
$data
# A tibble: 384 x 15
  l z1 p z2 a type l_obs z_obs series z1min z1max z2min z2max lmin lmax
  <dbl> <dbl> <chr> <dbl> <dbl> <chr> <dbl> <dbl> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl>
1 0 154. observed 150. 0 NA 0 154. s1 NA NA NA NA NA NA NA
2 0 154. observed 150. 3.99 upper 0 150. s2 NA NA NA NA NA NA NA
3 1 154. observed 150. 0 NA 1 154. s1 NA NA NA NA NA NA NA
4 1 154. interpolated 150. 1.64 upper NA NA s2 NA NA NA NA NA NA NA
5 1.41 154. observed 150. 0 NA 1.41 154. s1 NA NA NA NA NA NA NA
6 1.41 154. interpolated 150. 3.25 upper NA NA s2 NA NA NA NA NA NA NA
7 2.24 154. observed 150. 0 NA 2.24 154. s1 NA NA NA NA NA NA NA
8 2.24 154. interpolated 150. 3.67 upper NA NA s2 NA NA NA NA NA NA NA
9 3.16 154. observed 150. 0 NA 3.16 154. s1 NA NA NA NA NA NA NA
10 3.16 154. interpolated 150. 3.81 upper NA NA s2 NA NA NA NA NA NA NA
# ... with 374 more rows

```

Figure 31 : Exemple d'éléments de gestion des données de R

A : structure d'un vecteur

B : structure d'une liste

C : structure d'un tableau de données

L'environnement de développement Rstudio a été utilisé pour la programmation.

II.2.2 Génération des transects

II.2.2.1 Re-calcul de la ligne centrale

Le renseignement d'une ligne centrale modélisant le milieu du lit est indispensable au tracer automatique des coupes transversales du cours d'eau pour les besoins de son étude locale. Celle-ci est issue de la BD TOPAGE, le référentiel hydrographique français. (Figure 32)

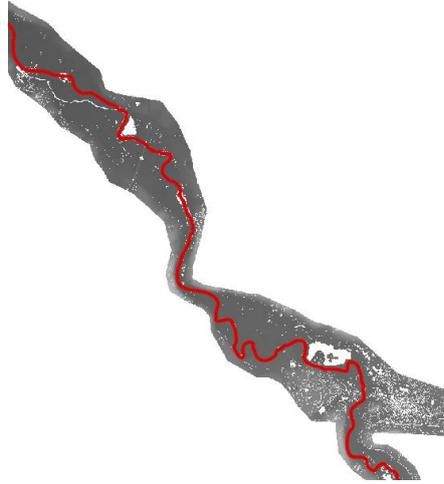


Figure 32 : Ligne vectorielle modélisant le centre du chenal, issue de la BD TOPAGE

Le Cher présente plusieurs tronçons à chenaux multiples. Au niveau de ces sites, la difficulté à déterminer les paramètres à pleins bords se précise. Le transect doit être perpendiculaire à la plaine alluviale pour avoir une largeur à pleins bords correcte. En présence de deux bras, il s’agira donc de réaliser autant que possible des transects orthogonaux à ces derniers pour ne pas introduire de phénomène d’indépendance. En pratique, trois solutions ont été envisagées : utiliser seulement l’un des deux bras, réaliser des transects indépendants sur chacun d’entre eux, ou recalculer une ligne centrale passant par le centre de la zone à double bras. Cette dernière option, intermédiaire, a été retenue car elle permet d’assurer une perpendicularité optimale pour chacun des deux côtés.

Pour ce faire, il convient préalablement d’isoler les secteurs concernés. La ligne centrale initiale est scindée selon les multiples entités linéaires la constituant. (Figure 33)

```

> ligne_ref_2bras_reach
Simple feature collection with 1 feature and 1 field
geometry type: MULTILINESTRING
dimension: XY
bbox: xmin: 655620.5 ymin: 6624810 xmax: 661107 ymax: 6631790
projected CRS: RGF93 / Lambert-93
ID geometry
2 1 MULTILINESTRING ((660773.8 ...

↓

> lc_linestring
Simple feature collection with 2 features and 1 field
geometry type: LINESTRING
dimension: XY
bbox: xmin: 655620.5 ymin: 6624810 xmax: 661107 ymax: 6631790
projected CRS: RGF93 / Lambert-93
ID geometry
2 1 LINESTRING (660773.8 662481...
2.1 1 LINESTRING (655720.2 663179...

```

Figure 33 : Division de la ligne centrale en entités linéaires

Puis, les intersections entre ces nouvelles lignes sont inventoriées dans une liste. Seules les géométries spatiales ponctuelles sont retenues et les coordonnées des zones à chenaux multiples sont désormais à disposition. (Figure 34)

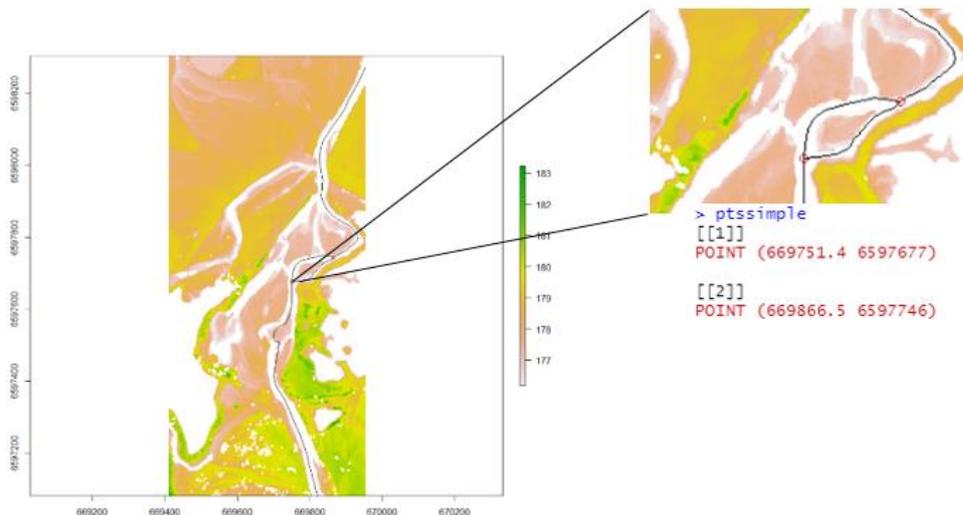


Figure 34 : Repérage automatique des zones à chenaux multiples

Un procédé récursif est ensuite mis en œuvre lors duquel chaque itération prend en charge une entité « linestring » issue de la division de la ligne vectorielle de départ. Si les nœuds amont et aval d'une même ligne possèdent exactement les mêmes coordonnées que les points d'intersections correspondants à cette zone, alors cette géométrie est enregistrée dans une liste répertoriant les entités linéaires constitutives des secteurs à double bras.

En utilisant la propriété du diagramme de Voronoï qui permet la création de polygones dont chacun des points se trouvent plus proche de son centre que de celui d'un autre, il est possible de générer une ligne centrale symétrique à celles modélisant les bras principal et secondaire du cours d'eau (Figure 35). En opérant de la sorte, le compromis de perpendicularité de part et d'autres de ce segment central s'en trouve optimisé.

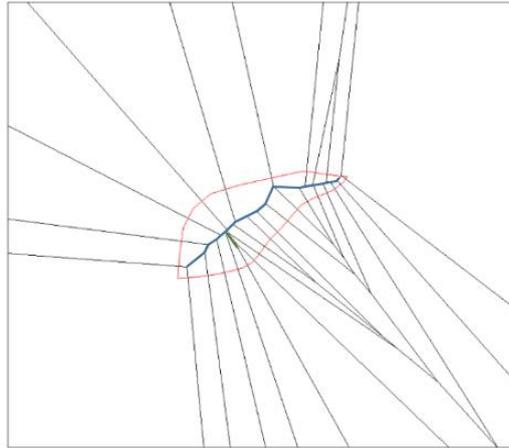


Figure 35 : Nouvelle fraction de ligne centrale

En ignorant les lignes intersectant le contour du polygone formé par les entités « linestring » du tronçon à double bras (ici en rouge) et en éliminant les éventuels résidus (en vert), il est possible de conserver uniquement la partie centrale (bleue). Un raccordement de ce segment aux extrémités de la ligne principale clôture la nouvelle géométrie créée.

II.2.2.2 Positionnement et calcul des segments perpendiculaires à la ligne centrale

La ligne vectorielle nouvellement modifiée est ensuite échantillonnée et des points sont créés tout au long de celle-ci à intervalle régulier. L'espace considéré correspond à une largeur à plein bord estimée selon des critères de végétation et suivant les recommandations de Navratil (2006) et De Rosa *et al.* (2019). Une valeur moyenne inter-transect de 70 m linéaire a été retenue dans le cas du Cher après inspection sur le site Géoportail. (Figure 36)

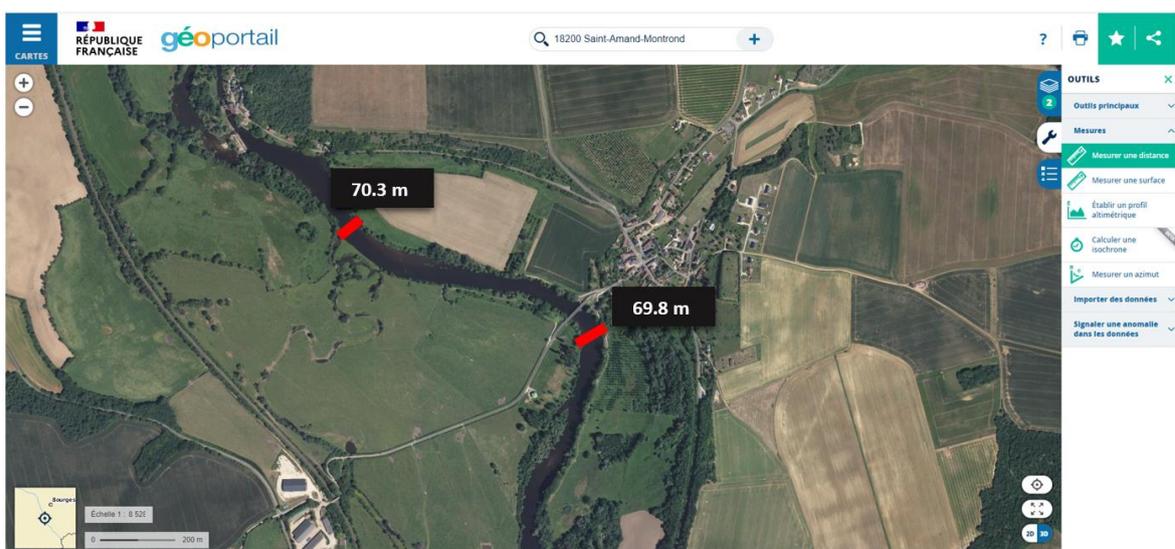


Figure 36 : Estimation de la largeur à pleins bords moyenne
Source : Géoportail

Une fonction génère des coupes transversales perpendiculaires au cours d'eau au niveau de chacun des points créés. Pour ce faire, une zone tampon dont le rayon est fixé arbitrairement à 5 m est calculée autour d'un point. Une entité spatiale linéaire est ensuite créée et orientée après un calcul d'azimut par rapport à l'orientation de la portion de linéaire présent dans la zone tampon. La longueur des transects a été définie de telle sorte à générer des coupes assez larges pour couvrir la plaine alluviale, ici 200 m. La distance à l'amont de ces transects est également calculée. (Figure 37)

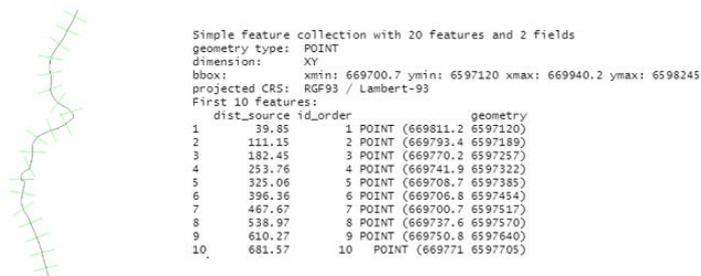


Figure 37 : Transects générés avec leur distance à l'amont

II.2.2.3 Extraction des altitudes

Une extraction des valeurs d'altitude de chacun des pixels superposés par la ligne de transect est réalisée. Le paramètre d'extraction a été fixé de telle sorte à obtenir l'information du pixel chevauché par la ligne. Aucune interpolation selon les valeurs d'altitude des pixels voisins plus proches n'est effectuée.

Cette étape préalable permet de recueillir en sortie un tableau de données. Celui-ci comprend deux colonnes avec respectivement le matricule du pixel extrait et sa valeur d'altitude associée. En l'état, cela permet de tracer la courbe du profil en travers étudié en définissant l'axe des x et des y à l'aide des colonnes du tableau. Cependant, pour une meilleure adaptation à nos besoins, une échelle métrique est définie pour chacun des profils en travers. Ainsi, en renseignant le numéro des pixels extraits du MNT, une fonction de l'extension raster récupère les coordonnées référencées de ces derniers, ici en RGF93 LAMBERT 93. En sortie, nous obtenons à nouveau un tableau de données à deux colonnes, avec respectivement les coordonnées Est et Nord de chaque pixel.

En utilisant l'équation 3 dans un repère orthonormé tel que celui défini par le MNT, il est possible d'exploiter les coordonnées obtenues précédemment afin de calculer la distance séparant chacune des entités ponctuelles du profil, de l'origine du tracé.

$$Distance\ AB = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}$$

Équation 3 : Formule de distance dans un repère orthonormé

Le manque d'information correspondant aux surfaces en eau n'ayant pas permis au faisceau proche-infrarouge du lidar topographique de réaliser la bathymétrie du lit se traduit par une absence de données (valeur manquante), symbolisée par NA dans R. Pour éviter les erreurs de calculs engendrées par ce type d'attributs, nous les remplaçons par la valeur d'altitude la plus basse associée au profil. En effet, les zones en faisant l'objet se retrouvent principalement au niveau des points les plus bas en termes d'altimétrie. Il est important de préciser que cette étape ne pourra constituer un quelconque biais dans le traitement étant donné que les nouvelles valeurs se retrouveront dans chacune des itérations et agiront comme une constante. (Figure 38)

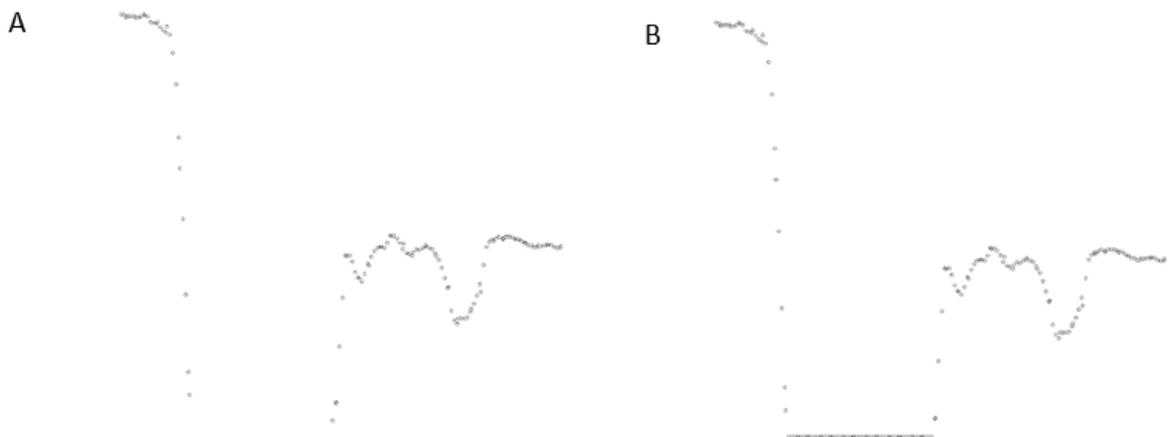


Figure 38 : Remplacement des valeurs manquantes des surfaces en eau

A : Le profil initial extrait du MNT

B : Le manque d'information est substitué par les valeurs d'altitudes les plus basses

II.2.3 Détermination du niveau à pleins bords sur un transect

A partir de cette étape, un procédé récursif a été mis en place pour définir le niveau de débordement propre à chacune des coupes du cours d'eau tel que défini par Wolman et Léopold (1957), ainsi que les largeurs à pleins bords associées. Chaque itération considère un transect.

II.2.3.1 Calcul de la profondeur hydraulique

Le calcul de la profondeur hydraulique du chenal, modélisée par le rapport entre la surface de la section mouillée pour une altitude donnée et sa largeur au miroir associée fonctionne comme suit. Les altitudes des différents points constitutifs du profil en travers sont dans un premier temps répertoriées et organisées par ordre croissant au sein d'une liste de référence. Une fonction open source développée par Lise Vaudor, ingénieur de recherche au CNRS de Lyon, a été utilisée pour calculer l'aire entre la droite d'altitude de référence et la courbe du profil en travers sous cette dernière («<https://github.com/lvaudor/riverbed>»). Cette fonction présente l'avantage de disposer de deux fonctionnalités de calcul répondant aux besoins d'un plus grand nombre d'étude. Ainsi, il est possible d'analyser la surface entre deux courbes ou bien de substituer l'une d'entre elles au profit d'une droite de référence. Pour notre cas nous choisirons une droite d'altitude de type $y=x$ avec x une altitude fixée. La dernière configuration est donc retenue pour notre chaîne de traitement et requiert deux entrées. Pour la première, un tableau de données de taille n lignes et 2 colonnes est nécessaire. Il doit regrouper l'ensemble des caractéristiques des points constitutifs du profil en travers, à savoir leur distance à la source et leur altitude. Cela renseigne la courbe délimitant la surface à étudier. En second argument, nous définissons une droite horizontale de référence dont la position altimétrique évoluera de façon croissante au fur et à mesure des itérations selon les valeurs présentes dans la liste d'altitude de référence. Le calcul des aires entre les deux courbes repose sur la création de trapèzes permettant d'approximer au mieux la surface au-dessus et au-dessous de la droite de référence. (Figure 39)

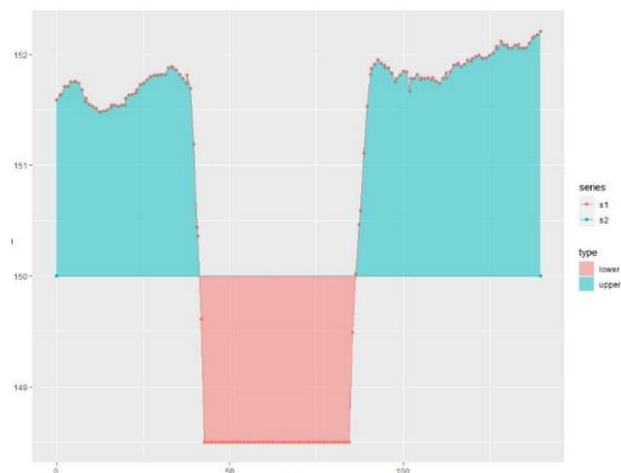


Figure 39 : Calcul des aires entre la courbe du profil en travers et la droite d'altitude.

En sortie, la fonction retourne un tableau de données fournissant plusieurs éléments : l'aire de chacun des trapèzes et sa localisation par rapport à l'origine du tracé, la somme des aires positives des trapèzes (au-dessus de la droite de référence, partie bleue sur la figure), la somme des aires négatives des trapèzes (en-dessous de la droite de référence, partie rouge sur la figure), et la surface totale calculée à partir du cumul des aires positives et négatives.

Par la suite, l'aire correspondant à la surface de la section mouillée dans le chenal pour une altitude de référence donnée sera identifiée selon l'hypothèse que celle-ci doit correspondre à la plus grande aire sous la courbe et donc à la plus importante valeur de surface négative. En effet, il n'est pas possible de prendre en considération directement la somme des aires négatives et de l'associer à la section mouillée du cours d'eau. Cela nous obligerait à partir d'une certaine valeur d'altitude à prendre en considération des artefacts et aurait pour conséquence de biaiser le rapport de profondeur hydraulique. Les paramètres à pleins bords s'en trouveraient affectés. (Figure 40)

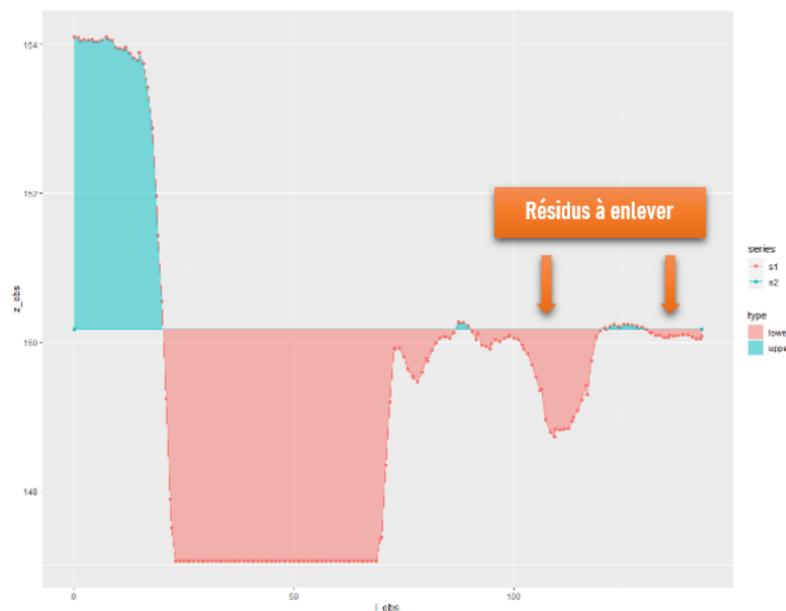


Figure 40: Calcul d'aires, individualisation des surfaces et recherche des résidus

Ainsi, afin d'identifier les différentes surfaces obtenues et de guider la sélection opérée par la chaîne de traitement automatique, deux listes sont créées. La première d'entre elles permet d'enregistrer les positions des surfaces sur l'échelle métrique tandis que la seconde répertorie l'aire de chacune d'elles. Le remplissage des listes obéit au critère

suisant : tant que le trapèze $i+1$ présente une aire du même signe que le trapèze i , celle-ci est additionnée à la valeur précédemment mis en mémoire dans un compteur. Lorsque la condition n'est plus vérifiée, la valeur du compteur est stockée dans la liste et constitue une première surface correspondant potentiellement à un premier artefact. En procédant ainsi pour l'ensemble des trapèzes, nous obtenons la totalité des aires, qu'elles soient positives ou négatives. Parallèlement, la liste de coordonnées recueille les ensembles de distance au premier point du profil pour chacun des trapèzes d'une surface. Il est ainsi aisé de déterminer la largeur associée à la surface retenue comme section mouillée puisque les coordonnées de départ et d'arrivée sont relevées et connues pour chacune des aires.

Dans le cas d'une section à chenal unique, la plus grande surface négative, représentative du lit du cours d'eau, est enregistrée comme section mouillée. La largeur au miroir associée est calculée en effectuant la différence entre sa position de départ et d'arrivée. Il suffit d'obtenir l'index de la section mouillée dans la liste des surfaces, et procéder à cette opération sur la sous-liste de même index dans la liste de coordonnées globales. Enfin, le rapport entre la section mouillée et la largeur associée à cette surface nous permet d'obtenir la profondeur hydraulique pour une altitude de référence donnée. Cette valeur est stockée dans une liste globale.

A l'inverse, si le transect étudié est situé à une distance de l'amont comprise dans un des intervalles d'une liste de référence répertoriant le positionnement des tronçons à chenaux multiples sur le linéaire du Cher, alors les deux plus grandes surfaces négatives sont additionnées et enregistrées comme section mouillée.

Une fois l'ensemble des itérations réalisées, et, suivant le modèle de De Rosa *et al.* (2019), il est désormais possible de générer la courbe de profondeur hydraulique en fonction de l'altitude. L'allure de cette dernière semble respectée une tendance identique pour chaque transect (Figure 41).

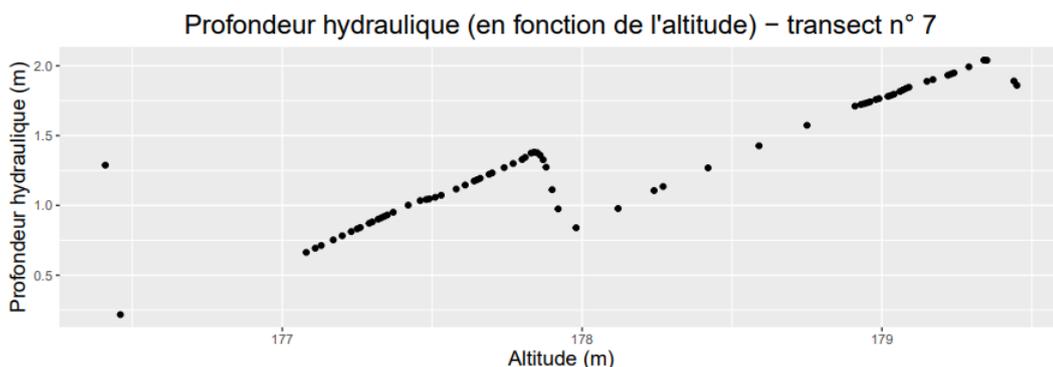


Figure 41 : Exemple de courbe de profondeur hydraulique en fonction de l'altitude.

II.2.3.2 Lissage

Une interpolation polynomiale est réalisée sur cette courbe afin d'éliminer les cassures correspondants à des ruptures de pente causées par des variations locales de la géométrie naturelle du lit du chenal. Le paramètre de lissage a été fixé avec une valeur arbitraire. Il reste toutefois possible d'amplifier ou de minimiser le lissage en fonction des besoins de la zone. (Figure 42)

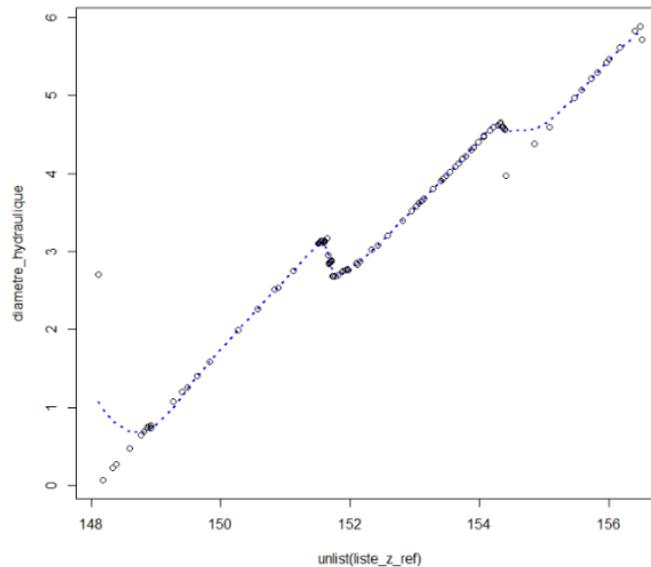


Figure 42 : Lissage par interpolation polynomiale de la courbe de profondeur hydraulique en fonction de l'altitude.

Une rupture de pente est définie comme une perturbation de la courbe de profondeur hydraulique en fonction de l'altitude. Elle comprend donc un maximum ainsi qu'un minimum local. Une interprétation d'un tel phénomène consiste en une baisse de la capacité du lit à contenir la masse d'eau, conduisant à un débordement. En effet, lorsqu'un niveau est atteint, les valeurs de profondeur hydraulique décroissent et semblent donc inverser le rapport surface mouillée-largeur au miroir. Cette dernière augmente tandis que l'autre se maintient sensiblement.

II.2.4 Comparaison de critères de sélection de la rupture de pente

La sélection de la rupture de pente correspondant au réel niveau à plein bord est l'une des limites identifiées dans les travaux de De Rosa *et al.* (2019). Dans la majorité des cas, nous observons plusieurs ruptures de pente dont certaines correspondent à des banquettes dans le lit mineur, et d'autres, à des variations de relief dans la plaine alluviale. Dans ce travail, nous comparons différents critères visant à orienter le choix automatique de la rupture traduisant l'altitude de débordement.

II.2.4.1 Amplitude la plus grande

La première hypothèse testée consiste à définir le débordement de l'eau du lit mineur dans la plaine alluviale comme l'inondation la plus significative, c'est-à-dire par le décroché le plus important sur la courbe. L'amplitude de chaque rupture de pente identifiée est déterminée par la différence des valeurs maximales et minimales de profondeur hydraulique. En pratique, deux objets de type « liste » sont créés. Nous enregistrons à l'intérieur de chacune d'entre elles les valeurs de profondeur hydraulique qui sont interprétées comme maximums et minimums selon la condition suivante : si la valeur est plus élevée que la précédente et la suivante, alors il s'agit d'un maximum ; si celle-ci est plus petite alors il s'agit d'un minimum. Les amplitudes sont ensuite calculées en soustrayant les attributs positionnés à des index identiques dans chacune des deux listes selon la formule : $A = \max - \min$. La plus forte amplitude est retenue et assimilée au niveau à pleins bords.

II.2.4.2 Altitude la plus proche du transect précédent

Pour le second critère testé, nous retenons la rupture de pente la plus proche de l'altitude de débordement précédente. Il repose sur l'hypothèse selon laquelle le plein bord est un niveau moyen sur un tronçon, continu et dépendant spatialement des transects amont et aval. Cela impose l'intervention d'un opérateur qui devra fixer manuellement le niveau à pleins bords du premier transect. Ce qui peut s'avérer problématique si la première itération du processus traite un profil en travers situé sur un secteur artificialisé (seuil, digue, gravière) dont l'estimation du plein bord peut être erronée.

II.2.5 Calcul des largeurs moyennes par tronçon

Pour chacun des transects, une fois le niveau de débordement identifié, la largeur à pleins bords s'obtient simplement comme étant la largeur au miroir de la surface mouillée utilisée pour obtenir la valeur de profondeur hydraulique à cette altitude. Dans le cas d'un tronçon à chenaux multiples, les largeurs au miroir des deux plus grandes surfaces négatives sont sommées.

Comme indiqué précédemment (partie 1), des phénomènes locaux peuvent biaiser la détermination des paramètres à pleins bords. Pour lisser ces variations locales et obtenir des valeurs représentatives, nous effectuons une moyenne sur un tronçon à l'amont de chacun des transects. Pour cela, nous nous sommes basés sur le même principe que le protocole Carhyce. La moyenne est effectuée sur une fenêtre glissante de 15 transects (14 transects amont + transect considéré).

III Résultats, discussion et perspectives

III.1 Évaluation quantitative par comparaison avec une expertise

Le secteur du Cher utilisé pour construire la chaîne de traitement a fait l'objet d'une étude des paramètres à pleins bords par un opérateur expert à partir de photo-interprétation, de lecture sur MNT et d'enquêtes complémentaires sur le terrain. Cette détermination a été effectuée selon le critère morphologique haut de berge tel que défini par Navratil (2006). Une évaluation comparative peut ainsi être réalisée entre les résultats obtenus par le programme et ceux de l'expertise.

Pour cette dernière, nous disposons d'un jeu de données indiquant pour chacune des coupes transversales effectuées par l'opérateur : les coordonnées planimétriques RGF 93 LAMBERT 93 aux deux extrémités du transect, l'altitude du plein bord et la largeur associée. Nous avons relancé notre programme sur le secteur de comparaison en prenant soin de disposer les profils en travers à des positions identiques à celles définies par l'expertise. Nous avons appliqué successivement pour chacun des profils en travers l'un des deux critères de sélection de la rupture de pente descriptive du niveau à pleins bords : conservation de la plus grande amplitude et plus proche du plein bord précédent (Tableau 3).

Tableau 3 : Comparatif de détermination automatique du niveau à pleins bords avec des valeurs expertisées sur un secteur du Cher

<i>N° transect</i>	<i>Observation expertisée (m)</i>	<i>Critère amplitude (m)</i>	<i>Différence (m)</i>	<i>Critère ppp (m)</i>	<i>Différence (m)</i>	<i>Différence méthode (m)</i>
2	150,48	150,44	0,04	150,44	0,04	0
3	150,41	150,45	0,04	150,45	0,04	0
4	150,29	150,53	0,24	150,53	0,24	0
5	150,52	150,49	0,03	150,49	0,03	0
6	150,61	150,52	0,09	150,52	0,09	0
7	150,32	150,55	0,23	150,55	0,23	0
8	150,22	150,52	0,30	150,52	0,30	0
9	150,34	150,43	0,09	150,43	0,09	0
10	149,92	150,05	0,13	150,44	0,52	0,39
11	150,40	151,05	0,65	150,37	0,03	0,68
12	149,41	150,43	1,02	150,43	1,02	0
13	150,21	150,14	0,07	150,14	0,07	0
14	150,18	150,15	0,03	150,15	0,03	0
15	150,49	150,39	0,10	150,39	0,10	0

16	150,24	150,28	0,04	150,28	0,04	0
17	150,41	150,32	0,09	150,32	0,09	0
18	149,59	149,72	0,13	149,98	0,39	0,26
19	149,21	150,18	0,97	149,96	0,75	0,22
20	149,29	150,43	1,14	149,84	0,55	0,59
21	148,84	150,41	1,57	150,41	1,57	0
22	150,36	150,32	0,04	150,32	0,04	0
23	149,92	150,22	0,30	150,22	0,30	0
24	149,83	150,09	0,26	150,3	0,47	0,21
25	150,08	150,06	0,02	150,06	0,02	0
26	150,25	150,17	0,08	150,17	0,08	0
27	149,65	150,26	0,61	150,13	0,48	0,13
28	150,13	150,27	0,14	150,27	0,14	0
29	150,08	149,98	0,10	149,98	0,10	0
30	149,61	149,74	0,13	149,98	0,37	0,24
31	149,78	149,72	0,06	149,72	0,06	0
32	149,73	149,71	0,02	149,71	0,02	0
33	149,76	149,66	0,10	149,66	0,10	0
34	149,42	148,49	0,93	149,78	0,36	1,29
35	149,31	150,55	1,24	150,53	1,22	0,02
36	149,45	149,27	0,18	150,18	0,73	0,91
37	149,41	149,55	0,14	149,55	0,14	0
38	149,43	149,51	0,08	149,51	0,08	0
39	149,77	149,71	0,06	149,42	0,35	0,29
40	149,48	149,52	0,04	149,45	0,03	0,07
41	149,37	149,48	0,11	149,44	0,07	0,04
42	148,65	149,65	1,00	149,65	1,00	0
43	149,05	149,01	0,04	149,99	0,94	0,98
44	148,81	149,17	0,36	149,86	1,05	0,69
45	148,80	149,74	0,94	149,95	1,15	0,21
46	149,46	149,79	0,33	149,93	0,47	0,14
47	149,38	149,52	0,14	149,67	0,29	0,15
48	149,56	149,31	0,25	149,63	0,07	0,32
49	149,26	149,3	0,04	149,63	0,37	0,33
50	149,43	148,56	0,87	149,82	0,39	1,26

Pour les deux critères testés, l'analyse statistique des résultats a été effectuée selon quatre paramètres : la différence moyenne, l'écart maximal, l'écart minimal et l'écart-type (Tableau 4).

Tableau 4 : Analyse statistique des résultats obtenus à partir des deux critères testés

	Critère Amplitude	Critère plus proche
<i>Moyenne (m)</i>	0,32	0,35
<i>Écart Max (m)</i>	1,57	1,57
<i>Écart Min (m)</i>	0,02	0,02
<i>Écart type (m)</i>	0,39	0,38

Au regard de la différence moyenne à la valeur de référence sur l'ensemble des transects, on observe de moins grands écarts avec l'expertise lorsque la rupture de pente de plus forte amplitude est assimilée au niveau à plein bord. A l'inverse, un écart type plus élevé indique une plus forte dispersion des valeurs lorsque ce critère est appliqué. Cependant, cela s'explique par le principe même du second critère. En effet, prendre un décroché sur la courbe de profondeur hydraulique-altitude plus proche du décroché précédent implique de prendre en considération au fil des itérations des valeurs d'altitude peu espacées entre elles. Ainsi, lorsqu'un décroché sous-estimant ou surestimant le réel niveau à plein bord est sélectionné, l'ensemble des niveaux à pleins bords suivants seront biaisés si plusieurs ruptures de pentes sont présentes car ceux-ci devront être au plus proche de la valeur du premier profil erroné. Pour appuyer ce raisonnement, une erreur moyenne plus élevée pour le second critère traduit bien des différences individuelles plus grandes malgré une meilleure homogénéité. En revanche, nous observons un écart maximal et minimal identique pour les deux critères.

III.2 Évaluation qualitative

III.2.1 Analyse des critères de sélection

Pour trancher sur l'efficacité des critères, une évaluation qualitative visuelle des résultats reste nécessaire. Sur la majorité des transects étudiés, les deux critères influant la détermination du plein bord affichent des résultats en adéquation (Figure 43).

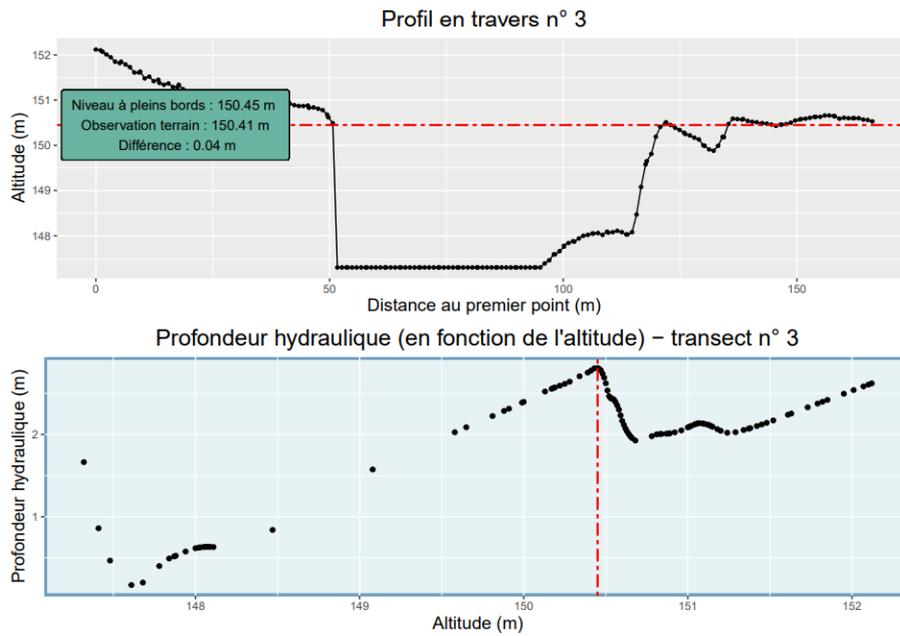


Figure 43 : Niveau à pleins bords estimé identiquement pour les deux critères testés

Pour onze des quarante-neuf profils du tronçon expertisé, la valeur de pleins bords calculée par l’algorithme diffère selon le critère retenu. C’est notamment le cas pour les coupes n° 18 et 39. (Figure 44)

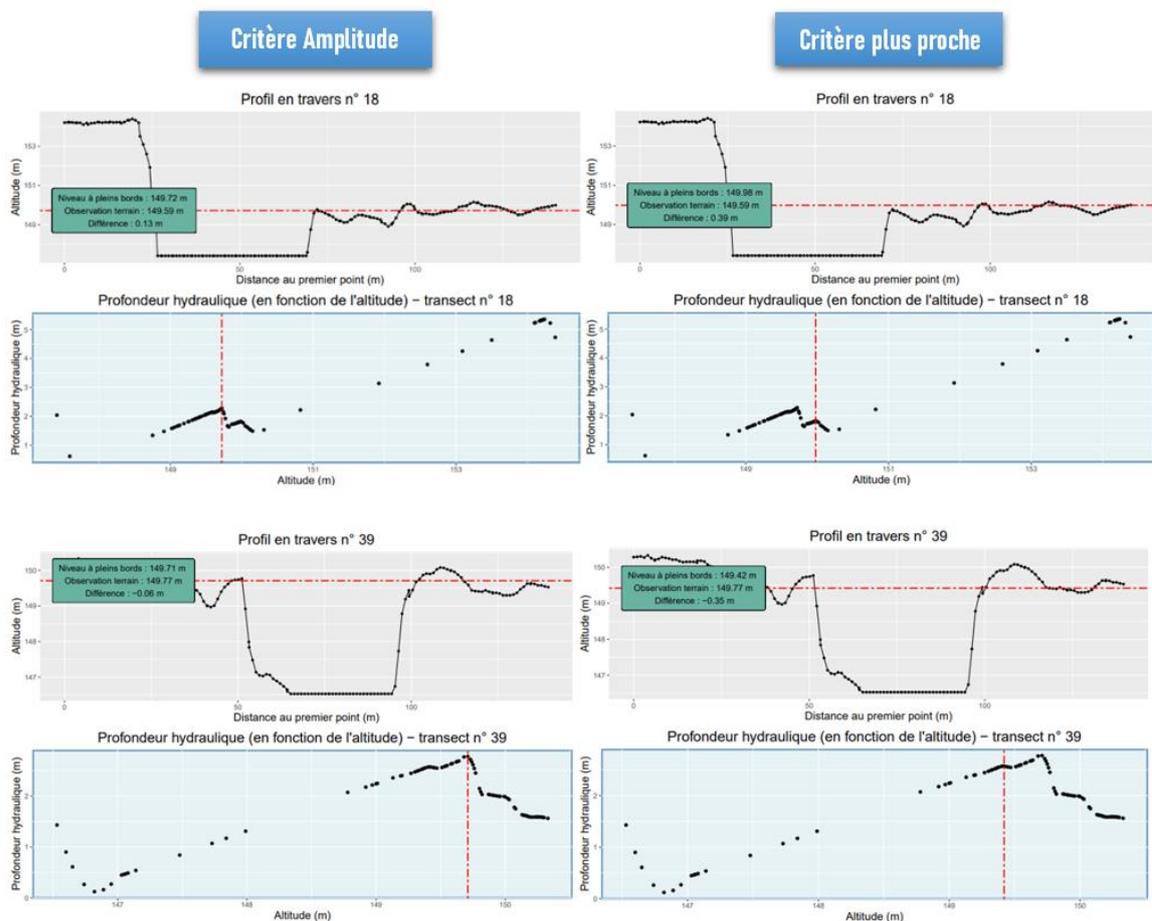


Figure 44 : Divergence (m) de détermination du niveau à pleins bords selon le critère testé.

Lorsque le programme sélectionne la rupture de pente de plus forte amplitude, celle-ci coïncide visuellement avec la définition du haut de berge énoncée par Navratil (2006). A l'inverse, la conservation de la rupture de pente la plus proche du niveau à pleins bords du profil précédent entraîne une erreur de détermination de l'altitude de débordement dans la plaine alluviale. En effet, il apparaît que celle-ci est fixée soit trop haut soit trop bas. Nous pouvons l'expliquer en observant la courbe de profondeur hydraulique-altitude associée. La présence de multiples décrochés force l'algorithme à considérer davantage de ruptures de pentes augmentant ainsi le risque d'une mauvaise sélection. Amplifier le lissage permettrait la suppression de ces décrochés lorsque ceux-ci restent relativement faibles. En revanche, pour le cas du transect 18, les décrochés sont trop importants pour être éliminés par lissage. A l'échelle d'un linéaire entier, on peut donc s'attendre à une divergence significative du niveau à pleins bords.

Aussi, en considération de ces arguments, des analyses statistiques précédentes et de l'évaluation visuelle, nous avons décidé de retenir le critère d'amplitude.

III.2.2 Limites sur des zones complexes

Sur l'ensemble du linéaire du Cher, nous avons pu identifier quatre tronçons dont la morphologie du lit propose une certaine complexité quant à la détermination du niveau à pleins bords.

III.2.2.1 Zones à gravières

Deux secteurs, situés respectivement aux abords de la commune de Bruère-Allichamps et en aval de Montluçon, ont été retenus au vue de la présence de nombreuses gravières (Figure 45). Formées suite aux activités humaines d'extraction de granulats dans le lit mineur, celles-ci ont provoqué l'artificialisation du tronçon. Après leur interdiction par la législation, ces fosses inexploitées devinrent naturellement des surfaces en eau.

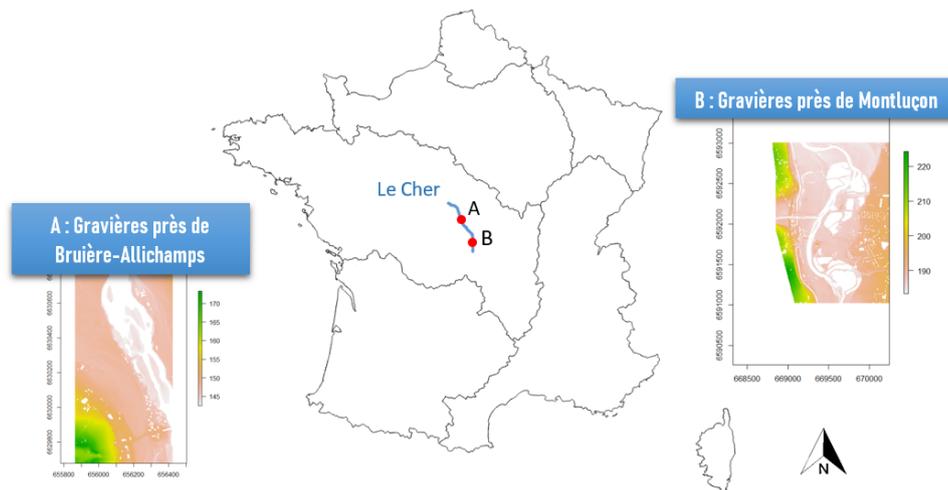


Figure 45 : Localisation des secteurs à gravières étudiés.

L'analyse du comportement de l'algorithme appliqué à ce genre de secteur permet d'identifier ses éventuelles limites car la forte variabilité topographique risque d'engendrer de multiples de rupture de pente correspondant à des niveaux de débordements distincts et complexifiant ainsi la sélection du plein bord. Pour cette analyse, des transects ont été générés afin d'englober volontairement des gravières de taille différente dans le calcul. La perpendicularité des coupes par rapport à la ligne centrale n'a pas été forcément respectée. (Figure 46)

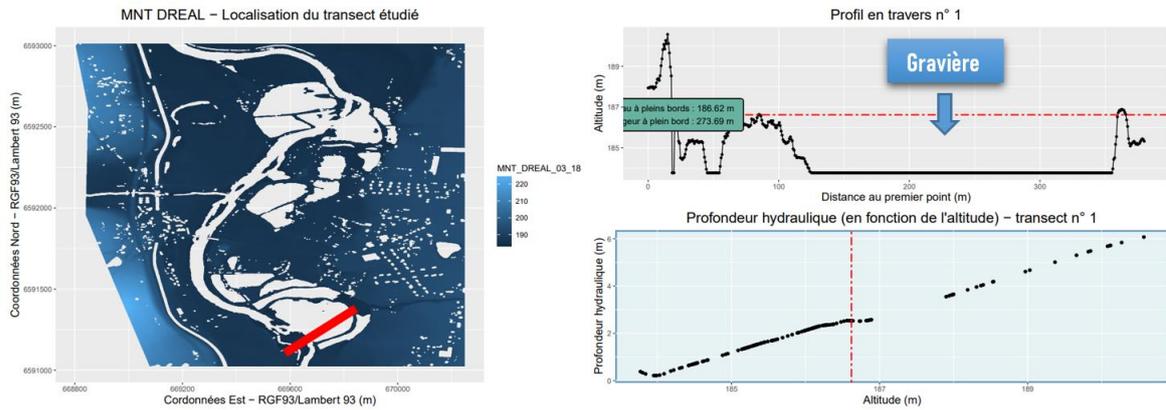


Figure 46 : Détermination automatique du plein bord en présence d'une gravière de grande capacité

La présence d'une gravière peut entraver la bonne détermination du niveau à pleins bords si la surface de celle-ci présente sur la coupe transversale surpasse l'aire du chenal. En effet, généralement ces fosses issues d'une excavation massive de granulats représentent des surfaces bien plus larges que celle formée par le lit naturel. Aussi, le volume d'eau déversée dans la plaine est nettement supérieur. Lors du calcul des différentes surfaces entre la courbe du profil et une droite d'altitude de référence donnée, c'est donc l'aire de la gravière qui est enregistrée comme section mouillée et utilisée pour définir les valeurs de profondeur hydraulique. Ces dernières donnent lieu à une courbe profondeur hydraulique-altitude caractéristique de la gravière et le critère d'amplitude détermine les paramètres à plein bord à la position de la rupture de pente la plus marquée.

Toutefois, lorsque l'aire de la gravière demeure inférieure à la capacité du chenal, alors celle-ci ne biaise pas la détermination du plein bord. (Figure 47)

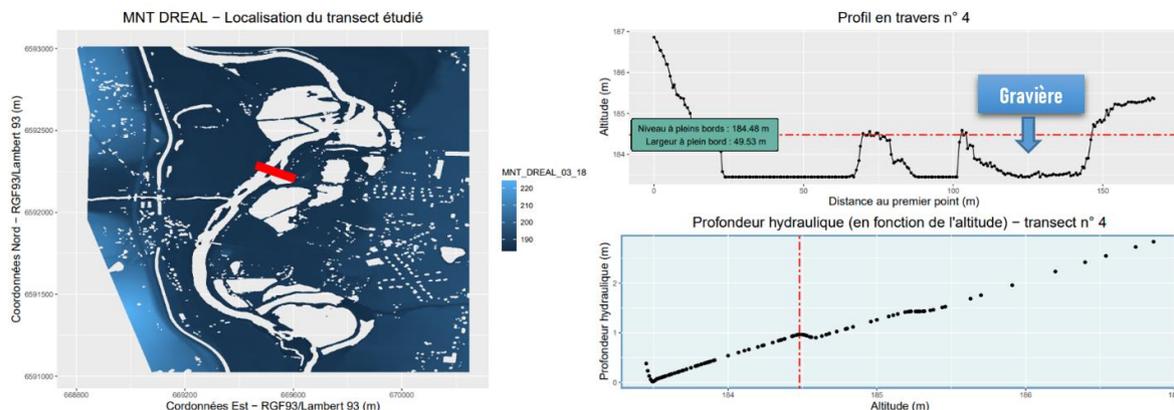


Figure 47 : Détermination automatique du plein bord en présence d'une gravière de capacité modérée

III.2.2.2 Zones à chenaux multiples

Deux autres secteurs ont bénéficié d'une évaluation visuelle, situés respectivement aux abords de la commune de Lunery et en amont de Châtres-sur-Cher. (Figure 48)

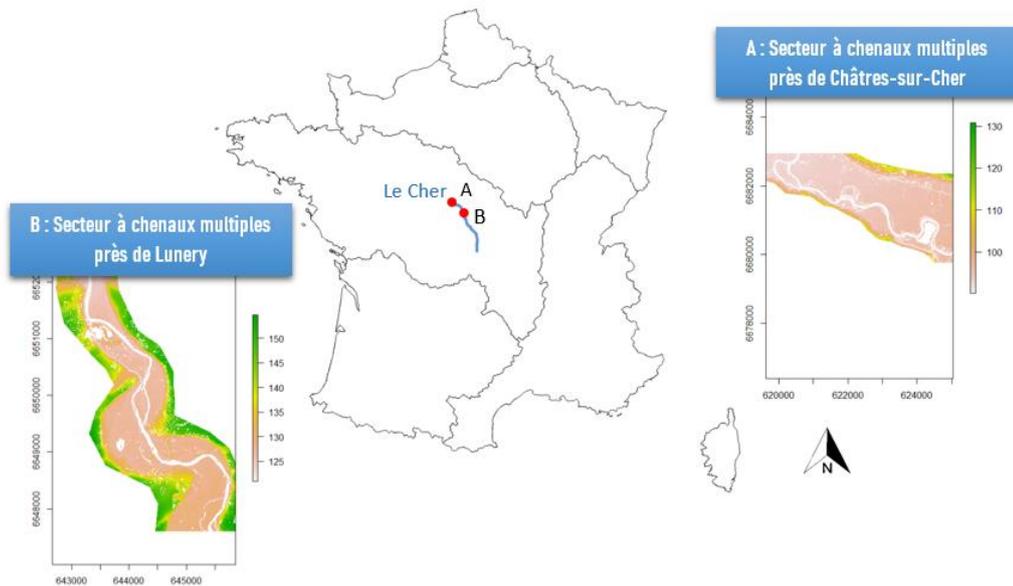


Figure 48 : Localisation des secteurs à chenaux multiples étudiés

Il s'agit de sites où le Cher s'écoule suivant un tracé à double chenaux, délimité par des îlots exondés. Les améliorations apportées par notre travail doivent permettre de répondre à la prise en charge d'une telle configuration pour une détermination des paramètres à pleins bords non approximative.

L'outil développé semble gérer efficacement les secteurs pour lesquels l'île centrale s'élève plus haute que les berges extérieures reliant le chenal à la plaine alluviale. Le niveau de débordement est bien associé à la première berge la plus basse. (Figure 49)

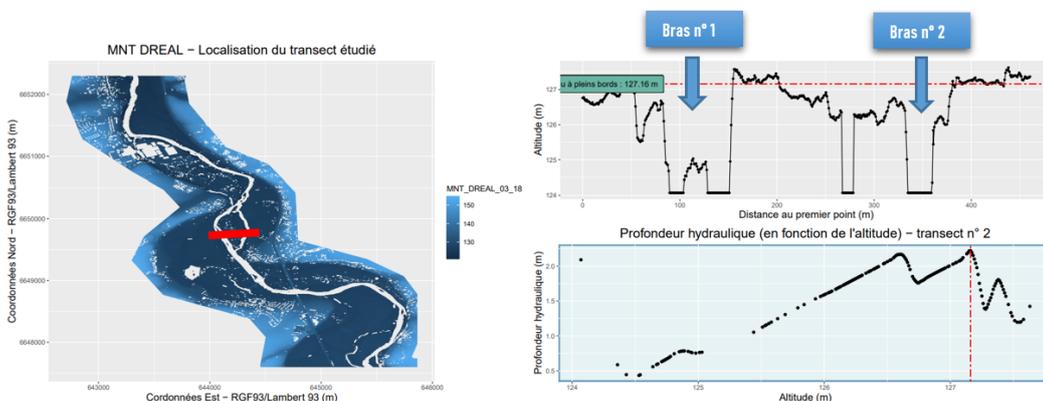


Figure 49 : Détermination automatique du niveau à pleins bords sur un secteur à chenaux multiples

Nous avons remarqué que certaines limites apparaissent en présence d'un îlot central particulièrement étendu et dès lors que celui-ci se trouve sous le niveau des berges extérieures menant à la plaine d'inondation. (Figure 50)

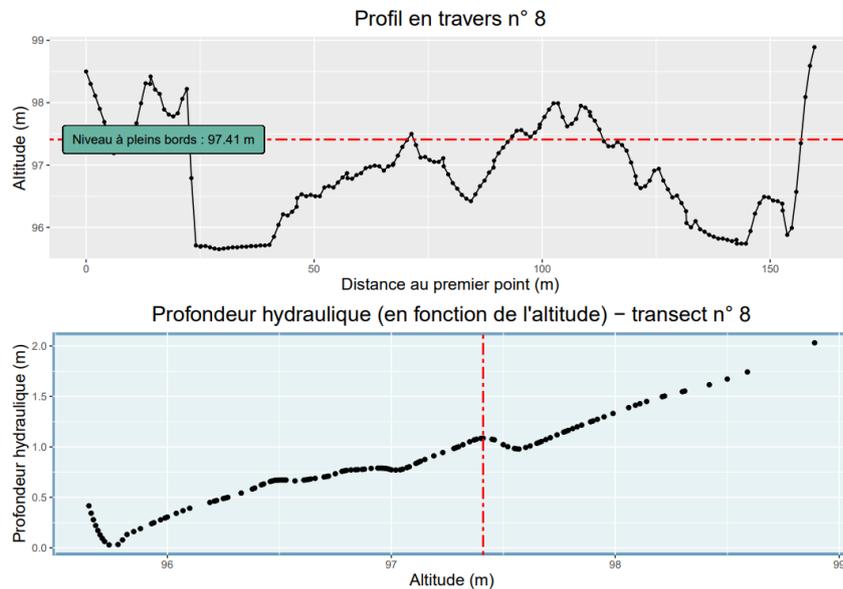


Figure 50 : Détermination automatique du niveau à pleins bords sur un secteur à chenaux multiples

Dans ce cas, l'algorithme retient parfois un niveau correspondant à une rupture de pente de l'îlot. Ce dernier étant étendu, les amplitudes de déversement lui étant associées peuvent devenir les plus significatives si l'on ne considère pas un recul suffisant dans la plaine alluviale. Ceci pourrait donc être rectifié en augmentant la largeur des transects pour les secteurs à chenaux multiples, englobant ainsi une plus grande partie de la plaine d'inondation et permettant d'amplifier la rupture du pente du réel niveau à pleins bords en dehors de l'îlot.

Une autre limite à souligner est l'incapacité actuelle du programme à gérer de façon cohérente une configuration moins courante d'un cours d'eau à trois chenaux ou plus.

III.3 Cartographie des largeurs à pleins bords moyennées

En sortie d’algorithme, une cartographie des largeurs à pleins bords moyennées sur l’ensemble du linéaire du Cher est générée au format shapefile. (Figure 51)

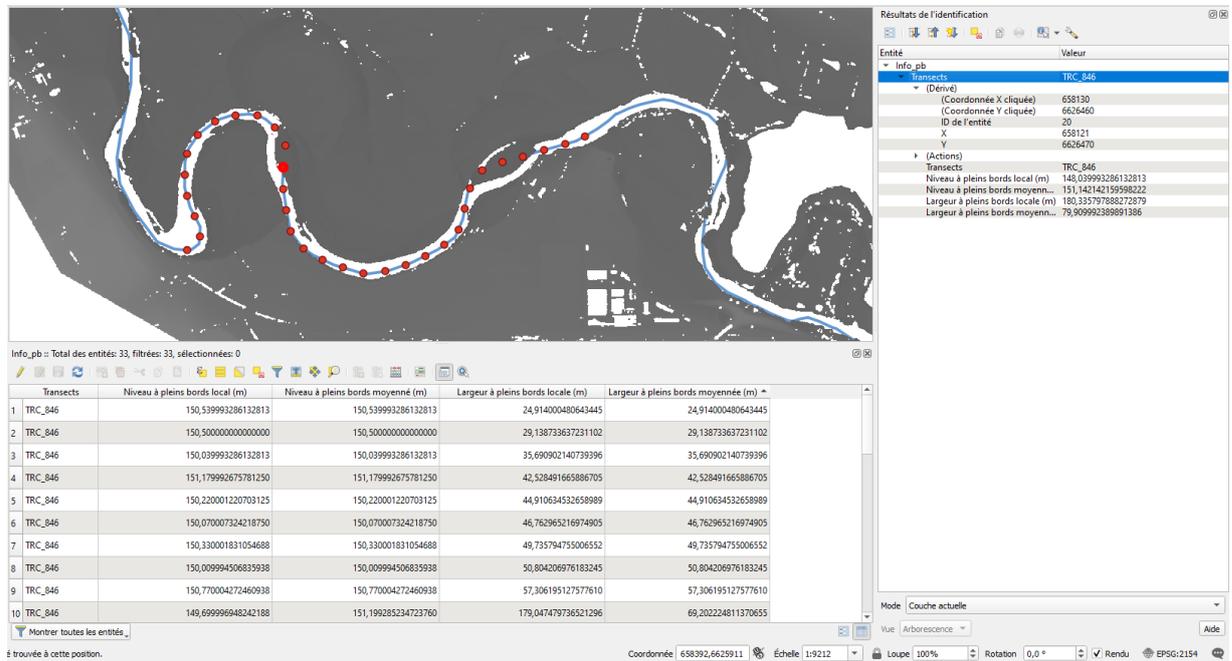


Figure 51 : Visualisation sur le logiciel SIG QGIS de la couche shapefile obtenue en fin d’algorithme

Nous avons fait le choix de rassembler et présenter les informations de géométrie à pleins bords propres à un transect au point d’intersection entre la ligne centrale du cours d’eau et l’entité spatiale matérialisant la coupe. Chacun de ces objets ponctuels créés dispose ainsi de plusieurs informations : la largeur à pleins bords locale et moyennée selon 14 transects amont, et l’altitude du niveau de débordement dans la plaine alluviale locale et moyennée.

III.4 Validation externe : Application à un autre cours d’eau

La rivière de l’Armançon, située près de la ville d’Auxerre, a été utilisée pour une validation externe des résultats. Celle-ci prend sa source à 400 m d’altitude, entre les communes d’Essey et Thoisy-le-Désert, dans le département de la Côte-d’Or. Elle conflue avec l’Yonne, affluent de la Seine, près de Chenny. Ce cours d’eau totalise un linéaire d’environ 200 km pour un bassin hydrographique de 3000 km².

III.4.1 Acquisition des données

En présence d'un opérateur confirmé, nous avons procédé à l'acquisition terrain des données de plein bord sur un site proche de la confluence avec l'Armançe. (Figure 52)

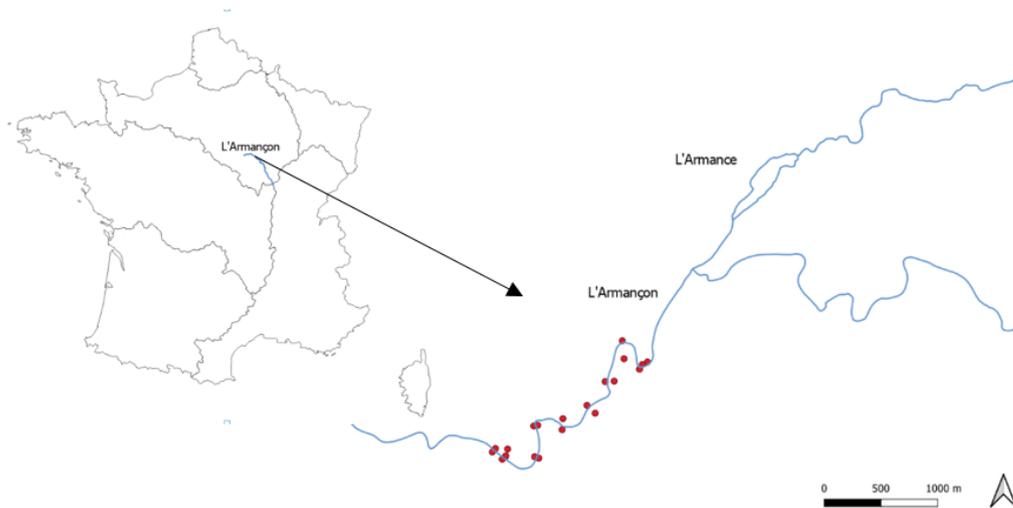


Figure 52: Localisation du cours d'eau l'Armançon

Un récepteur bas coût connecté au système géodésique Centipède (réseau de bases GNSS RTK) a été utilisé pour effectuer le relevé du niveau de débordement selon le critère haut de berge, assurant une précision centimétrique en planimétrie ainsi qu'en altimétrie. Plusieurs paires de points disposés orthogonalement le long des rives gauche et droite ont pu mener à la création d'une dizaine de transects espacés d'environ 70 m chacun.

III.4.2 Évaluation comparative

L'algorithme de traitement a été utilisé sur le MNT lidar au pas de 1m à disposition de cette rivière. Après conversion des coordonnées géographiques WGS 84 obtenues par le récepteur en coordonnées planimétriques dans le système de référence RGF 93 Lambert 93 et en repositionnant les transects, nous obtenons les résultats suivants :

Tableau 5 : Comparatif de détermination automatique du niveau à pleins bords avec des valeurs expertisées sur la rivière de l'Armançon.

N° transect	Observations berge	Observations berge	Détermination automatique (m)	Différence (m)
	haute (m)	basse (m)		
1	97,23	97,03	97,30	0,27
2	97,18	97,03	97,07	0,04
3	97,59	97,38	97,37	0,01
4	97,85	97,59	97,77	0,18
5	99,1	98,09	98,05	0,04
6	98,16	98,05	97,67	0,38
7	98,29	98,13	98,12	0,01
8	98,67	98,41	98,39	0,02
9	99,86	99,77	99,73	0,04

Tableau 6 : Analyse statistique des résultats obtenus automatiquement sur la rivière de l'Armançon

	Critère Amplitude
<i>Moyenne (m)</i>	0,11
<i>Écart Max (m)</i>	0,38
<i>Écart Min (m)</i>	0,01
<i>Écart type (m)</i>	0,13

L'acquisition des données terrain a été effectuée en Juin et n'a pas été confirmée avec une étude complémentaire par photo-interprétation. Le couvert végétal très abondant a pu influencer le positionnement manuel du plein bord (Figure 53). Aussi, il est logique d'observer quelques écarts avec les valeurs obtenues par l'algorithme.



Figure 53: Illustration du haut de berge dissimulé par le couvert végétal.

Dans l'ensemble les résultats sont cohérents. L'écart maximal d'environ 40 cm d'altitude correspond à une zone à double chenaux avec une île centrale étendue, inférieure altimétriquement au haut de berge de la plaine alluviale. Comme expliquée dans la partie précédente, un transect plus long aurait permis d'obtenir une meilleure détermination. Un second écart de 27 cm est observé. Il apparaît que la mesure terrain a été trompée par le couvert végétal. En effet, la détermination automatique est bien positionnée au niveau du haut de berge et aucune rupture de pente n'est visible aux altitudes annoncées par le GPS.

La moyenne des écarts entre les valeurs calculées par le programme et les observations terrain est meilleure que celle de la validation comparative sur le Cher. La précision est trois fois plus importante (0.11 contre 0.32). Toutefois cela s'explique par le fait que le linéaire étudié est moins important et qu'un moins grand nombre de transects ont été pris en considération (10 contre 50 pour le Cher). Après analyse de la qualité visuelle des résultats, le niveau de débordement coïncide exactement avec le critère haut de berge de Navratil (2006) pour 8 des 9 transects à l'étude.

Au regard des validations interne et externe effectuées, il semble que le programme fournisse des données fiables pour un cours d'eau à chenal unique, avec des résultats concluants pour la majorité des sites à morphologies complexes. L'application de cet algorithme à un linéaire entier peut permettre de faire converger les quelques observations mal identifiées vers des valeurs moyennes non entachées d'erreur à l'échelle du tronçon. Cependant des vérifications post-traitement demeurent nécessaires pour s'en assurer.

III.5 Perspectives

Nous avons pu identifier certaines pistes de travaux complémentaires qui permettraient à la fois d'optimiser le programme développé ainsi que d'en poursuivre l'évaluation qualitative des résultats pouvant être obtenus.

III.5.1 Matérialisation d'une ligne centrale directement à partir d'un MNT

La sélection d'une ligne vectorielle matérialisant le centre du cours d'eau engendre certaines contraintes. Il est nécessaire d'opter pour une description du chenal suffisamment représentative, ce qui implique notamment de bénéficier d'un tracé précis des zones à chenaux multiples, afin d'exploiter les améliorations de détermination des paramètres de géométrie à pleins bords apportées par le programme. Cependant, la plupart des lignes utilisée au cours de nos premiers tests ont été créées manuellement et ne s'apparentaient qu'à des lignes uniques faisant l'impasse sur la description de ces sites particuliers, passant grossièrement par le centre des deux bras. Nous avons donc fait le choix d'utiliser une ligne vectorielle provenant du référentiel hydrographique français, BD TOPAGE, qui présente l'intérêt de remplir cette attente.

Cependant si une finalité consiste en tester le programme sur un fleuve étranger, il sera nécessaire d'avoir à disposition une telle ligne représentative de ses particularités. Une option possible réside donc la création de cette ligne au cas par cas pour chaque cours d'eau. Il serait ainsi envisageable de générer cette-dernière directement à partir du MNT. Une approche par Deep Learning pourrait être envisagée afin de détecter les pixels correspondant au cours d'eau, puis une ligne passant en son centre pourrait être générée.

Ce procédé permettrait de réduire l'apport de données sources nécessaires au fonctionnement du programme tout en assurant l'utilisation d'une ligne centrale précise du cours d'eau. Le MNT deviendrait alors l'unique ressource en entrée et il sera intéressant d'étudier le comportement des caractéristiques de celui-ci sur les résultats obtenus.

III.5.2 Analyse de l'effet de la résolution du MNT

Une analyse de l'influence de la résolution du MNT utilisé sur la qualité des paramètres à plein bords obtenus n'a pas été réalisée lors de ces travaux. Il serait donc intéressant d'appliquer le programme selon une série de tests en faisant varier le maillage utilisé pour produire le modèle numérique de terrain. Pour ce faire, nous pourrions par exemple décider d'exploiter un MNT RGE ALTI à disposition au pas de 5 et 10 m.

Une identification de l'intervalle de précision pour lequel les valeurs de pleins bords en sortie d'algorithme convergent vers des observations expertisées par photo-interprétation serait une finalité.

III.5.3 Gravières et réservoirs

Pour pallier aux problèmes identifiés précédemment sur certains sites complexes tels que des zones à gravières, il peut être intéressant d'envisager leur retrait du calcul. Certaines bases de données telles que la BD TOPO offre une matérialisation spatiale des gravières. Il semble réaliste d'utiliser la couche vectorielle « Surface hydrographique » pour reconnaître l'emplacement de ces dernières et les évincer des surfaces à considérer dans le calcul de la reconnaissance du plein bord. Ainsi, une sélection des entités présentant pour le champ « nature » une mention « réservoirs bassins », « mare », « retenue », « retenue-barrage » ou encore « plan d'eau de gravière » permettrait la création d'une couche de référence utile à cette démarche. (Figure 54)

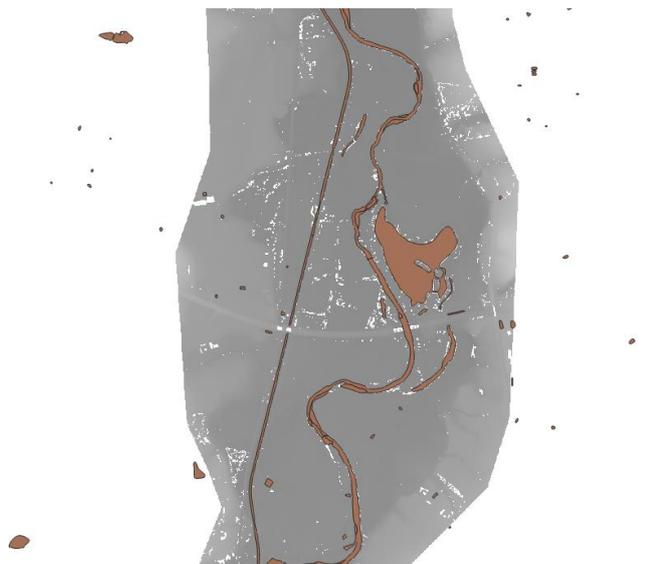


Figure 54 : Couche vectorielle de la BD TOPO matérialisant les gravières d'un cours d'eau

III.5.4 Calcul de la profondeur à pleins bords

Enfin, après avoir étudié les deux paramètres de géométrie à pleins bords du lit que sont le niveau et la largeur, il sera intéressant de mettre en œuvre un procédé pour obtenir, à partir d'un MNT de surfaces émergées, un troisième paramètre : la profondeur à plein bord.

Un couplage de la méthodologie développée avec des données issues d'un système d'acquisition bathymétrique tel que l'Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) semble envisageable pour parvenir à cet objectif. Cette technologie mesure la vitesse des écoulements d'eau ainsi que la profondeur de section mouillée en utilisant le principe du Doppler pulsé. Des faisceaux ultrasonores sont émis et le décalage fréquentiel de l'écho est mesuré. (Figure 55)

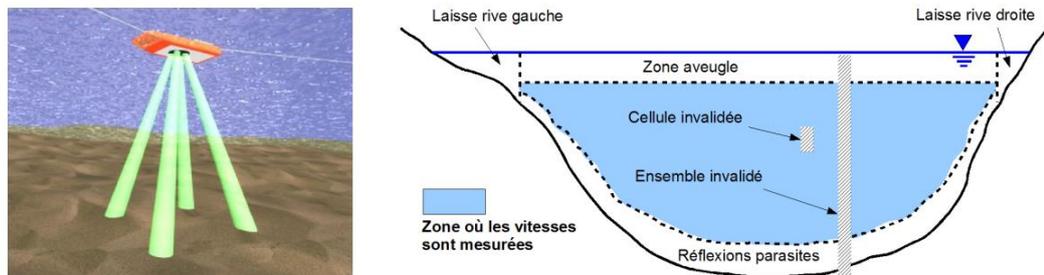


Figure 55: Schémas de principe du fonctionnement de l'ADCP
Source : Le Coz et al, 2008

Conclusion

L'étude hydromorphologique du lit d'un cours d'eau, à travers les paramètres de géométrie du chenal à pleins bords, permet d'analyser sa réponse érosive et son adaptation aux divers facteurs pouvant perturber sa dynamique. Ces paramètres apparaissent comme des indicateurs essentiels à la compréhension de l'équilibre écologique d'un milieu afin d'assurer le bon état de celui-ci au sens de la Directive Cadre sur l'eau.

Dans ce travail ayant pour enjeu l'estimation automatique du niveau et de la largeur à pleins bords à partir d'un modèle numérique de terrain, nous avons mis en place une méthodologie de reconnaissance basée sur une approche par profondeur hydraulique reprenant les principes décrits par Faux *et al* (2009) et De Rosa *et al* (2019).

Le programme a été élaboré en s'appuyant sur la rivière du Cher. Cet affluent principal de la Loire présente des caractéristiques notables qui rendent son étude particulièrement adaptée à notre problématique grâce à la présence de nombreuses zones à chenaux multiples ainsi que des gravières issues d'activités d'extraction débutées au cours du XIX siècle. Cela a permis d'axer notre recherche sur des configurations ayant pu dresser des limites aux travaux existants dans la littérature.

L'apport de nouveaux critères de sélection de la rupture de pente descriptive du niveau à pleins bords a permis d'apporter une solution efficace sur le traitement des sites complexes et de confirmer les possibilités d'exploitation des ressources numériques MNT afin d'obtenir une cartographie continue des largeurs sur l'ensemble d'une plaine alluviale de grand cours d'eau français. Certains problèmes restent toutefois à considérer comme la présence d'anciennes gravières qui peuvent erroner le calcul. Cependant, la possibilité de faire intervenir des informations complémentaires provenant d'autres bases de données descriptives du cours d'eau semble une opportunité réaliste pour pallier à ces difficultés.

Le caractère reproductible de la méthode développée a pu être testé au cours d'une validation des résultats produits par l'algorithme sur un cours d'eau annexe, la rivière de l'Armançon. La détermination automatique du niveau de débordement a coïncidé une nouvelle fois avec les observations mesurées directement sur le terrain. Il s'agira désormais de s'intéresser à partir d'un MNT de surfaces émergées, à la détermination de la profondeur à pleins bords, qui possède un rôle clé dans l'étude hydromorphologique des chenaux.

Bibliographie

Articles à comité de lecture et Chapitre d'ouvrage

- Clozier R., 1936, Les terrasses fluviales, *L'information géographique*, **1**(1), 13-16 pp.
- De Rosa P., Fredduzzi A., Cencetti C., 2019, A GIS-Based Tool for Automatic Bankfull Detection from Airborne High Resolution Dem, *ISPRS Int J. Geo-Inf*, **8**(11), 480.
- Downs P., Piégay H., 2019, Catchment-scale cumulative impact of human activities on river channels in the late Anthropocene: implications, limitations, prospect, *Geomorphology*, **338**, 88-104 pp.
- Faux R. N., Buffington J. M., German Whitley M., Lanigan S. H., Roper B. B., 2009, Use of airborne near-infrared LiDAR for determining channel cross-section characteristics and monitoring aquatic habitat in Pacific Northwest rivers: A preliminary analysis [Chapter 6], *ISPRS Int J. Geo-Inf*, **8**(11).
- Gregory K.J., 2006, The human role in changing river channels, *Geomorphology*, **79**, 172-191 pp.
- Gob F., Bilodeau C., Thommeret N., Belliard J., Albert M-B., Tamisier V., Baudoin J-M., Kreutzenberger K., 2014, Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (CARHYCE), *géomorphologie*, **20**(1), 57-72 pp.
- Lague D., Launeau P., Michon C. R., Gouraud E., Juge C., Gentile W., Crave A., Hubert-Moy L., 2006, Lidar Topo-Bathy rivières, *JTeledetection*, *ONEMA*.
- Lindroth E.M., Rhoads B. L., Castillo C. R., Czuba J. A., Güneralp İ., Edmonds D., 2020, Spatial Variability in Bankfull Stage and Bank Elevations of Lowland Meandering Rivers: Relation to Rating Curves and Channel Planform Characteristics, *Water Resources Research*, **56**(8).
- McKean J., Nagel D., Tonina D., Bailey P., Wayne Wright C., Bohn C., Nayegandhi A., 2009, Remote Sensing of Channels and Riparian Zones with a Narrow-Beam Aquatic-Terrestrial LIDAR, *Remote Sens.*, **1**(4).
- Navratil O., Albert M. B., Hérouin E., Gresillon J-M., 2006, Determination of bankfull discharge magnitude and frequency: comparison of methods on 16 gravel-bed river reaches, *Earth Surf. Process. Landforms*, **31**(11).
- Navratil O., Albert M. B., Breil P., 2010, Test of three methods to detect the overbank flow from water level time-series analysis, *Hydrol. Process*, **24**(17).
- Passalacqua P., Belmont P., Foufoula-Georgiou E., 2012, Automatic geomorphic feature extraction from lidar in flat and engineered landscapes, *Water Resources Research*, **48**(3).
- Rollet A-J., Piégay H., Citterio A., 2008, Impacts of in-stream gravel mining on the geometry of perfluvial aquatic zones of the Doubs River, *Géographie physique et Quaternaire*, **60**(3).

Reinfelds I., 1997, Reconstruction of changes in bankfull width, *Applied Geography*, **17**(3).

Schneider C., Flörke M., Eisner S., Voss F., 2011, Large scale modelling of bankfull flow: An example for Europe, *Journal of Hydrology*, **408**, 235-245 pp.

Sholtes J., Bledsoe B., 2016, Half-Yield Discharge : Process-Based Predictor of Bankfull Discharge, *Journal of Hydraulic Engineering*, **142**(8).

Sofia G., Tarroli P., Cazorzi F., Dalla Fontana G., 2015, Downstream hydraulic geometry relationships: Gathering reference reach-scale width values from LiDAR, *Geomorphology*, **250**, 236-248 pp.

Xia J., Wu B., Wang G., Wang Y., 2010, Estimation of bankfull discharge in the Lower Yellow River using different approaches, *Geomorphology*, **117**, 66-77pp.

Thèses et mémoire

Alvarez A., Utilisation et traitement des données MNT LiDAR pour la modélisation hydraulique et l'étude hydrogéomorphologique dans le cadre de la Directive Européenne 2007/60/CE relative aux risques d'inondation, Ingénieur ESGT, ESGT, 2012.

Depret T., Fonctionnement morphodynamique actuel et historique des méandres du Cher, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I, University of Liverpool, 2014.

El Hage M., Étude de la qualité géomorphologique de modèles numériques de terrain issus de l'imagerie spatiale, Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers, Spécialité : Géomatique/Géodésie, Laboratoire de Géodésie et Géomatique, 2012.

Imhoff K., Sediment routing through channel confluences : Particle tracing in a gravel-bed river headwaters, 2015.

Navratil O., Débit de pleins bords et géométrie hydraulique : une description synthétique de la morphologie des cours d'eau pour relier le bassin versant et les habitats aquatiques, Docteur de l'INPG, Spécialité : Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement, Cemagref, 2005.

Liste des figures

Figure 1 : Critères de détermination du bon état des eaux de surface.....	9
Figure 2 : Schéma de principe des connectivités d'un cours d'eau.....	11
Figure 3 : Schéma de structure d'un cours d'eau.....	11
Figure 4 : Principe du protocole d'acquisition CARHYCE.....	13
Figure 5 : Champs d'action des outils nationaux CARHYCE et SYRAH.....	14
Figure 6 : Schéma de principe des différentes références de détermination du niveau à pleins bords	15
Figure 7 : Détermination des paramètres de pleins bords sur un site à chenaux multiples.....	16
Figure 8 : Photographies du niveau à pleins bords selon la définition haut de berge.....	17
Figure 9 : Schémas de principe du LiDAR.....	18
Figure 10: Spectre électromagnétique.....	19
Figure 11: Principe d'acquisition d'un LiDAR topo-bathymétrique.....	20
Figure 12: Différence entre MNT et MNS.....	21
Figure 13 : Nuage de points acquis par LiDAR.....	22
Figure 14 : Maillage régulier carré.....	22
Figure 15 : Maillage irrégulier.....	23
Figure 16 : Section du MNT du Cher représentée selon la méthode d'ombrage.....	23
Figure 17 : Absence de données au niveau des surfaces en eau sur un MNT DREAL.....	25
Figure 18 : MNT du RGE ALTI : Surfaces en eau mises à plat.....	25
Figure 19 : Bassin versant du Cher.....	26
Figure 20: Schéma de principe d'un secteur en gorge, en tresse et à méandre.....	27
Figure 21: Schéma de principe du calcul de profondeur hydraulique.....	28
Figure 22: Courbe de profondeur hydraulique en fonction de l'altitude.....	29
Figure 23 : Procédure de détermination de la largeur à pleins bords par analyse des courbures du relief.....	30
Figure 24 : Détermination de la plaine alluviale pour un tronçon.....	31
Figure 25: Détermination de la largeur à pleins bords par approche statistique Q-Qplot.....	32
Figure 26: Illustration d'une terrasse et d'une banquette alluviale.....	34
Figure 27 : Schéma de principe des étapes 1 et 2 de la reconnaissance automatique du niveau à pleins bords.....	35
Figure 28 : Schéma de principe de l'étape 3 de la reconnaissance automatique du niveau à pleins bords.....	36
Figure 29 : Secteur utilisé entre Saint-Amand-Montrond et Bruère-Allichamps.....	38
Figure 30 : Caractéristiques des géométries spatiales linéaires de R.....	39
Figure 31 : Exemple d'éléments de gestion des données de R.....	40
Figure 32 : Ligne vectorielle modélisant le centre du chenal, issue de la BD TOPAGE.....	41
Figure 33 : Division de la ligne centrale en entités linéaires.....	41
Figure 34 : Repérage automatique des zones à chenaux multiples.....	42
Figure 35 : Nouvelle fraction de ligne centrale.....	43
Figure 36 : Estimation de la largeur à pleins bords moyenne.....	43
Figure 37 : Transects générés avec leur distance à l'amont.....	44
Figure 38 : Remplacement des valeurs manquantes des surfaces en eau.....	45
Figure 39 : Calcul des aires entre la courbe du profil en travers et la droite d'altitude.....	46
Figure 40: Calcul d'aires, individualisation des surfaces et recherche des résidus.....	47
Figure 41 : Exemple de courbe de profondeur hydraulique en fonction de l'altitude.....	48
Figure 42 : Lissage par interpolation polynomiale de la courbe de profondeur hydraulique en fonction de l'altitude.....	49
Figure 43 : Niveau à pleins bords estimé identiquement pour les deux critères testés.....	55
Figure 44 : Divergence de détermination du niveau à pleins bords selon le critère testé.....	56
Figure 45 : Localisation des secteurs à gravières étudiés.....	57
Figure 46 : Détermination automatique du plein bord en présence d'une gravière de grande capacité	58

Figure 47 : Détermination automatique du plein bord en présence d'une gravière de capacité modérée	58
Figure 48 : Localisation des secteurs à chenaux multiples étudiés	59
Figure 49 : Détermination automatique du niveau à pleins bords sur un secteur à chenaux multiples	59
Figure 50 : Détermination automatique du niveau à pleins bords sur un secteur à chenaux multiples	60
Figure 51 : Visualisation sur le logiciel SIG QGIS de la couche shapefile obtenue en fin d'algorithme	61
Figure 52: Localisation du cours d'eau l'Armançon.....	62
Figure 53: Illustration du haut de berge dissimulé par le couvert végétal.....	64
Figure 54 : Couche vectorielle de la BD TOPO matérialisant les gravières d'un cours d'eau	66
Figure 55: Schémas de principe du fonctionnement de l'ADCP	67

Liste des tableaux

Tableau 1 : Définition des critères de référence.....	16
Tableau 2 : Comparaison entre le niveau à pleins bords estimé automatiquement par l’outil et les valeurs obtenues par photo-interprétation.	33
Tableau 3 : Comparatif de détermination automatique du niveau à pleins bords avec des valeurs expertisées sur un secteur du Cher	52
Tableau 4 : Analyse statistique des résultats obtenus à partir des deux critères testés.....	54
Tableau 5 : Comparatif de détermination automatique du niveau à pleins bords avec des valeurs expertisées sur la rivière de l’Armançon.	63
Tableau 6 : Analyse statistique des résultats obtenus automatiquement sur la rivière de l’Armançon	63

Calcul de la largeur à pleins bords de grands cours d'eau à partir de MNT lidar.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2021

RESUME

A partir de la première moitié du XIX^{ème} siècle, les activités humaines en milieu aquatique (canalisation, barrage, extractions de granulats) n'ont cessé de s'intensifier, engendrant les pressions anthropiques aujourd'hui bien connues. L'étude hydromorphologique du lit des cours d'eau, à travers la géométrie à plein bord (niveau, largeur), permet d'analyser leur réponse érosive et leur adaptation aux divers facteurs perturbant leur dynamique. Il s'agit d'indicateurs essentiels à la compréhension de l'équilibre écologique d'un milieu afin d'assurer le bon état de celui-ci au sens de la Directive Cadre sur l'eau.

L'utilisation d'un MNT LiDAR pour l'identification automatique des paramètres à plein bords a permis d'obtenir une cartographie continue des largeurs sur l'ensemble d'une plaine alluviale de grand cours d'eau français. Une approche par profondeur hydraulique reprenant les principes décrits par Faux *et al* (2009) et De Rosa *et al* (2019) a été mise en place. L'introduction de nouveaux critères de sélection du niveau à plein bords semble permettre d'appliquer cette méthodologie de manière efficace sur des sites à morphologie complexe.

Mots clés : Plein bord, largeur à plein bord, niveau à plein bord, hydromorphologie, Lidar, MNT.

SUMMARY

From the first half of the 19th century, human activities in the aquatic environment (channelization, dams, granulate extraction) have continued to intensify, generating the anthropic pressures that are now well known. The hydromorphological study of the bed of watercourses, through the bankfull geometry (level, width), makes it possible to analyse their erosive response and their adaptation to the various factors disturbing their dynamic. These are essential indicators for understanding the ecological balance of an environment in order to ensure its good status within the meaning of the Water Framework Directive.

The use of a LiDAR DTM for the automatic identification of bankfull parameters made it possible to obtain a continuous mapping of widths over the entire alluvial plain of a large French river. A hydraulic depth approach following the principles described by Faux *et al*. (2009) and De Rosa *et al*. (2019) was implemented. The introduction of new criteria for the selection of the bankfull level seems to allow this methodology to be applied effectively on sites with complex morphology.

Key words : Bankfull, Bankfull level, Bankfull width, hydromorphology, LiDAR, DTM.