



HAL
open science

Amélioration des procédures d'interpolation des données bathymétriques monofaisceau à l'aide des lignes de contrainte

Mohamed Sifer

► To cite this version:

Mohamed Sifer. Amélioration des procédures d'interpolation des données bathymétriques monofaisceau à l'aide des lignes de contrainte. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04412738

HAL Id: dumas-04412738

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04412738>

Submitted on 23 Jan 2024

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

SIFER Mohamed

Amélioration des procédures d'interpolation des données bathymétriques
monofaisceau à l'aide des lignes de contrainte

Soutenu le 07 septembre 2023

JURY

Madame NICOLAS-DUROY Joëlle
Monsieur TOUZÉ Thomas
Monsieur BONNEFOND Mathieu

Président du jury
Maître de stage
Enseignant référent

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon tuteur de stage, Thomas TOUZÉ. Sa disponibilité, son écoute attentive, son assistance précieuse et son enthousiasme contagieux m'ont grandement aidé à accomplir ce mémoire. De plus, ses conseils perspicaces pour maintenir une approche scientifique et logique dans la rédaction et la réflexion ont été d'une aide inestimable, me permettant de progresser efficacement dans mon travail.

Je tiens aussi à remercier mon professeur référent Mathieu BONNEFOND pour son aide et ses orientations, qui ont orienté mes pas sur le chemin adéquat lors de la rédaction et le suivi de mon travail.

Je remercie également toute l'équipe bathymétrie d'EDF-DTG. Leurs conversations et leur accueil pendant les mois de stage m'ont été très bénéfiques.

Ma famille mérite également toute ma gratitude. Leur soutien indéfectible dans tous mes projets et le temps qu'ils ont consacré à la relecture et à la correction de ce mémoire ont été très appréciés.

Ce mémoire marque la fin de ma formation d'ingénieur à l'ESGT et clôt un chapitre important. Je tiens à remercier tous les membres du personnel de l'ESGT qui contribuent à faire de cette formation et de cette école un lieu chaleureux et accueillant.

Liste des abréviations

GNSS : Global Navigation Satellite System

MNT : Modèle Numérique de Terrain

GPS : Global Positioning system

IDW : Inverse Distance Weight

ROV : Remotely Operated underwater Vehicle

AUV : Autonomous Underwater Vehicle

LIDAR : Laser Imaging Detection and Ranging

CSV : Comma-separated values

PCHIP : Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial

CHS : Cubic Hermite Spline

CWT : Continuous Wavelet Transform

SIFT : Scale-invariant feature transform

RFI : Rapport de Fin d'Intervention

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 5 |
| Partie 1 : Contexte et état de l'art | 7 |
| 1.1. LA BATHYMETRIE POUR LE CONTROLE DES OUVRAGES D'EDF | 7 |
| 1.2. SONDEUR MONOFAISCEAU ET SONDEUR MULTIFAISCEAUX | 8 |
| 1.2.1. PRINCIPES | 8 |
| 1.2.2. LIMITES ET COMPARAISON DES DEUX SONDEURS | 9 |
| 1.2.3. PRESENTATION DES LEVES MONOFAISCEAU ET MULTIFAISCEAUX | 10 |
| 1.3. DIFFERENCE ENTRE UNE INTERPOLATION ANISOTROPIQUE ET ISOTROPIQUE..... | 11 |
| 1.3.1. EXEMPLES ET LIMITES DES DEUX TYPES D'INTERPOLATION | 12 |
| 1.3.1. INTERET D'USAGE DES LIGNES DE CONTRAINTE..... | 14 |
| Partie 2 : Outils et matériels | 16 |
| 2.1. TRAITEMENT DES DONNEES BATHYMETRIQUES POUR EFFECTUER L'INTERPOLATION | 16 |
| 2.1.1. EXTRACTION DES DONNEES BATHYMETRIQUES MONOFAISCEAU | 16 |
| 2.1.2. DECOUPAGE EN PROFIL DES DONNEES BATHYMETRIQUES MONOFAISCEAU | 17 |
| 2.1.2.1. Approche géométrique | 19 |
| 2.1.2.2. Approche de plus proche voisin | 21 |
| 2.1.2.3. Comparaison entre les deux approches | 22 |
| 2.1.3. INTERPOLATION ENTRE PROFILS | 23 |
| 2.1.3.1. Interpolation linéaire..... | 23 |
| 2.1.3.2. Interpolation par des splines cubiques | 24 |
| 2.1.3.3. Interpolation avec Tautoine Mesher | 28 |
| 2.2. PROCEDURE D'AMELIORATION DE L'INTERPOLATION..... | 30 |
| 2.2.1. DEFINITION DES LIGNES DE CONTRAINTE..... | 31 |
| 2.2.1.1. Points d'intérêt pour la construction des lignes de contrainte..... | 31 |
| 2.2.1.2. Création des lignes de contrainte | 36 |
| Partie 3 : Résultats et discussions..... | 38 |
| 3.1. PRESENTATION DES RELEVES DISPONIBLES..... | 38 |
| 3.1.1. CANAL DE PENLY | 39 |
| 3.1.2. BASSIN DE ST-AIGNAN | 39 |
| 3.2. INTERPOLATION SANS LIGNES DE CONTRAINTE | 40 |
| 3.3. INTERPOLATION AVEC DES LIGNES DE CONTRAINTE..... | 43 |
| 3.4. COMPARAISON ET DISCUSSIONS | 45 |
| Conclusion..... | 46 |
| Bibliographie..... | 48 |
| Annexes | 51 |
| Liste des figures | 62 |

Introduction

Chaque année, EDF confie à des prestataires la responsabilité de réaliser des levés bathymétriques autour des ouvrages situés à proximité de sources d'eau, telles que les barrages et les centrales nucléaires. Ces levés permettent aux utilisateurs d'EDF de surveiller les rivières et les canaux, qui jouent un rôle crucial dans la production d'électricité pour les barrages ou dans le refroidissement des réacteurs des centrales nucléaires. Ces levés servent également à anticiper les risques potentiels qui pourraient perturber le bon fonctionnement de ces ouvrages. Les levés sont souvent effectués à l'aide de sondeurs acoustiques montés sur des embarcations ou des drones marins. Ces sondeurs peuvent être de type monofaisceau, générant des coupes transversales (profils) composées de points de profondeur, nécessitant ainsi une interpolation pour produire un MNT de la zone étudiée. D'autre part, les sondeurs multifaisceaux génèrent directement un MNT à partir de points denses, éliminant ainsi le besoin d'interpolation.

Dans certains cas, pour des raisons de coût et d'encombrement, les sondeurs monofaisceau sont utilisés dans des zones étroites et peu profondes pour les levés. Cela entraîne la nécessité d'interpolation pour créer un MNT de la zone étudiée. L'interpolation permet de générer des points intermédiaires afin de densifier les données. La méthode typique d'interpolation consiste à relier chaque point du premier profil avec son homologue dans le profil suivant d'une façon itérative et banale, générant ainsi des points intermédiaires le long de la trajectoire qui relie ces deux points qu'elle soit linéaire ou courbe selon la méthode d'interpolation choisie. Cependant, le défi réside dans la variation du nombre de points entre les profils et aussi la distribution des points, c'est-à-dire, on peut avoir des parties denses qui contiennent plus de points par rapport à d'autre partie des profils, ce qui nécessite un rééchantillonnage afin d'avoir le même nombre de points pour tous les profils. Mais cela ne résout pas le problème de la distribution (densité) des points, donc le problème est toujours posé, car l'interpolation ne garantit pas toujours la prise en compte de la géométrie et de la morphologie du terrain. Une autre approche à utiliser et qui constitue le cœur de ce sujet, ce sont les lignes de contrainte pour lier les points caractéristiques de chaque profil avec leurs homologues qui partagent les mêmes caractéristiques dans le profil suivant. Cette approche guide l'interpolation, évitant ainsi les décalages ou déformations des points. Ce type de décalage peut se manifester lorsque les points sont denses dans une partie d'un profil et moins denses dans une autre (caractère anisotrope), ce qui peut altérer le MNT interpolé.

Ainsi, la question clé de ce travail de fin d'études pourrait être formulée comme suit : Est-ce que les profils contiennent intrinsèquement les informations nécessaires pour construire

les lignes de contrainte de manière à réaliser une interpolation anisotropique d'un levé monofaisceau ?

Pour aborder cette question, nous allons commencer par exposer les différentes phases du processus de traitement qui permettent de créer un MNT par le biais de l'interpolation des données d'un relevé monofaisceau. Nous explorerons également les méthodes d'interpolation classiques qui sont utilisées pour générer un MNT. Ensuite, nous examinerons en détail l'approche des lignes de contraintes, en mettant en évidence les étapes spécifiques impliquées dans la définition de ces lignes. Et pour conclure, nous évaluerons l'efficacité de cette méthode en effectuant une comparaison avec des données issues d'un levé multifaisceaux.

Partie 1 : Contexte et état de l'art

Dans cette section, nous allons discuter pourquoi EDF utilise la bathymétrie. Nous expliquerons également les différences entre les systèmes de mesure monofaisceau et multifaisceaux, et pourquoi l'interpolation est nécessaire pour le système monofaisceau. Enfin, nous présenterons une solution pour améliorer l'interpolation.

1.1. La bathymétrie pour le contrôle des ouvrages d'EDF

La bathymétrie, qui étudie les formes du fond des rivières et des canaux, est un aspect clé de l'hydrographie. Elle est très importante pour EDF pour plusieurs raisons. D'abord, elle aide à garantir la sûreté des installations hydrauliques et nucléaires en mesurant avec précision les structures au fond de l'eau et en vérifiant la quantité de sédiments déposés à proximité pour assurer leur fonctionnement et leur bon état. Ensuite, elle permet de calculer combien de sédiments se sont déposés sur une période de temps donnée en comparant les cartes bathymétriques réalisées à différents moments. Pour les installations nucléaires, la bathymétrie assure que les canaux d'arrivée d'eau et les zones de captage d'eau ne sont pas obstrués par des sédiments, ce qui pourrait compromettre la quantité d'eau froide

nécessaire pour refroidir les réacteurs. De plus, elle aide à prévoir quand un dragage (le processus de retrait des sédiments) sera nécessaire en comparant les cartes bathymétriques.

Parmi les risques qui menacent les ouvrages d'EDF, il y a l'affouillement, qui est un processus d'érosion d'un canal ou d'une autre voie d'eau. Cela se produit généralement à cause de l'action de l'eau qui érode et transporte les particules de sol ou de sédiments, créant ainsi des cavités ou des trous dans le canal ce qui peut porter atteinte aux barrages.

Un autre risque est l'ensablement/la sédimentation, où des sédiments tels que le sable s'accumulent dans les canaux et rivières. Cela peut réduire la profondeur de l'eau et limiter son débit, ce qui pourrait aussi entraver le refroidissement des réacteurs nucléaires. Les zones de

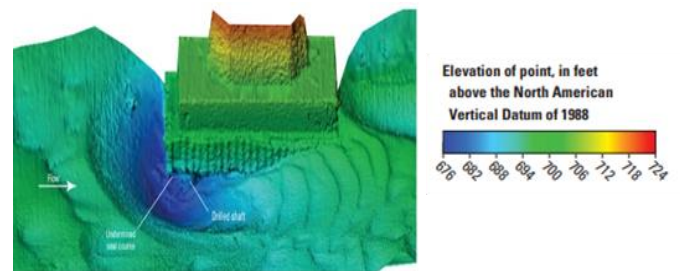


Figure 2 : Exemple de représentation tridimensionnelle de l'affouillement autour d'une pile de pont obtenue à l'aide d'un système de cartographie multifaisceaux. dans la rivière Missouri à Randolph. Source : (Huizinga 2016).

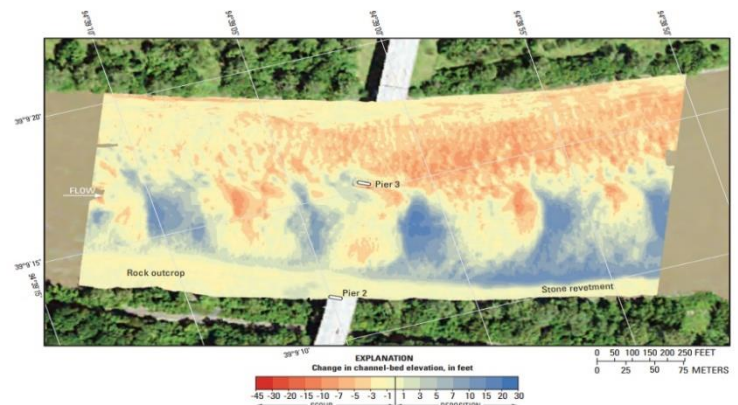


Figure 1 : Vue en plan du canal de la rivière Missouri cartographié atteinte à Kansas City, Mo., indiquant les zones de sédimentation en bleu du lit entre 2011 et 2015. (Huizinga 2016).

sédimentation sont repérables à l'aide des cartes différentielles entre deux bathymétries de dates différentes cela nous aide à calculer les volumes des sédiments et procéder au dragage.

Pour réaliser cette surveillance afin de relever les zones où se présente des risques potentiels sur les ouvrages, deux outils sont couramment utilisés pour effectuer les levés bathymétriques : le sondeur monofaisceau et le sondeur multifaisceaux.

1.2. Sondeur monofaisceau et sondeur multifaisceaux

1.2.1. Principes

Le sondeur bathymétrique fonctionne en émettant une onde acoustique qui se réfléchit sur le fond du canal et revient vers le transducteur, qui capte l'écho. Le temps de parcours du son entre l'émission et la réception de l'écho permet d'obtenir des informations sur la distance entre le capteur et le fond du canal. La vitesse du son sous la surface de l'eau, qui est d'environ 1450 m/s, varie en fonction de la salinité, de la température et de la pression. Tenant compte de ces variations, le sondeur bathymétrique est capable de fournir une mesure précise de la distance entre le capteur et le fond en temps réel.

L'objectif du sondeur monofaisceau est d'évaluer la profondeur en utilisant la diffusion des ondes sonores dans l'eau. Il détermine le temps nécessaire pour qu'un signal parcourt une distance aller-retour entre le transducteur et le fond. Ce temps de signal permet à l'appareil de calculer la profondeur existante. Le monofaisceau émet des ondes qui se propagent sous une forme conique. Le sondeur monofaisceau est doté d'un unique cône d'émission. En fonction des configurations et des fabricants, il peut être monofréquence ou bi-fréquence :

- Les fréquences basses (inférieures ou égales à 30 kHz) permettent d'atteindre de grandes profondeurs, allant au-delà de 200 m. Ces fréquences offrent une meilleure pénétration dans les fonds mous, tels que les sols vaseux.
- Les fréquences élevées (égales ou supérieures à 200 kHz) sont privilégiées pour des hauteurs d'eau plus faibles, allant jusqu'à 100/200 m, et fournissent des mesures de résolution supérieure, permettant de distinguer deux objets de tailles similaires.

Le sondeur multifaisceau fonctionne sur le même principe que le sondeur monofaisceau, mais il balaye plusieurs centaines de points simultanément, ce qui permet d'obtenir une densité de points plus élevée. Pour géolocaliser le nuage de points issu de l'appareil, il est nécessaire

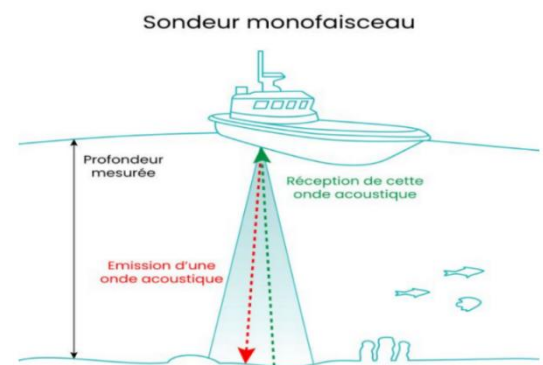


Figure 3 : Sondeur monofaisceau. Source: [Cadden (2022)]

d'utiliser un système de positionnement GNSS ainsi qu'une centrale inertielle. Le GPS fournit la position du bateau à un instant donné (la fréquence d'échantillonnage est de 1 Hz). Dans un système équipé d'un sondeur multifaisceau, plusieurs éléments supplémentaires sont requis :

- Un ou plusieurs récepteurs GNSS professionnels et précis, permettant de déterminer avec exactitude la position géographique (C'est aussi nécessaire en monofaisceau);
- Une centrale inertielle ou centrale d'attitude, qui compense les mouvements du support (vedette, ROV ou AUV) ;
- Un profileur de célérité, qui mesure la vitesse du son en fonction de divers paramètres tels que la pression, la température et la salinité ;

Le principe fondamental du sondeur multifaisceaux est d'évaluer la profondeur dans de multiples directions en utilisant la propagation d'une onde acoustique dans l'eau. Cependant, contrairement au sondeur monofaisceau, cette méthode implique la réception de l'onde par plusieurs centaines de transducteurs. Cette procédure est

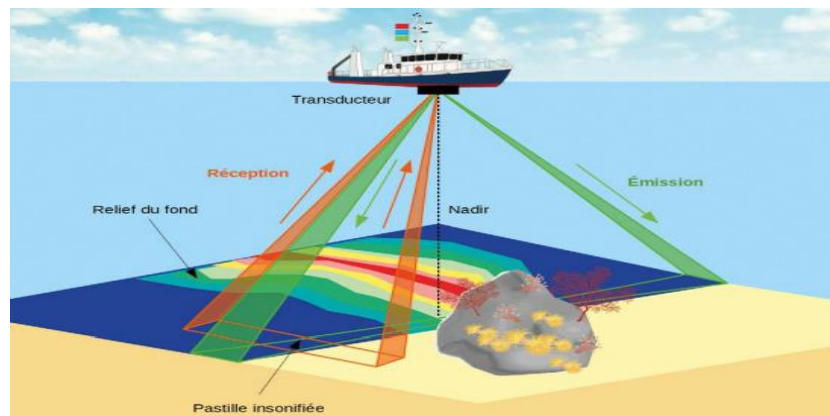


Figure 4 : Principe de fonctionnement d'un sondeur multifaisceaux. Source : (Abadie & Christophe, 2018. p :21)

réitérée des milliers de fois, étant donné que le sondeur multifaisceaux opère avec des bandes de 256 à 1024 faisceaux. Ces ondes sonores, qui se propagent par des variations de pression, sont générées par des transducteurs. Une fois émise, l'onde est réfléchiée par le fond et revient vers le transducteur. Le son se déplace à une vitesse d'environ 1500 mètres par seconde.

Le système monofaisceau ou multifaisceaux est généralement intégré directement sur une vedette hydrographique, un drone marin ou un drone sous-marin (ROV/AUV). Enfin, un ensemble de logiciels vient compléter l'installation pour permettre l'acquisition, l'analyse, le traitement et l'interprétation des données bathymétriques.

1.2.2. Limites et comparaison des deux sondeurs

Le sondeur monofaisceau, comme son nom l'indique, utilise un seul faisceau d'émission, généralement avec un angle fixe, pour mesurer la profondeur du fond canal. Cette technologie utilise des fréquences allant de 1 à 500 kHz et offre une ouverture angulaire de 5 à 30° à la fois longitudinalement et transversalement. Sa portée peut atteindre de 3 à 4 000 mètres, ce qui le rend idéal pour des applications telles que la bathymétrie, l'étude des structures géologiques, des processus sédimentaires, l'archéologie, la classification des fonds et l'halieutique. En termes

de coût, les sondeurs monofaisceau sont généralement moins chers que les sondeurs multifaisceaux, avec des prix allant de 10 000 à 50 000 euros. En plus de ça, ils sont précis et simples à utiliser dans les faibles profondeurs ce qui les rends plus pratiques pour les zones étroites comme les rivières/ les canaux (Chaîne de mesure plus légère (pas besoin de centrale inertielle) dans les zones difficiles d'accès).

D'un autre côté, les sondeurs multifaisceaux utilisent plusieurs centaines de faisceaux, offrant une couverture beaucoup plus large du fond de canal. Ces appareils fonctionnent à des fréquences allant de 12 à 500 kHz et disposent d'une ouverture angulaire longitudinale beaucoup plus étroite de $0,5^\circ$. L'ouverture angulaire transversale par faisceau varie de $0,5$ à 4° , tandis que l'ouverture angulaire transversale totale est beaucoup plus large, atteignant 150° . Les sondeurs multifaisceaux peuvent atteindre des profondeurs allant de 1 à 12 000 mètres. En raison de leur capacité à fournir des données plus détaillées et plus précises, ils sont généralement plus coûteux, avec des prix supérieurs à 50 000 euros. Cependant, leur gamme d'applications est aussi plus large, incluant la bathymétrie, l'archéologie, la classification des fonds, l'halieutique, l'étude des faciès sédimentaires, la cartographie des habitats marins et la détection de structures artificielles. Le tableau (1) dans les annexes résume les points importants qui distinguent les deux sondeurs.

Alors, grâce à son coût abordable et sa capacité à s'adapter à des zones étroites et à des canaux de faible profondeur, le sondeur monofaisceau se présente comme l'outil idéal pour réaliser des levés bathymétriques dans les zones étroites et moins profondes. Cela permet de surveiller l'ensablement et de suivre les zones de sédimentation.

1.2.3. Présentation des levés monofaisceau et multifaisceaux

Pour bien comprendre la distinction entre les deux levés, il suffit de voir leurs produits et leurs résolutions. Par exemple, pour un levé monofaisceau, on obtient après filtrage des données, un fichier « xyz ». Ce fichier permet de visualiser un nuage de points, qui représente des coupes transversales discrètement espacés à une distance variable. Ces profils traversent le courant, composés de points de profondeur perpendiculaires au flux de la rivière. Afin de rendre ce produit utilisable, il est essentiel d'interpoler entre les profils pour modéliser et générer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) ou bien une simulation 3D. Ceci est utilisable par les

hydrographes pour identifier les zones d'ensablement. Alors que dans le cas d'un levé multifaisceaux d'une zone donnée, la visualisation montre une carte structurée et continue. Celle-ci permet d'observer la morphologie et la géométrie du lit de la rivière, semblable à une carte bathymétrique offrant plus de détails sans nécessiter d'opérations de calcul supplémentaires.

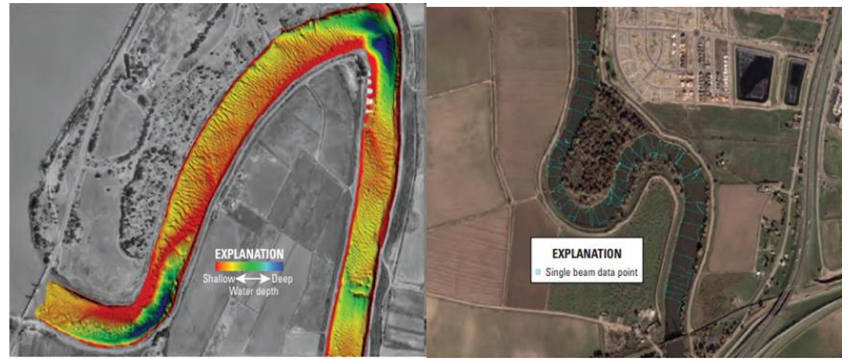


Figure 5 : Comparaison entre un levé multifaisceaux et un levé monofaisceau (extrait de la rivière de Mississippi Rivers à Missouri aux états unis). Source : [Huizinga et Heimann (2018)]

À ce stade, il est important d'introduire un vocabulaire précis qui nous aidera à décrire les choses de manière adéquate. En effet, on qualifie un levé monofaisceau "anisotrope" car il s'agit de données sous la formes de profils. Il y a de la densité de points dans le long des profils, mais entre deux profils, on n'a pas de données. Cela peut entraîner des variations dans la densité des informations en fonction de l'angle d'observation ou de la direction du profil. En d'autres termes, l'anisotropie fait référence à la variation des données en fonction de la direction, où certaines zones peuvent avoir plus de détails que d'autres D'autre part, un levé multifaisceaux est souvent comparé à être "isotrope" par analogie. Dans ce type de levé, les données sont collectées de manière plus dense dans toutes les directions, en effet le modèle numérique de terrain se construit au fur et à mesure de l'avancement du navire. On obtient donc un nuage de point dense à la fois transversalement, dans le sens de mesure du capteur, que longitudinalement, dans le sens d'avancement du navire.

1.3. Différence entre une interpolation anisotropique et isotropique

La forme des fonds des canaux et des rivières présente une diversité de configurations le long du cours d'eau. Lorsque des relevés monofaisceau sont réalisés dans ces régions, l'approche habituelle consiste à collecter des ensembles de données de profondeur le long de la zone à étudier qui forment des profils. Ces profils peuvent varier en densité, avec une concentration plus importante de points de mesure dans certaines parties et une densité moindre dans d'autres. De plus, des variations irrégulières entre ces ensembles de données se manifestent, en particulier dans des canaux sinueux.

C'est pourquoi il est nécessaire d'appliquer une technique d'interpolation anisotrope. Tout d'abord, cette technique comble les espaces vides entre les profils, ce qui permet de générer un MNT. Deuxièmement, elle prend en considération la forme et la configuration du terrain, en particulier dans les régions où l'anisotropie est marquée. Parallèlement, il existe également une méthode d'interpolation appelée "isotrope", utilisée dans des situations où les caractéristiques des zones d'étude et des profils sont identiques. Cependant, cette situation d'identité n'est pas toujours représentative de la réalité, compte tenu des variations naturelles du terrain et des ensembles de données.

1.3.1. Exemples et limites des deux types d'interpolation

La sélection de la méthode d'interpolation devrait se baser sur sa capacité à s'adapter et à traduire la morphologie du fond du canal. Cela nous contraint généralement à exclure les méthodes d'interpolation isotropes pour cette situation, car elles ne sont pas adaptées à la majorité des cas de canaux et des rivières.

Dans leur article "Tatooine Mesher", L.Duron et S.Khaled ont mis en évidence l'incompatibilité des méthodes isotropes pour des données anisotropes, en effet, Ils ont examiné trois méthodes d'interpolation isotropes, comme illustré dans la figure. On peut bien observer que les méthodes isotropes classiques présentent des problèmes majeurs :

- Le fond interpolé peut être discontinu,
- Une géométrie complexe peut conduire à des incohérences, en particulier dans les courbures ou en cas de sections transversales non droites.

Ces méthodes d'interpolation isotropes sont disponibles dans la plupart des logiciels de SIG notamment QGIS qui est le plus utilisé dans ce domaine, pour donner un exemple comme indiqué dans la figure 6 on trouve :

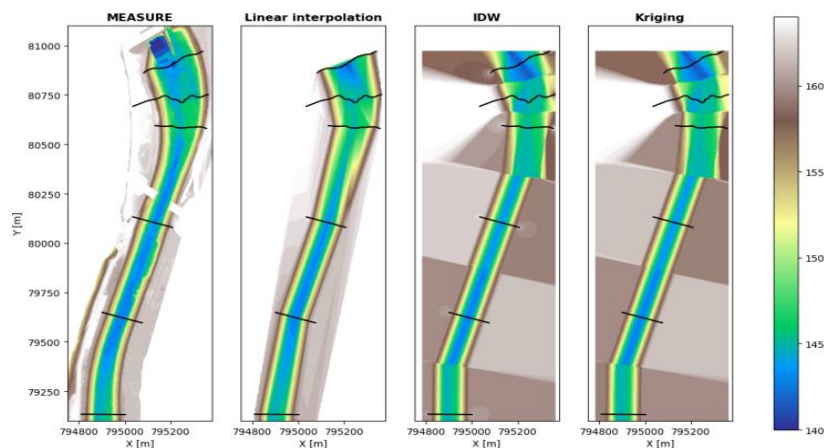


Figure 6 : Bathymétrie mesurée (à gauche) comparée à la bathymétrie interpolée à partir de l'altitude le long des sections transversales (3 méthodes d'interpolation). À partir de l'altitude le long des sections transversales (3 méthodes d'interpolation : Linéaire, IDW et Krigeage). Source : [Duron et al. (2019)]

- L'interpolation par méthode inverse de la distance pondérée (IDW) : Elle attribue un poids à chaque point de données en fonction de sa distance par rapport au point

d'interpolation. Les points les plus proches ont un poids plus important que les points plus éloignés.

- L'interpolation du krigeage : Elle est basée sur les statistiques et prend en compte la distance entre les points de données et l'orientation. L'interpolation de Krigeage est souvent utilisée en géostatistique, mais elle peut être appliquée à d'autres domaines. Il existe des variantes de Krigeage, qui peuvent être considérées comme isotropiques ou anisotropiques, selon la manière dont elles sont configurées.

Ainsi, le choix de la méthode d'interpolation doit se faire parmi les techniques anisotropiques, qui sont particulièrement efficaces lorsqu'il s'agit d'interpoler des données anisotropes. Les splines cubiques sont un bon choix pour les données discrétisées, offrant un effet fluide et réaliste des lits de rivière. Par ailleurs, même si l'interpolation linéaire n'est pas toujours la plus fiable ou réaliste, elle tend à fonctionner convenablement dans la majorité des situations.

Bien que les interpolations anisotropiques soient bien adaptées pour modéliser efficacement le lit de la rivière, Cependant, certaines caractéristiques et détails précis de la zone peuvent être manqués, en effet l'interpolation est une opération mathématique qui ne dispose pas d'une logique intrinsèque pour prendre en compte ces spécificités. L'objectif est de trouver une méthode qui établisse une connexion logique entre les points qui composent chaque profil avec

les points du profil suivant en tenant compte de leurs caractéristiques géométriques ou autres attributs. Cette approche vise à préserver la continuité et la structure du MNT obtenu par interpolation. Dans la méthode classique (comme montre les figure 7 et 8), la génération d'un MNT implique initialement l'échantillonnage d'un nombre spécifique de points le long des profils, afin d'assurer un nombre constant de points dans tous les profils composant le relevé. Ensuite, une correspondance itérative est établie entre les points du premier profil et ceux du profil suivant. Cela garantit que le premier point de profondeur est associé au premier point du profil suivant, et ainsi de suite, en parcourant l'ensemble du relevé. Cependant, cette méthode ne permet pas de mettre en évidence tous les détails du terrain, d'où apparaît le besoin d'une méthode

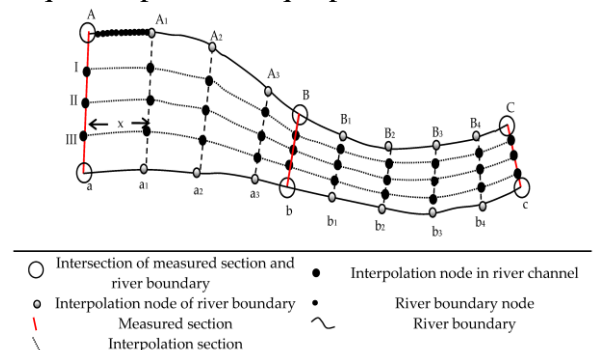


Figure 8 : Schéma expliquant la méthode classique d'interpolation en mettant en évidence la mise en correspondance des points situés en vis-à-vis le long des profils. Source : [Liang et al. (2022)]

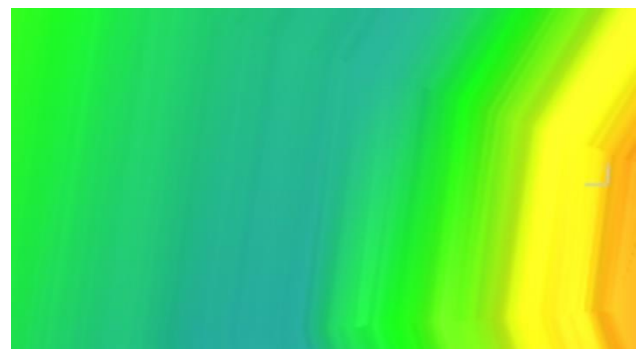


Figure 7 : Extrait d'un levé interpolé selon la méthode classique par le logiciel Cloud Compare

basé sur des lignes de contrainte définies selon les caractéristiques géométriques et morphologiques du terrain.

1.3.1. Intérêt d'usage des lignes de contrainte

L'intégration des lignes de contrainte est loin d'être une nouveauté ; c'est une pratique courante chez les hydrographes et les géologues pour modéliser l'environnement d'étude et mettre en valeur sa morphologie avec une précision optimale. Par exemple, lors de l'étude d'un canal, une ligne de contrainte peut être utilisée pour illustrer le tracé du chenal principal, les limites d'une berge ou la localisation d'une crête sablonneuse ou d'un banc de gravier. Ces caractéristiques exercent une influence marquée sur la profondeur de l'eau et le flux de la rivière, mais pourraient être mal représentées si les points de mesure sont trop dispersés. La création de ces lignes pour guider et délimiter les zones à interpoler exige une expertise et une connaissance approfondie de la région. Habituellement, les spécialistes se fondent sur des orthophotos ou des images aériennes pour tracer ces lignes de contrainte. La procédure n'est pas particulièrement compliquée une fois que les lignes de contrainte sont établies. Le processus débute par l'importation de ces lignes de contrainte dans un logiciel de maillage. Ensuite, l'interpolation est effectuée entre ces lignes de manière à conserver les caractéristiques du terrain. Puis, des nœuds sont positionnés sur les profils interpolés afin de créer un maillage. Ce maillage servira de fondation pour générer un modèle numérique de terrain (MNT).

En effet, l'intégration de lignes de contrainte peut se révéler plus cruciale que le choix de la méthode d'interpolation. Même en utilisant une méthode d'interpolation standard, possiblement moins précise. Cependant, cela n'occulte pas le fait que pour obtenir une modélisation idéale du terrain, il serait préférable de combiner les deux, malgré les complications et le temps de calcul que cela implique, dans le but d'atteindre une précision optimale.

Pour mieux illustrer l'utilité des lignes de contrainte, envisageons deux profils consécutifs ayant la configuration présentée dans la figure ci-dessous. Lorsque nous employons une interpolation linéaire conventionnelle, reliant directement les points sans considérer la géométrie des deux

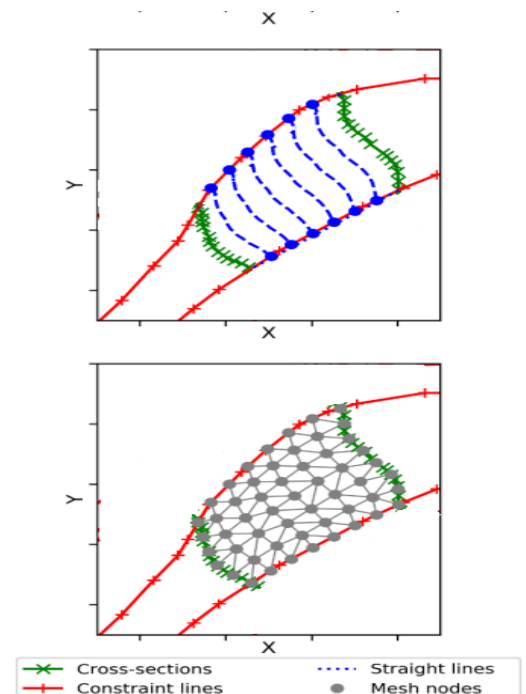


Figure 9 : Illustrations des étapes de génération du maillage pour un seul sous-modèle en deux lignes de contrainte. Source : [Duron et al. (2019)]

profils, le résultat obtenu est déformé et non uniforme, ne reflétant pas fidèlement la réalité topographique. En revanche, lorsque nous utilisons des lignes de contrainte qui prennent en compte la géométrie et la morphologie des deux profils, il devient possible d'obtenir un résultat homogène et plus proche de la réalité du terrain.

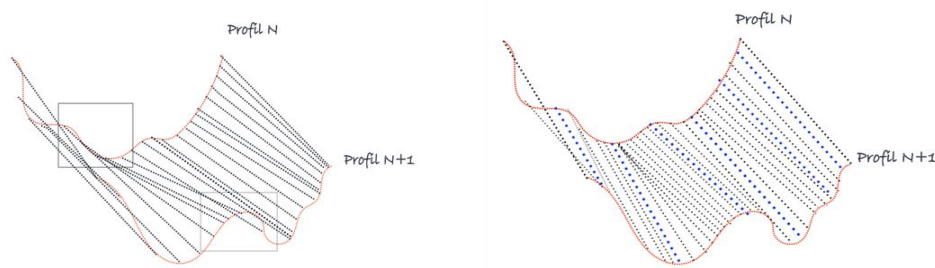


Figure 10 : Schéma illustrant la différence entre l'interpolation entre deux profils sans l'utilisation de lignes de contrainte et l'interpolation qui intègre les lignes de contrainte, (les traits en bleu illustrent les lignes de contraintes, et les points en noirs sont les nœuds générés par interpolation)

Toutefois, la principale complexité réside dans la création des lignes de contrainte, en particulier lorsqu'elles sont élaborées par des experts, et cela est lié à la temporalité. En d'autres termes, la question récurrente est de savoir si mes orthophotos ont été acquises en même temps que mes données bathymétriques, ce qui est difficile à effectuer. Leur création nécessite généralement l'utilisation d'orthophotos ou d'images LIDAR du site. Par conséquent, l'objectif serait de découvrir une approche ou une méthode qui ne nécessite pas l'utilisation de données LIDAR ou d'orthophotos. Comme nous sommes limités par les contraintes des levés monofaisceau, cela signifie que les données obtenues se

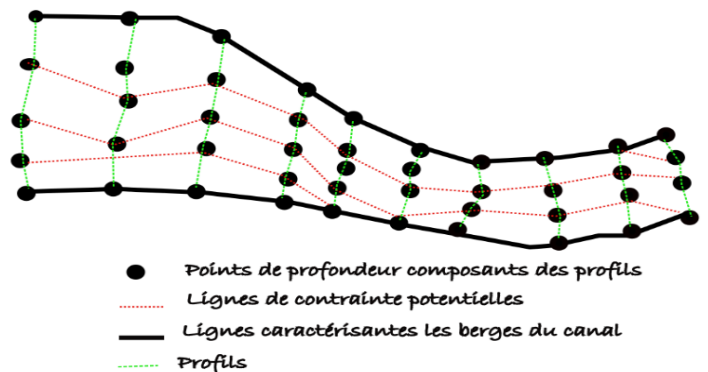


Figure 11 : Vue en plan illustrant les possibles lignes de contrainte en prenant en considération la géométrie du canal.

composent principalement de profils ou de coupes transversales discrètes constitués de points de profondeur. Dans ce cas, d'un point de vue abstrait, nous pourrions envisager d'utiliser des fonctions concaves qui peuvent également être construites à partir des points de profondeur par le biais d'interpolations anisotropes. Par conséquent, nous pourrions être en mesure de détecter des points d'intérêt, qui dans notre cas sont soit des extrémums locaux (maximas ou minimas), soit des points d'inflexion. En fait, c'est la même logique qu'une étude des fonctions. Ces points peuvent ensuite être associés en fonction de leurs caractéristiques pour créer des lignes de contrainte.

Partie 2 : Outils et matériels

Dans cette partie nous mettrons l'accent sur la chaîne de traitement des données bathymétriques, en commençant par expliquer les étapes de traitement (après l'acquisition et l'extraction des données bathymétriques) pour générer un MNT interpolé avec des méthodes d'interpolation anisotrope, ces étapes commencent d'abord par le découpage en profil et ensuite l'interpolation entre ces profils. Ensuite nous mettrons l'accent pas la suite sur un outil qui permet non seulement d'exécuter l'interpolation mais aussi d'utiliser des lignes de contrainte pour guider les interpolateurs, Cependant, il est important de noter que la création de ces lignes de contrainte ne se fait pas automatiquement. Nous avons donc dû chercher des méthodes pour générer ces lignes de contrainte dans une zone donnée. Enfin, nous allons présenter les différentes approches pour la création de ces lignes, en prenant en compte les points caractéristiques des profils.

2.1. Traitement des données bathymétriques pour effectuer l'interpolation

Le principal objectif des levés bathymétriques pour EDF est de surveiller les changements sédimentaires à proximité des ouvrages EDF. C'est pourquoi l'étape d'interpolation est cruciale pour l'évaluation finale du suivi. En effet, les utilisateurs EDF des données bathymétriques ont besoin de disposer de MNT densifiés afin d'évaluer et anticiper les risques potentiels associés aux ouvrages, par exemple pour le transport sédimentaire ou la simulation de passages de crues.

2.1.1. Extraction des données bathymétriques monofaisceau

L'équipe de Bathymétrie d'EDF-DTG suit une méthode spécifique pour traiter et simuler les données afin d'obtenir les résultats qu'ils recherchent. En effet, le processus d'extraction des données bathymétriques monofaisceau commence par la réception des données en provenance du prestataire qui a réalisé le levé. Les données reçues sont généralement prétraitées pour éliminer toutes les erreurs potentielles, dans le but de faciliter le traitement ultérieur. Cependant, cela n'élimine pas complètement la possibilité d'erreurs de mesure, lesquelles peuvent affecter de manière cumulative les résultats finaux.

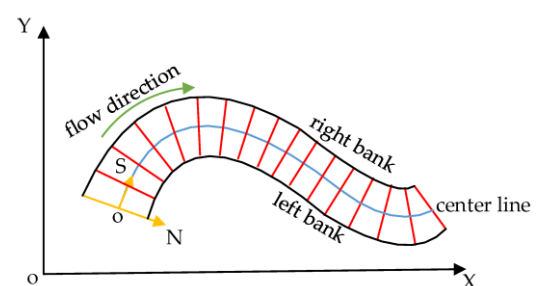


Figure 12 : Exemple de distribution des profils dans un levé monofaisceau. Source : [Liang et al. (2022)]

Les données obtenues à la suite de l'intervention du prestataire avec un levé monofaisceau, en plus du rapport final d'intervention, incluent généralement les coordonnées E (Est), N (Nord) et h (altitude en IGN69 ou en NGF-Lallemand). Ces données sont souvent présentées en projection Lambert 93. En important le fichier XYZ dans QGIS pour visualiser les données, on peut clairement observer des profils qui sont espacés de manière irrégulière.

```

PENLY_2020-06-22_mono_reproj_L93_CM.xyz - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage Aide
571525.94 6988145.48 3.52
571526.04 6988145.38 3.44
571526.13 6988145.28 3.42
571526.23 6988145.19 3.35
571526.33 6988145.09 3.30
571526.42 6988144.99 3.24
571526.52 6988144.89 3.20
571526.61 6988144.80 3.13
571526.71 6988144.70 3.05
571526.81 6988144.59 2.95
571526.93 6988144.47 2.85
571527.06 6988144.34 2.73
571527.20 6988144.20 2.62
571527.33 6988144.07 2.54
571527.46 6988143.93 2.52
571527.59 6988143.80 2.51
571527.72 6988143.67 2.53
571527.85 6988143.54 2.57
571527.99 6988143.40 2.63
571528.12 6988143.27 2.66
571528.27 6988143.11 2.68
571528.44 6988142.94 2.69

```

Figure 13 : Exemple du fichier xyz d'un levé monofaisceau réalisé le 2020/06/22

Ces profils illustrent la trajectoire du navire lors de la collecte des points de données, il existe toujours une ligne qui traverse l'ensemble des profils. Cette ligne représente en fait un traversier, qui sert pour valider les données (Aux intersections entre le traversier et les profils, les altitudes doivent coïncider).

Le fichier « xyz » se structure en trois colonnes : les deux premières indiquent les coordonnées planimétriques (X, Y), tandis que la troisième colonne renseigne à la fois sur l'altitude et la profondeur enregistrée par le sondeur monofaisceau du bateau. Lors de l'observation des données brutes, la géométrie du levé est clairement mise en lumière. Il est facile de noter la discontinuité des profils, chaque profil étant visuellement identifiable. Néanmoins, lors du traitement, il est complexe de relever les coordonnées constituant chaque profil.

Dans ce cas il va falloir procéder au découpage des données brutes en profil ce qui nécessite de réfléchir à une méthode automatique ou semi-automatique pour réaliser cette opération.

2.1.2. Découpage en profil des données bathymétriques monofaisceau

Le découpage ou tri des données bathymétriques est une étape complexe et essentielle, car l'identification de chaque profil nécessite une approche automatique pour les séparer les uns des autres. Cette étape revêt une grande importance, car l'interpolation ne peut pas être effectuée directement sur les données brutes. En effet l'identification des profils est souvent effectuée en amont en utilisant un fichier spécifique connu sous le nom de "lnw". Ce type de fichier provient généralement de HYPACK, un logiciel de pointe conçu spécifiquement pour répondre à ce type de besoins dans le domaine de l'hydrographie. Après avoir importé les données nécessaires dans HYPACK, la première étape pour déterminer les profils consiste à sélectionner la trajectoire le long de laquelle on souhaite générer ces profils. Cette trajectoire, qui peut être soit une ligne droite, soit une ligne courbe, est déterminée en fonction des caractéristiques géographiques de la zone à étudier.

La définition des positions de ces profils, peut être réalisée de plusieurs façons. Dans l'interface utilisateur de HYPACK (préparation > Editeurs > Editeur de profil), on peut interagir directement avec la carte bathymétrique affichée, et utiliser des outils visuels, comme le clic de la souris, pour définir ces positions. Alternativement, la saisie manuelle de coordonnées peut également être utilisée pour une précision accrue. Il est également possible de définir un espacement régulier entre chaque profil, ce qui peut être utile pour obtenir une vue systématique et cohérente du terrain sous-marin.

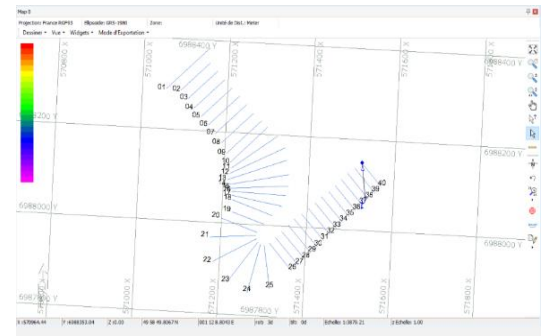


Figure 14 : Fenêtre du logiciel HYPACK avec le découpage en profil manuel des données monofaisceau

Comme on peut remarquer dans la figure ci-dessous que l'identification et la numérotation des profils sont effectuées au sein du logiciel HYPACK. Cependant, cette tâche peut devenir laborieuse, particulièrement lorsqu'il s'agit de levés bathymétriques de grande envergure. Il s'agit d'une phase du processus qui s'avère complexe à automatiser.

Dans certains cas, la préparation des fichiers de positions de profils peut être réalisée avant le début du levé. Cette approche permet au sondeur de se concentrer sur les zones prédéterminées. Toutefois, cette méthode ne peut être utilisée lorsque le levé est effectué par des prestataires externes. La raison principale est l'incertitude inhérente à la géométrie de la zone à étudier. Cette imprécision peut potentiellement affecter la qualité du levé, ce qui risque d'engager la responsabilité du prestataire. C'est pour cette raison que cette tâche d'identification des profils est souvent effectuée après le levé. Une telle approche permet de s'assurer de la qualité des données bathymétriques fournies par le prestataire avant de procéder à l'étape d'analyse des profils.

Une fois que ces sections ont été définies et vérifiées dans HYPACK, la prochaine étape consiste à exporter ces informations sous forme de fichier "Lnw", ou Line Navigation Windows. Ce fichier est essentiel, car il conserve toutes les informations géospatiales essentielles des profils. Les informations contenues dans le fichier Lnw comprennent, entre autres, les coordonnées géographiques précises de chaque profil. En conservant ces informations dans un fichier Lnw, on peut facilement accéder et analyser ces données ultérieurement pour des besoins de recherche ou d'analyse plus poussés.

Le fichier Lnw va nous servir pour récupérer les coordonnées des points qui compose chaque profil, cette phase de découpe peut être qualifiée de semi-automatique, étant donné que l'opération de définition des profils pour générer le fichier Lnw est nécessaire. On peut observer dans la figure suivante que le fichier est composé des noms qui permettent de distinguer les coordonnées des profils, par exemple :

- LNS signifie le nombre des lignes dans le fichier
- LNN signifie numéro de la ligne qui identifie le profil
- LIN le nombre des points qui définissent le profil pour nous, souvent deux points qui sont les extrémités.
- PTS signifie les coordonnées X, Y d'une extrémité.
- EOL = end of line, signifie la fin de la ligne pour pouvoir séparer entre les profils

```

penly_profils_proto_avec40emeProfil.lnw - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage Aide
LNS 40
LIN 2|
PTS 571570.70 6988098.86
PTS 571523.34 6988148.71
LNN 40
EOL
LIN 2
PTS 571556.46 6988084.72
PTS 571507.40 6988136.05
LNN 39
EOL
LIN 2
PTS 571542.22 6988070.58
PTS 571491.46 6988123.39
LNN 38
EOL
...

```

Figure 15 : Composantes du fichier Lnw exporté par le logiciel Hypack

Pour réaliser ce découpage, deux approches courantes sont utilisées : la première, proposée par l'équipe bathymétrie d'EDF-DTG (implémenté sur Scilab), repose sur une approche géométrique, tandis que la deuxième se base sur une méthode de plus proche voisin proposé par mes soins.

2.1.2.1. Approche géométrique

Cette approche est couramment utilisé par l'équipe bathymétrie d'EDF-DTG pour traiter les données bathymétriques monofaisceau. Le but est de diviser ces données en profils individuels, puis de les organiser et de les traiter pour une analyse ultérieure. La première étape de cette approche est de récupérer le fichier Lnw de la zone d'études. La deuxième étape du processus est d'orienter ces profils de manière continue. L'orientation continue signifie que chaque profil est aligné de manière à faciliter l'analyse. Pour chaque profil, on calcule un azimut, qui est l'angle entre le nord géographique et la direction du profil. Et puis on vérifie ensuite si la différence d'azimut entre le profil actuel et le précédent est supérieure à 90 degrés. Si c'est le cas, on doit inverser le sens du profil pour maintenir une orientation continue. La troisième étape est la sélection des points qui se trouvent à l'intérieur d'un polygone défini autour du profil. Pour chaque profil, le script crée un polygone de sélection autour de lui en utilisant les droites médianes entre le profil actuel

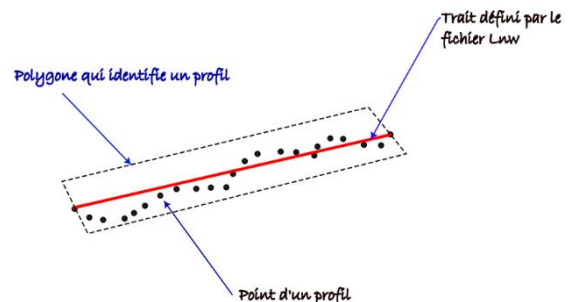


Figure 16 : Vue en plan mettant en avant le processus d'indentification d'un profil

et ceux qui le précèdent et le suivent. Ensuite, on identifie les points bathymétriques qui se trouvent à l'intérieur de ce polygone.

Une fois que les points appropriés ont été sélectionnés pour chaque profil, la quatrième étape consiste à trier ces points le long de l'axe principal du profil. On effectue une analyse en composantes principales pour identifier l'axe principal des points du profil.

Après le tri, les profils et leurs coordonnées sont enregistrés pour une analyse ultérieure. Chaque profil doit être stocké et enregistré dans un fichier csv, et les coordonnées de tous les points sont également stockées dans une matrice. Cette étape permet de conserver les données pour une utilisation future, que ce soit pour une analyse plus approfondie ou pour la visualisation.

Il faut noter que l'implémentation de cette approche a été faite sur SCILAB¹.

Bien que cette approche ait ses avantages, elle trouve ses limites dans les cas plus complexes. Par exemple, lorsque l'on travaille avec des données qui comprennent des profils qui se croisent ou sont très proches les uns des autres, l'efficacité de cette méthode peut être compromise. Prenons l'exemple de la zone de Saint-Aignan, où il existe de nombreux profils qui se croisent. Dans de tels cas, le découpage effectué par le script peut manquer de cohérence. En effet, si une partie d'un profil se trouve à l'intérieur du polygone qui entoure le profil suivant, le code va traiter cette section comme un profil complet. Cela peut entraîner des résultats imprévisibles et incohérents, rendant l'analyse ultérieure difficile et potentiellement erronée. En somme, bien que l'approche utilisée par le script puisse être très utile dans des conditions idéales, elle présente certaines limites lorsqu'elle est appliquée à des ensembles de données plus complexes ou inhabituels. Dans la figure 16, on remarque que le découpage n'est pas parfait en raison de l'interaction entre différentes parties des profils, ce qui peut entraîner une distorsion de certains profils.

Cette imperfection peut causer divers défauts, notamment pendant l'interpolation, conduisant à des modèles déformés.

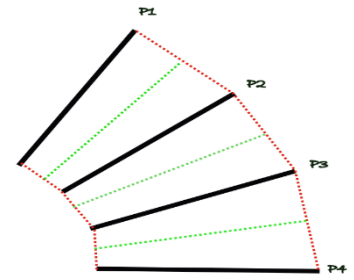


Figure 17 : Vue en plan qui explique les étapes de création des polygones

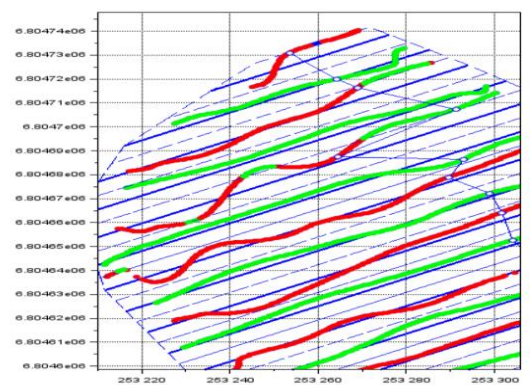


Figure 18 : Exemple des anomalies résultantes de l'approche géométrique

¹ Logiciel de calcul numérique en open source développé par INRIA

Cette technique s'avère efficace dans des situations idéales, c'est-à-dire lorsque les données sont en bon état et que les profils sont suffisamment espacés pour pouvoir être facilement distingués les uns des autres. Cependant, des problèmes peuvent survenir lorsque les conditions ne sont pas idéales, par exemple lorsque des difficultés sont rencontrées lors du levé (par exemple : difficultés de navigation, houle et vent, et impossibilité de suivre les lignes théoriques). Cela peut occasionnellement résulter en des profils déformés, trop rapprochés ou même croisés, rendant leur identification mutuelle difficile.

Dans de telles situations, j'ai envisagé une méthode basée sur une logique ponctuelle plutôt que géométrique. Cette approche s'aligne sur la méthode connue sous le nom du "plus proche voisin".

2.1.2.2. Approche de plus proche voisin

Grâce à l'utilisation d'un fichier Lnw, cette approche permet d'identifier des profils bathymétriques. Une fois ces profils identifiés, la logique sous-jacente de cette approche commence par la production d'une série de points, comme par exemple un nombre de 100 points par défaut, qui sont distribués uniformément tout au long du profil identifié. Ensuite, une procédure d'interpolation est mise en œuvre.

Après l'interpolation, chaque point est associé à la mesure bathymétrique la plus proche disponible dans les données

« xyz ». Cette association est réalisée grâce à un processus de recherche du point le plus proche. Ce processus calcule la distance entre le point interpolé et chaque point dans les données bathymétriques et retourne ainsi le point le plus proche. Une distance maximale peut être spécifiée lors de cette opération. Dans ce cas, seuls les points qui sont à une distance inférieure ou égale à cette distance maximale du point interpolé sont pris en compte. En d'autres termes, l'approche entreprend une sélection des points qui composent les profils afin d'éliminer les anomalies potentiellement présentes comme dans l'approche géométrique préalablement mentionnée. En éliminant ces anomalies, l'approche assure une représentation plus précise et fidèle de la réalité bathymétrique. La traduction de cette approche sous forme d'un algorithme nous impose de mener le processus suivant :

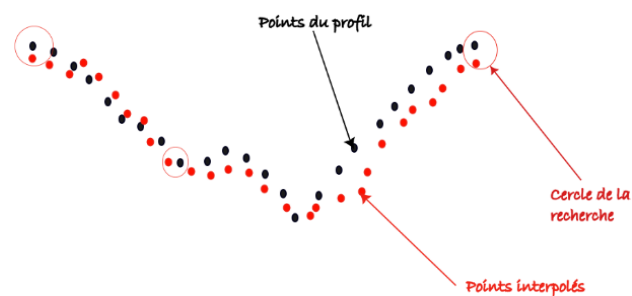


Figure 19 : Vue en travers qui explique le processus de la recherche du point le plus proche pour découper en profil les données bathymétriques monofaisceau (cercles rouges ayant pour centre des points générés.)

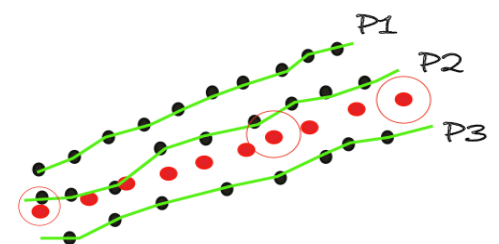


Figure 20 : Vue en plan du processus de la recherche du point le plus proche pour découper en profil les données bathymétriques monofaisceau

- Lecture du fichier « xyz » qui contient les données bathymétriques
- Lecture du fichier Lnw qui contient les profils de bathymétrie.
- Pour chaque profil, on calcule un certain nombre de points (par défaut 100) qui sont répartis de manière uniforme le long de ce profil.
- Pour chaque point interpolé on cherche le point de mesure de bathymétrie le plus proche dans les données « xyz » et l'ajouter à une liste.
- Génération des fichiers CSV séparés pour chaque profil contenant les points qui valident la contrainte de distance.
- Finalement, on peut dessiner chaque profil avec les points de bathymétrie interpolés pour effectuer une comparaison.

Bien que cette méthode ait ses avantages, elle présente néanmoins certains inconvénients et engendre divers problèmes. En effet, elle peut parfois créer des profils qui s'éloignent de la réalité, en se fondant sur une interpolation théorique. De surcroît, des erreurs et des écarts peuvent survenir au niveau des points. Toutefois, ces anomalies peuvent être rectifiées en ajustant la distance maximale afin de choisir le point le plus proche.

2.1.2.3. Comparaison entre les deux approches

La mise en comparaison des deux méthodes requiert une évaluation sous plusieurs angles. Le premier aspect à considérer est la maniabilité du produit, notamment dans des cas complexes. En utilisant l'approche géométrique pour découper les données bathymétriques d'une zone mal acquise, on obtient un produit difficile à manipuler et truffé d'erreurs flagrantes, pouvant entraver l'interpolation ultérieure. Par ailleurs, le découpage réalisé avec la méthode du plus proche voisin donne lieu à un résultat plus facilement manipulable, mais qui ne reflète pas fidèlement la réalité. Parfois, les profils découpés sont incomplets ou ne coïncident pas avec les véritables données de la zone, ce qui peut également causer des problèmes lors de



Figure 21 : [En orange] le découpage effectué par l'approche géométrique [en vert] le découpage effectué par l'approche de plus proche voisin

l'interpolation. L'accumulation de ces erreurs peut finalement conduire à un résultat peu fiable.

En résumé, les deux méthodes sont efficaces lorsqu'elles sont appliquées à des cas simples. Cependant, dans des levés plus complexes avec des données mal acquies, des problèmes persistent en ce qui concerne la précision des valeurs des profils découpés et la qualité du découpage. Après avoir s'assurer de la qualité des données découpé on peut procéder à l'étape d'interpolation qui présente le cœur de la démarche de la production d'un MNT du lit de la rivière.

2.1.3. Interpolation entre profils

L'objectif principal de l'interpolation est de générer de nouvelles valeurs qui se situent de manière logique et crédible entre un ensemble de valeurs déjà fournies et bien définies spatialement. Ce processus d'interpolation repose sur l'idée que ces nouvelles valeurs doivent être en harmonie avec l'ensemble des valeurs existantes, c'est-à-dire qu'elles doivent respecter la tendance générale et les nuances présentes dans les données initiales. Autrement dit, l'interpolation agit comme un pont, comblant les lacunes entre les points de données connus en créant de nouvelles valeurs qui correspondent à la distribution et au comportement observés des données originales. Dans cette partie on va s'intéresser aux méthodes d'interpolation anisotropique qui s'adapte à l'anisotropie du lit de rivière notamment l'interpolation linéaire et l'interpolation par splines cubiques, contrairement à l'interpolation isotropique qui ne se s'adapte pas aux variations du milieu.

2.1.3.1. Interpolation linéaire

L'interpolation linéaire est une méthode qui substitue les fonctions par morceaux constantes par des fonctions linéaires, qui, dans une représentation bidimensionnelle, sont caractérisées par des segments de droites. Pour définir droite on utilise la fameuse équation $y = ax + b$, où 'a' et 'b' sont des nombres réels. Ici, 'a' est le coefficient directeur, qui indique la tangente

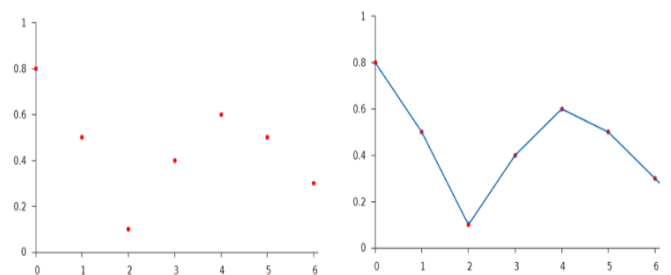


Figure 22 : [à gauche] Ensemble de points initiaux à interpoler et [à droite] une courbe représentative d'une interpolation linéaire. Source : [Yahiko, s. d.-b]

de la droite, et 'b' est l'ordonnée à l'origine, qui signifie où la droite croise l'axe des ordonnées. Ainsi, pour estimer une valeur de 'y' entre deux points en fonction de 'x', nous devons trouver les valeurs appropriées de 'a' et 'b'. En pratique, cela revient à résoudre un système d'équations linéaires comprenant deux équations avec deux inconnues.

$$\begin{cases} y_0 = ax_0 + b \\ y_1 = ax_1 + b \end{cases} \quad \text{Sur l'intervalle } [0 ; 1] \text{ on a : } \begin{cases} a = (y_1 - y_0)/(x_1 - x_0) \\ b = y_0 \end{cases}$$

Pour appliquer cette méthode d'interpolation sur des données X, Y et Z, il faut d'abord se concentrer sur la dimension 1D. Cela implique de réaliser une interpolation entre les points des profils sur un plan transversal X et Z, où la variation des données est particulièrement notable. Cela nous permet de visualiser les profils, car un plan X, Y nous offre uniquement une vue de dessus. En revanche, nous cherchons à obtenir une vue transversale du profil.

Pour illustrer le concept de l'interpolation, disons que nous avons un levé bathymétrique monofaisceau composé de deux profils. Nous commençons d'abord par interpoler chaque profil de manière transversale afin d'obtenir le maximum de points qui seront interpolés. Par la suite, nous pouvons générer un profil intermédiaire qui est linéairement interpolé.

L'application de cette méthode d'interpolation sur des données monofaisceau génère un maillage structuré comme dans la figure 23. On remarque que l'interpolation linéaire conserve un aspect géométrique et manque de l'aspect réaliste notamment au niveau des berges car elles devraient être courbées, mais en général les formes du fond du canal sont les principales informations qui nous intéressent, pour la comparaison, on peut prendre un relevé multifaisceaux bien dense et le visualiser, pour pouvoir comparer qualitativement le relevé interpolé et le relevé multifaisceaux qui est considéré pour nous comme des données vraies.

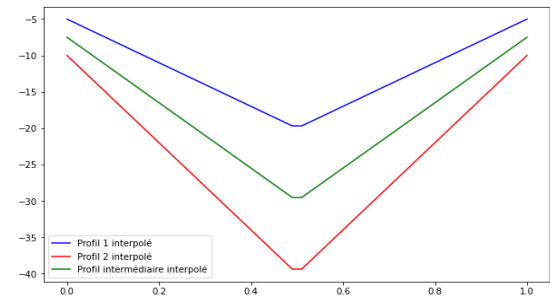


Figure 23 : Vue en travers d'un profil intermédiaire généré à l'aide d'une interpolation linéaire

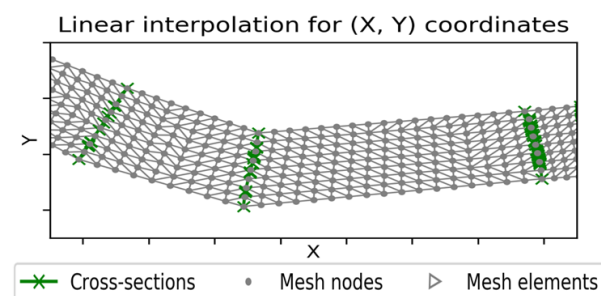


Figure 24 : Exemple d'un maillage interpolé linéairement avec l'outil Tatoonine Mesher. Source : [Duron et al. (2019)]

2.1.3.2. Interpolation par des splines cubiques

L'interpolation spline cubique est un moyen de trouver une courbe qui relie les points de données avec un degré de trois ou moins. Les splines sont des polynômes lisses et continues sur un intervalle donné et également leurs dérivées premières sont aussi continues, c'est-à-dire de classe C_1 ou C_2 . L'interpolation par splines cubiques est souvent utilisée lorsque nous avons un ensemble de points de données et que nous voulons créer une courbe lisse qui passe par tous ces points. Cependant, l'interpolation par splines cubiques ne prend pas en compte les valeurs des dérivées (c'est-à-dire les pentes) aux points de données. C'est pour cela la plupart des experts de calcul utilisent une version qui prend en compte les valeurs des dérivées à ces points

pour estimer la fonction cubique, c'est la méthode des splines cubiques d'Hermite ou CHS (Cubic Hermite Splines en anglais), c'est une méthode d'interpolation mathématique avancée qui peut être utilisée pour créer des courbes lisses qui passent par un ensemble de points donnés. Elles sont nommées d'après le mathématicien français Charles Hermite, il y'a d'autres méthodes d'interpolation par des splines cubiques par exemple : la méthode AKIMA et la méthode PCHIP, mais on ne va pas aborder leur principe dans ce travail.

Le fondement de la méthode des CHS est l'idée que nous pouvons créer une courbe lisse et continue en ajustant une série de polynômes cubiques entre chaque paire de points consécutifs. Un polynôme cubique est une équation mathématique de la forme ax^3+bx^2+cx+d , et il a la particularité d'avoir une courbe qui peut prendre une grande variété de formes, selon les valeurs des coefficients a, b, c, et

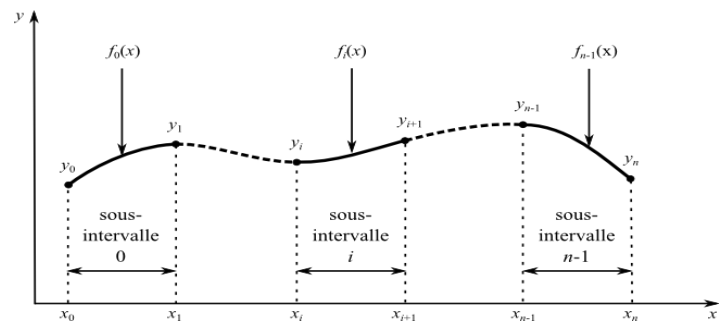


Figure 25 : Construction des splines par CHS. Source : [Yahiko, s. d.-b]

d. La condition fondamentale pour créer un CHS est que la courbe doit passer par chaque point de l'ensemble de points donnés. C'est ce que l'on appelle une condition d'interpolation. Pour chaque paire de points consécutifs, un polynôme cubique est ajusté de manière à ce que la courbe passe par ces deux points. Pour exprimer ça mathématiquement :

- $f_i(x_{i+1}) = f_{i+1}(x_{i+1})$ (continuité de la spline) ;
- $f'_i(x_{i+1}) = f'_{i+1}(x_{i+1})$ (continuité de la dérivé première)
- $f''_i(x_{i+1}) = f''_{i+1}(x_{i+1})$ (continuité de la dérivé seconde)
-
- $f^{(k)}_i(x_{i+1}) = f^{(k)}_{i+1}(x_{i+1})$ (continuité de la dérivé k – ième)

Il est nécessaire d'assurer la dérivabilité et la continuité du polynôme $f_i(x)$, et dans ce cas le degré du polynôme doit être supérieur ou égal à $k+1$ (en cas de généralisation). Il faut noter que plus le degré du polynôme sera élevé, plus le spline aura un aspect lisse, mais, les calculs seront plus couteux et nécessitent des machines plus performantes. C'est pour cette raison qu'on se limite à des polynômes de degré 3.

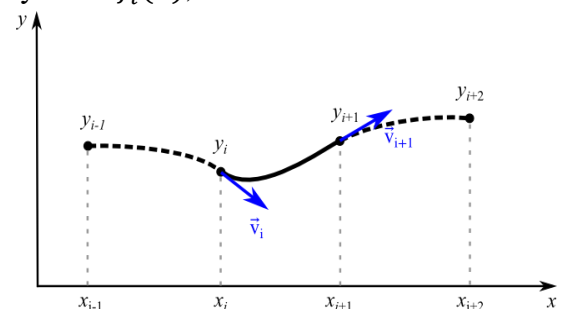


Figure 26 : Les tangentes d'une spline cubique d'Hermite sur deux points consécutifs. Source : [Yahiko, s. d.-b]

Les splines d'Hermite sont une catégorie de splines cubiques

qui sont continûment dérivables une fois (appartenant à la classe $C1$) sur l'intervalle $[x_0 ; x_n]$.

Cette propriété rend les splines de Hermite plus simples à manipuler par rapport aux splines ayant une continuité de classe $C2$. En introduisant un changement de variable tel que $t =$

$\frac{(x - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)}$, nous pouvons obtenir une fonction $s_i(t)$ équivalente à la fonction $f_i(x_{i+1})$ sur le i ème sous-intervalle $[x_i; x_{i+1}]$, où $s_i(t)$ est définie sur l'intervalle $[0; 1]$. Ce changement de variable facilite l'analyse et la manipulation des splines de Hermite sur chaque sous-intervalle individuel.

La formulation générale d'un morceau de spline, qui dans ce cas est un polynôme de troisième degré, ainsi que sa première dérivée, peut donc être exprimée comme suit :

$$\begin{cases} s_i(t) = a_{i,0} + a_{i,1} \cdot t_i + a_{i,2} \cdot t_i^2 + a_{i,3} \cdot t_i^3 \\ s'_i(t) = a_{i,1} + 2 \cdot a_{i,2} \cdot t_i + 3 \cdot a_{i,3} \cdot t_i^2 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \text{En } t=0 \text{ et } t=1 : \begin{cases} s_i(0) = a_{i,0} \\ s'_i(0) = a_{i,1} \\ s_i(1) = a_{i,0} + a_{i,1} + a_{i,2} + a_{i,3} \\ s'_i(1) = a_{i,1} + 2 \cdot a_{i,2} + 3 \cdot a_{i,3} \end{cases}$$

Cela nous permettra d'exprimer les coefficients inconnus de notre polynôme (spline) :

$$\begin{cases} a_{i,0} = s_i(0) \\ a_{i,1} = s'_i(0) \\ a_{i,2} = -3s_i(0) + 3s_i(1) - 2s'_i(0) - s'_i(1) \\ a_{i,3} = 2s_i(0) - 2s_i(1) + s'_i(0) + s'_i(1) \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \text{En } t=0 \text{ et } t=1 \quad s'_i(0) = m_i \text{ et } s'_i(1) = m_{i+1}$$

$$\begin{cases} a_{i,0} = y_i \\ a_{i,1} = m_i \\ a_{i,2} = -y_i + 3 \cdot y_{i+1} - 2 \cdot m_i - m_{i+1} \\ a_{i,3} = 2 \cdot y_i - 2 \cdot y_{i+1} + m_i + m_{i+1} \end{cases}$$

Les tangentes \vec{v}_i et \vec{v}_{i+1} aux nœuds i et $i+1$, on peut facilement conclure que ces pentes exercent une influence sur l'aspect de la spline en chaque nœud :

Dans les calculs classiques, il est courant d'utiliser les formes matricielles pour caractériser les splines qui sont des polynômes de 3ème degré- tel que chaque colonne correspond aux coefficients du polynôme ($a_{i,0}, a_{i,1}, a_{i,2}$ et $a_{i,3}$) :

$$s_i(t) = \begin{pmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & 1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ m_i \\ m_{i+1} \end{pmatrix}$$

La matrice au milieu est appelée la matrice de base, à partir d'elle on peut extraire les fonctions de base d'Hermite qui permettent de réécrire les polynômes de la spline :

$$s_i(t) = h_{00}(t) \cdot y_i + h_{10}(t) \cdot y_{i+1} + h_{01}(t) \cdot m_i + h_{11}(t) \cdot m_{i+1}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} h_{00}(t) = 1 - 3t^2 + 2t^3 \\ h_{10}(t) = 3t^2 - 2t^3 \\ h_{01}(t) = t - 2t^2 + t^3 \\ h_{11}(t) = -t^2 + t^3 \end{cases}$$

Cette représentation met en évidence les polynômes indépendamment des valeurs et des pentes des tangentes aux nœuds. C'est un avantage notable car cela permet d'optimiser les calculs lors du tracé des splines. Si on choisit un pas de tracé constant, ce qui équivaut à une subdivision fixe de l'intervalle $[0 ; 1]$, pour la variable t , les valeurs des fonctions de base de Hermite pour chaque pas n'auront à être calculées qu'une seule fois pour un sous-intervalle i , et pourront ensuite être réutilisées pour tous les autres sous-intervalles. La valeur d'interpolation ne sera alors qu'une somme de quatre produits, ce qui simplifie considérablement le calcul.

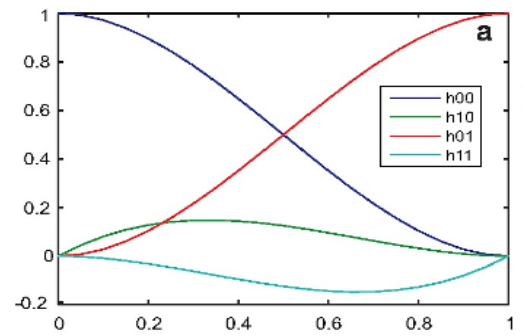


Figure 27 : Représentations des fonctions h_{00} , h_{01} , h_{10} et h_{11} dans un intervalle $[0 ; 1]$

Pour comprendre pleinement la distinction entre l'interpolation linéaire et l'interpolation par splines cubiques d'Hermite, nous les avons appliquées à un levé monofaisceau imaginaire constitué de deux profils. Cela équivaut à ce que nous avons fait pour l'interpolation linéaire, la seule différence étant que nous avons utilisé les splines cubiques d'Hermite pour interpoler dans les deux directions, longitudinale et transversale. On peut observer que les profils obtenus présentent un aspect plus lisse comparé à ceux interpolés linéairement,

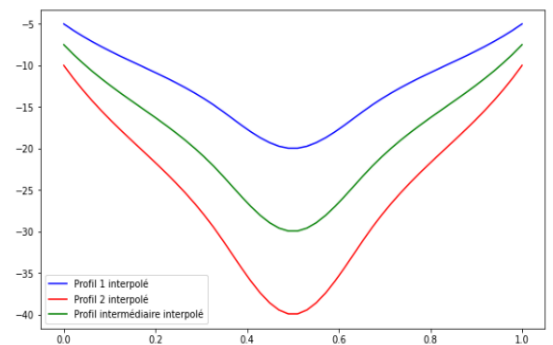


Figure 29 : Vue en travers d'un profil intermédiaire généré à l'aide d'une interpolation CHS

après l'application de cette méthode sur des données monofaisceau, on peut observer dans la figure 28 que l'interpolation cubique d'Hermite offre un rendu plus lisse, ce qui confère à l'image obtenue un aspect régulier et plus réaliste, surtout en ce qui concerne la représentation des formes géométriques des sections transversales et du canal. Cette méthode d'interpolation permet aux hydrographes et autres spécialistes de modéliser avec précision et d'identifier les différents phénomènes qui se produisent au fond des canaux. Cependant, même l'interpolation cubique d'Hermite n'est pas sans ses propres limites. En effet, elle peut présenter des problèmes en ce qui concerne la

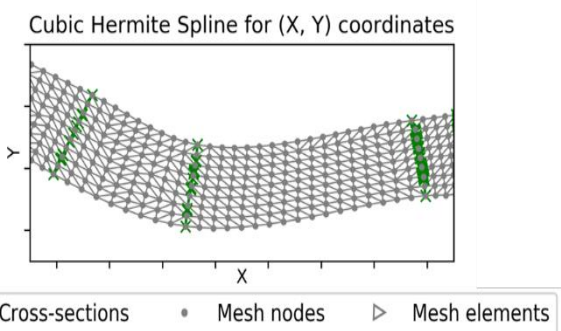


Figure 28 : Exemple d'un maillage interpolé par la méthode CHS. Source : [Duron et al. (2019)]

continuité de la dérivée seconde. Cette contrainte peut affecter l'exactitude de l'interpolation, ce qui peut à son tour limiter son utilité dans certains contextes d'application, c'est pour cela, on

doit adopter une démarche qui permet d'améliorer la procédure d'interpolation pour atteindre des résultats fidèles à la réalité.

2.1.3.3. Interpolation avec Tatoonine Mesher

Pour passer à l'application pratique de ces méthodes, j'ai utilisé un outil appelé Tatoonine Mesher. Cet outil, développé par Mr. L. DURON et K. Saad de la CNR (Centre Nationale du Rhône), vise à améliorer le traitement des données bathymétriques et hydrographiques. Il offre la possibilité de choisir la méthode d'interpolation à appliquer, c'est un ensemble des codes python accessible par le public sur le site GitHub. Pour exécuter le code, il suffit de télécharger tous les codes sur GitHub, bien qu'il soit plus pratique de le faire directement à partir de la ligne de commande en utilisant la commande « git clone ». Cependant, cela nécessite d'avoir préalablement installé le logiciel Git, qui peut être téléchargé sur Internet.

Après cela, on peut installer les bibliothèques nécessaires pour exécuter les programmes. Il est recommandé d'exécuter ces programmes dans un environnement personnel, qui peut être créé à l'aide de la commande « python -m venv », bien que cela reste possible dans l'environnement de base. Il est important de noter que l'outil ne fonctionne qu'avec des formats spécifiés par l'auteur. (Voir annexes).

La lecture des données n'est pas automatique, car il n'est pas évident de convertir les points "xyz" en polylineZ, ce qui m'a obligé à développer un code

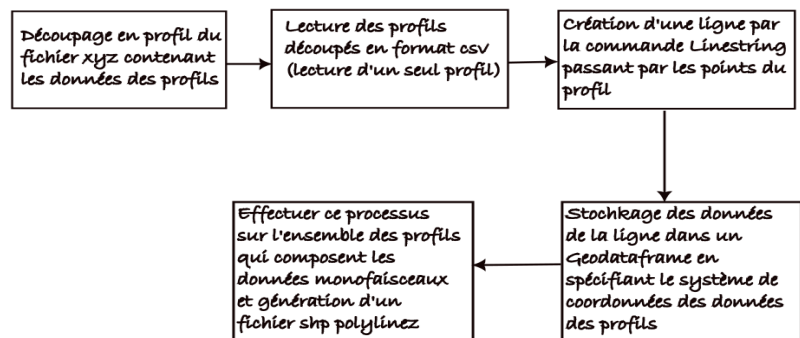


Figure 30 : Schéma expliquant le processus de conversion des profils en un fichier shp

spécifique pour cela. Le processus de conversion commence par le découpage des données brutes en profils individuels, puis par la conversion de ces données en shapefile grâce à la bibliothèque Python « shapely. geometry ». Les données découpées sont au format CSV, ce qui facilite leur lecture. J'ai développé une fonction nommée csv-to-polylineZ qui lit ces deux profils CSV, puis les convertit à l'aide de la fonction linestring de shapely. geometry. Ces données sont ensuite intégrées dans un dataframe, en n'oubliant pas de spécifier le système de coordonnées, dans notre cas c'est lambert93. Un fichier shapefile contenant des données polylineZ construites à partir des points xyz dans les fichiers csv est ensuite créé. Pour simplifier la tâche, nous pouvons utiliser une boucle qui parcourt tous les fichiers CSV dans un dossier et crée des fichiers shp à partir d'eux, qui peuvent ensuite être fusionnés pour former un fichier

shp unique contenant tous les profils au format shp polylineZ. Nous avons également besoin d'un axe hydraulique pour faire fonctionner l'outil. En effet, il s'agit d'une ligne imaginaire qui aide à guider l'interpolation. Cet axe est couramment utilisé en hydraulique pour comprendre comment l'eau se déplace à travers un système donné. Dans mon cas, j'ai utilisé le thalweg comme mon axe hydraulique ou un traversier. J'ai aussi testé si l'inversion de l'écoulement pourrait perturber notre interpolateur, dans le but d'explorer les divers facteurs qui pourraient perturber l'interpolation mais apparemment ça ne change pas beaucoup sur la forme du MNT. La conversion s'est avérée nécessaire dans ce cas également, en suivant la même procédure que précédemment pour construire une ligne passant par les points les plus bas du profil afin de créer le thalweg. Ce dernier sera directement orienté si nous spécifions sa direction. Le seul ajout à ce stade a été l'implémentation d'un programme qui détermine le point le plus bas, que j'ai intégré dans une fonction appelée « find_lowest_points ». Cette fonction détermine le point le plus bas de chaque profil.

En effet, trois principales applications de Tatoonine Mesher correspondent à différents scripts :

- **Densify profiles (densify_profiles.py)** : Cet outil est utilisé pour affiner et densifier les profils 1D en vue d'un calcul 1D ultérieur, aucun maillage n'étant généré.
- **Interpolator and mesher (interpolator_and_mesher.py)** : Ce script est dédié à l'interpolation et/ou au maillage des canaux pour les modèles 2D.
- **Visualize 1D model results (mesh_crue10_run.py and mesh_mascaret_run.py)** : Ce dernier outil est basé sur le même principe que interpolator_and_mesher.py mais les données d'entrée correspondent à un modèle 1D (composé d'un ensemble de branches avec leurs sections transversales associées) et le fichier de sortie contient des surfaces temporelles en 2D pour chaque variable. Les données suivantes peuvent être maillées et visualisées :
 - Géométrie du modèle : bathymétrie et coefficient de frottement, spatialisation.
 - Résultats hydrauliques 1D : un ensemble d'états stables ou une simulation transitoire. Les variables peuvent être 1D.

```
(base) PS C:\Users\Admin\desktop\TatoonineMesher-master> python mesh_and_interpolate.py C:\Users\Admin\Desktop\output\output_line_traversier.shp C:\Users\Admin\Desktop\merged\Desktop.shp --long_step 0.5 --lat_step 0.5 --outfile_mesh C:\Users\Admin\Desktop\penly_mnt.slf --outfile_nodes C:\Users\Admin\Desktop\noeuds_penly.shp --interp_values LINEAR
-> Reading input files
-> Compute distances along hydraulic axis to order cross-sections
-> Checking that cross-sections do not intersect
-> Interpolate initial cross-sections taking into account limits
-> Building mesh per zone and then per bed
-> Exports points in shp
-> Building mesh
Mesh with 230490 nodes and 457708 elements
-> Write generated mesh
writing the output file: "C:\Users\Admin\Desktop\penly_mnt.slf"
```

Figure 31 : la commande utilisée pour effectuer l'interpolation et générer un maillage avec l'outil Tatoonine Mesher, l'interpolation spécifié ici est : linéaire.

Afin de générer un maillage/MNT dans l'outil Tutooine Mesher, nous avons utilisé la fonction « Interpolator and mesher ». Pour cela après avoir mis les données d'entrée, il faut aussi spécifier l'emplacement des données de sortie qui seront un maillage interpolé et un fichier contenant des nœuds, Il est important de prêter attention au format de sortie de chaque type de données. Pour le maillage, trois formats de fichiers sont pris en charge : t3s (BlueKenue), LandXML ou slf (Telemac), tandis que pour les nœuds, il n'y en a que deux : (*.shp, *.xyz).

Pour visualiser les données interpolées j'ai fait appel à des logiciels dédiés à cette tâche. J'ai initialement testé deux programmes de visualisation de maillages, MeshLab et Paraview, mais les résultats visuels n'étaient pas satisfaisants. J'ai ensuite utilisé BlueKenue, un logiciel canadien conçu pour analyser et visualiser les données hydrographiques. Ce logiciel peut lire directement les résultats des modèles TELEMAC, ADCIRC et HydroSim. J'ai réussi à visualiser le maillage interpolé de mon fichier généré en format slf grâce à BlueKenue.

Jusqu'à ce point, nous avons réussi à découvrir un outil qui permet l'interpolation de toutes les données bathymétriques monofaisceau, qui ont déjà été découpées et converties au format shp. Cet outil s'avère extrêmement efficace, offrant non seulement une capacité d'interpolation, mais également la prise en compte des lignes de contrainte. En d'autres termes, cet outil n'établit pas lui-même les lignes de contrainte, mais il requiert celles qui ont été créées, d'où notre intervention pour définir ces lignes.

2.2. Procédure d'amélioration de l'interpolation

L'objectif principal de l'amélioration de l'interpolation est de développer une approche innovante qui mette en avant plus de détails en tenant compte de la géométrie et la morphologie du terrain. L'idée est d'obtenir un modèle numérique de terrain (MNT) qui soit plus fidèle et plus proche de la réalité. Nous supposons que le levé réalisé en multifaisceaux constitue notre référence de vérité pour pouvoir effectuer une comparaison pertinente. L'approche principale de ce sujet repose sur les lignes de contrainte, qui permet de prendre en compte la morphologie du terrain lors de la création d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) par interpolation. Dans les méthodes classiques d'interpolation linéaire ou de splines cubiques, la logique qui implique la correspondance itérative des points entre profils conduit généralement à une perte de détails inhérents à la morphologie du terrain. C'est ici que l'approche des lignes de contrainte entre en jeu, pour résoudre ce problème en reliant les points caractéristiques qui définissent la géométrie et la morphologie du terrain. La procédure commence d'abord par la détection des points d'intérêt dans chaque profil. Ces points d'intérêt pourraient être des extrema locaux si on

envisage un profil comme une fonction, ou des points d'inflexion qui indiquent un changement de direction de la fonction.

2.2.1. Définition des lignes de contrainte

Dans le cadre de la construction rigoureuse des lignes de contrainte, notre première étape sera de déterminer les points d'intérêt qui caractérisent chaque profil, ces points peuvent être des extrema locaux ou bien des points d'inflexion. Ensuite, On va créer des segments reliant les points d'intérêt entre deux profils consécutifs. Ainsi, nous allons relier ces segments entre eux, si cela est possible, pour former les lignes de contrainte. Il est également à noter que nous pourrions avoir des segments qui relient deux points d'intérêt sur un côté, mais ne trouvent pas leur correspondant sur l'autre côté. Cela va créer des segments distincts reliant certaines parties des profils aux autres. Le véritable défi dans notre situation consiste à déterminer la meilleure stratégie pour identifier les points d'intérêt dans chaque profil, puis à trouver les correspondances les plus pertinentes entre un profil et un autre. Cela permettrait de construire des lignes ou des segments pour guider et restreindre l'interpolation.

2.2.1.1. Points d'intérêt pour la construction des lignes de contrainte

La détection des points d'intérêt sur chaque profil du levé monofaisceau constitue une étape essentielle dans l'élaboration des lignes de contraintes. Afin de détecter ces points d'intérêt, j'ai adopté deux approches. La première consiste à identifier les extrémités locales (maxima et minima locaux) de chaque profil. La deuxième approche, quant à elle, vise à déterminer les points d'inflexion en considérant les profils composés de points comme des fonctions concaves.

Dans la première approche, pour trouver les extrémités locales, on crée une fonction, soit par interpolation, soit par une fonction de Fourier, soit par la méthode des ondelettes. On recherche ensuite les extrémités qui, dans ce cas, sont des maxima locaux. Pour mon implémentation, j'ai utilisé la fonction Python "*find_peaks_cwt*" de la bibliothèque SciPy. Cette fonction utilise le principe de la transformation en ondelettes continue CWT. À la différence de la transformée de Fourier qui utilise des sinus et des cosinus, la CWT utilise des ondelettes qui peuvent être ajustées pour avoir différentes largeurs ou échelles. Cela rend la CWT particulièrement adaptée à l'analyse de signaux non stationnaires, c'est-à-dire des signaux dont les propriétés statistiques varient avec le temps, ou des points discrets comme des points de profondeur dans notre cas.

Dans ce contexte, nous travaillons sur un plan 2D (x, z) pour simplifier le traitement. Les pics dans le résultat de la CWT correspondent aux maximas locaux dans les données d'origine. Cela nous permet de détecter facilement et précisément les maximas, sans perte de données. Une méthode classique mais pratique pour détecter les points d'intérêt dans un profil consiste à rechercher

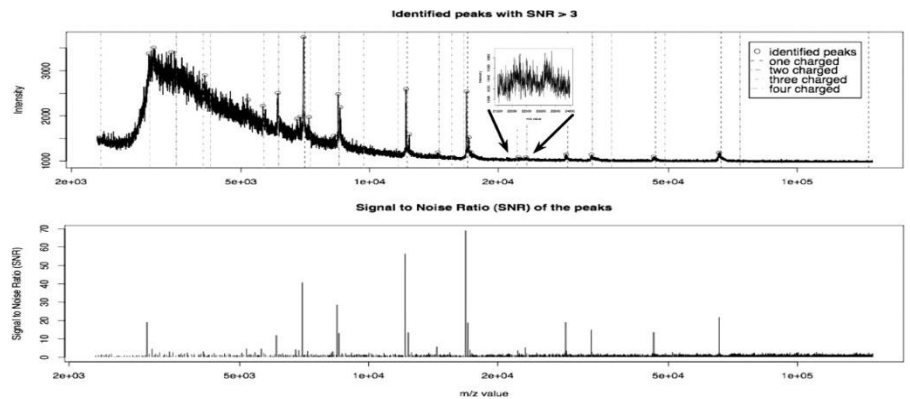


Figure 332 : Pour la première figure Spectre brut avec des pics identifiés par un algorithme basé sur CWT, et la deuxième SNR des pics calculés dans un algorithme basé sur CWT avec des pics identifiés, cela explique le processus de détections des maximas locaux avec la CWT. Source : [Du et al. (2006)]

les points où la profondeur 'z' est maximale par rapport aux autres points du profil. Techniquement, cela se fait en calculant la dérivée de la fonction représentant le profil, qui pour nous est $f(x) = z$. Nous recherchons ensuite les points où la dérivée s'annule, ce qui indique un maximum ou un minimum local. Pour déterminer lequel, nous pouvons soit examiner le changement de signe de la dérivée, soit comparer la valeur à celles des points voisins. La deuxième approche est semblable à la méthode classique décrite auparavant, mais elle se concentre sur la détection des points d'inflexion. Pour ce faire, nous devons calculer la dérivée seconde de la fonction $f(x) = z$. Nous recherchons ensuite les points où cette dérivée seconde s'annule, ce qui indique un point d'inflexion. En termes de code Python, cela peut se traduire par l'utilisation de la fonction gradient de la bibliothèque numpy. Cependant, il faut noter que la fonction gradient ne calcule que la première dérivée. Pour obtenir la dérivée seconde, nous devons donc calculer le gradient du gradient. Après avoir identifié les points d'intérêt dans nos profils, le défi est de trouver un moyen logique de faire correspondre ces points entre deux profils consécutifs.

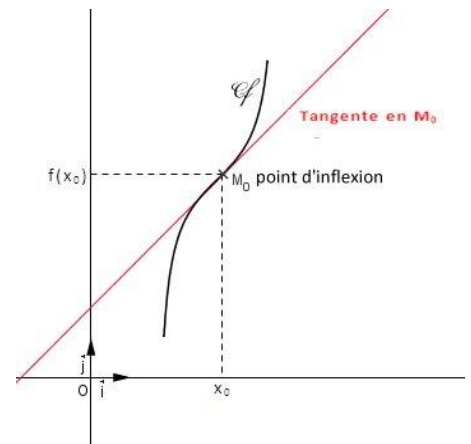


Figure 32 : M_0 est un point d'inflexion de coordonnées $(x_0, f(x_0))$. Source : [Mathématiques pour le français langue étrangère 5]

L'objectif final est de parcourir l'ensemble du relevé et de déterminer les points d'intérêt globaux. Pour cela, j'ai suivi une approche similaire à celle de l'algorithme SIFT, utilisée en photogrammétrie pour la détection des points de ressemblance entre deux images. Cette approche vise à identifier les points candidats qui sont susceptibles d'avoir une correspondance dans le profil suivant et qui présentent un fort degré de similarité. La fonction que j'ai mise en œuvre pour cela s'appelle "*find_matching_candidates_euclidean_distance*". Elle commence

par importer les coordonnées (x, z) des maxima locaux des deux profils consécutifs. Ensuite, elle normalise ces points en les centrant autour de zéro et en s'assurant que les données sont à la même échelle dans toutes les dimensions. Cette étape est cruciale lorsqu'on utilise des techniques sensibles à l'échelle des données, comme la distance euclidienne. La fonction applique ensuite une pondération à la composante z des points normalisés. Cette étape permet de donner plus d'importance à la dimension z lors du calcul des distances. Elle calcule ensuite la matrice des distances euclidiennes entre chaque paire de points dans les deux ensembles de données. Enfin, elle identifie les paires de points dont la distance est inférieure à un seuil prédéfini. Ces paires sont considérées comme des "candidats correspondants", c'est-à-dire des points qui sont susceptibles d'être des correspondances entre les deux profils.

Le reste du travail c'est de relever les points qui effectue la meilleure correspondance qui partagent les mêmes caractéristiques entre les deux profils, c'est pour cela j'ai implémenté une autre fonction 'find_best_match' qui permet de trouver la meilleure correspondance entre deux ensembles de points.

Le code s'appuie sur le concept de corrélation croisée pour identifier les sections qui se ressemblent entre deux profils distincts. Il est essentiel de comprendre qu'il y a deux types de corrélations : la corrélation croisée et l'autocorrélation. La corrélation croisée évalue la similarité entre deux séries de données distinctes. Plus précisément, elle calcule à quel point les deux séries de données sont similaires. Cependant, l'autocorrélation mesure la similarité d'une série de données avec elle-même à divers déplacements temporels.

Dans notre cas, nous choisissons d'utiliser la corrélation croisée car nous traitons deux ensembles de données distincts en termes de morphologie et de géométrie. Cette méthode est largement utilisée en traitement d'images et en photogrammétrie pour détecter les zones de similarité. Cette corrélation est souvent appelée corrélation de Pearson (exprimée en annexes). La fonction 'find_best_match' opère en parcourant chaque point d'intérêt du premier profil, représenté par extrema1, et en recherchant des correspondances potentielles dans le second profil, symbolisé par extrema2. Ces extrema sont les points de maximum locaux dans les deux profils

```
Matching candidates:
Point 1: 0 -> Candidates: 0
Point 1: 1 -> Candidates: 0
Point 1: 3 -> Candidates: 1
Point 1: 3 -> Candidates: 2
Point 1: 3 -> Candidates: 3
Point 1: 4 -> Candidates: 1
Point 1: 4 -> Candidates: 2
Point 1: 4 -> Candidates: 3
Point 1: 5 -> Candidates: 2
Point 1: 5 -> Candidates: 3
Point 1: 5 -> Candidates: 4
Point 1: 6 -> Candidates: 2
Point 1: 6 -> Candidates: 3
Point 1: 6 -> Candidates: 4
Point 1: 6 -> Candidates: 5
Point 1: 7 -> Candidates: 2
Point 1: 7 -> Candidates: 3
Point 1: 7 -> Candidates: 4
Point 1: 7 -> Candidates: 5
Point 1: 8 -> Candidates: 3
Point 1: 8 -> Candidates: 4
Point 1: 8 -> Candidates: 5
Point 1: 8 -> Candidates: 6
Point 1: 9 -> Candidates: 5
Point 1: 9 -> Candidates: 6
Point 1: 9 -> Candidates: 7
Point 1: 10 -> Candidates: 8
Best matches:
Point 1: 0 -> Best match: 0
Point 1: 3 -> Best match: 1
Point 1: 5 -> Best match: 2
Point 1: 8 -> Best match: 3
```

Figure 34 : Extrait de résultat de l'exécution du code implémenté pour la recherche des candidats entre les deux profils et les trier pour laisser que les points qui établissent la meilleure correspondance

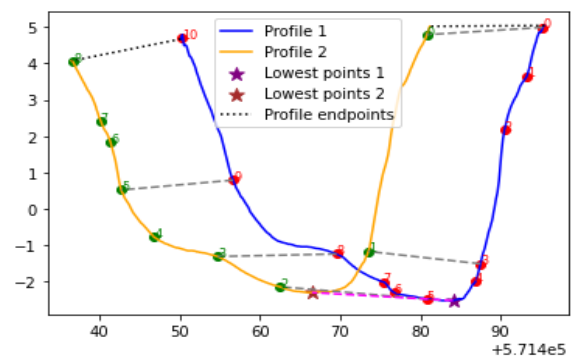


Figure 35 : Exemple d'une mise en correspondance entre deux profils identiques issus d'un levé monofaisceau, les étoiles correspondent aux points les plus bas des deux profils (seuil de corrélation = 0.1 ; pas = 1)

respectifs. Les points d'intérêt considérés comme "candidats" pour chaque point d'intérêt du premier profil correspondent aux points d'intérêt du second profil se trouvant dans une certaine "fenêtre" autour du point d'intérêt initial. Chaque point d'intérêt du premier profil est alors comparé aux points d'intérêt candidats du second profil grâce à la méthode de la corrélation croisée. Cette dernière mesure la similitude entre deux séries de données. Pour chaque point d'intérêt, une corrélation croisée est calculée pour une "fenêtre" de points entourant ce point d'intérêt et chaque point d'intérêt candidat. Le candidat présentant la corrélation croisée la plus élevée, qui doit par ailleurs être supérieure à un certain seuil, est retenu comme étant la meilleure correspondance pour le point d'intérêt. Une fois qu'une correspondance est identifiée pour un point d'intérêt du second profil, son indice est ajouté à un ensemble de points d'intérêt déjà associés. Cette étape assure que chaque point d'intérêt du second profil n'est utilisé qu'une seule fois. Il est important de noter que l'approche que nous utilisons pour déterminer les points correspondants entre deux profils de rivière fonctionne de manière optimale lorsque ces profils sont relativement uniformes. C'est-à-dire que si les deux profils se ressemblent en grande partie et ne subissent pas de modifications drastiques. J'ai revu notre approche actuelle d'identification des points d'intérêt car je n'étais pas entièrement satisfait de leur placement. Certains points identifiés ne semblent pas correspondre à de véritables extrema locaux sur mes profils.

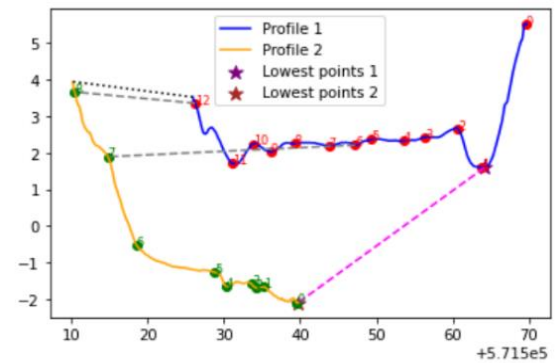


Figure 36 : Exemple d'une mise en correspondance entre deux profils différents (seuil de corrélation = 0.1 ; pas = 1)

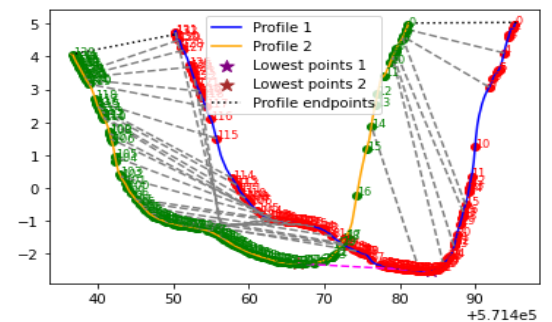


Figure 37 : Exemple d'une mise en correspondance entre deux profils différents avec la méthode des points d'inflexion pour la détection des points d'intérêt

Par exemple, si on remarque la figure on voit qu'il existe quelques points qui ne sont pas véritablement des extremums tandis que la figure met en évidence des bons extremums car ils sont apparents contrairement à la figure précédente. Par conséquent, j'ai envisagé d'adopter l'approche de détection des points d'inflexion pour

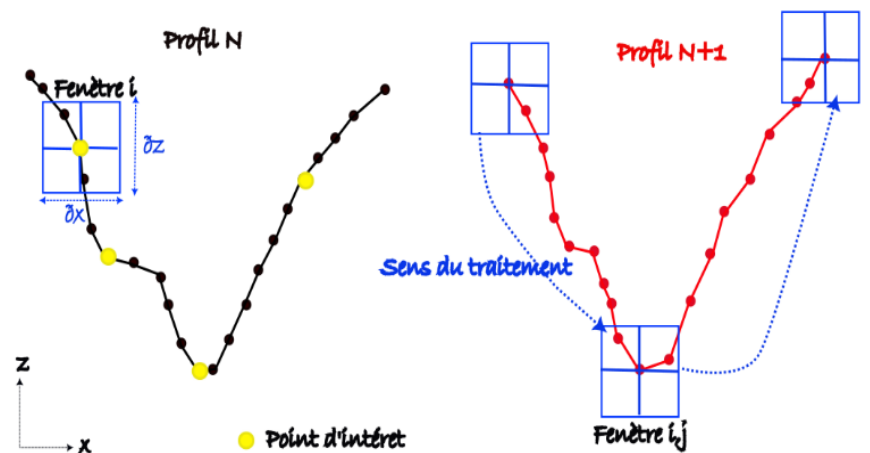


Figure 38 : Schéma explicatif du processus de recherche des points de correspondance entre deux profils d'ordre respectivement N, N+1

identifier les points d'intérêt. Cependant, j'ai rencontré un problème lié à la nature discrète de nos données. Pour déterminer les points d'inflexion, j'ai dû lisser ou interpoler les données pour obtenir une fonction continue. On observe un grand nombre de points d'intérêt dans la figure.

Bien que cela puisse être bénéfique lors de la comparaison de deux profils similaires (comme illustré par les portions gauches des profils dans certaines la figure), cela peut également être un inconvénient lors de la comparaison de deux profils différents. En effet, notre code actuel ne parvient pas toujours à établir de bonnes correspondances entre deux profils distincts, comme en témoignent les portions droites de certains profils où les résultats ne sont pas cohérents, car ces portions ne sont pas similaires.

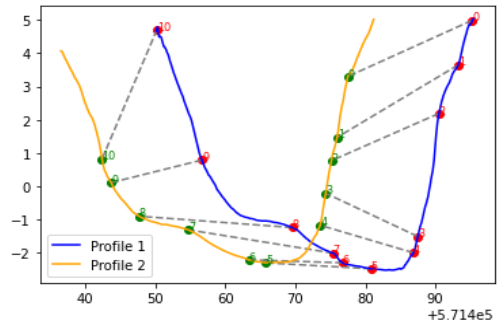


Figure 39 : Exemple d'une mise en correspondance par l'approche de corrélation (basique) entre deux profils différents (seuil de corrélation = 0.1 ; pas = 1)

En conclusion, notre méthode actuelle, '*find_best_match*', fonctionne bien lorsqu'on compare des profils simples ou similaires sans variations drastiques de la morphologie. Cependant, si nous nous trouvons dans une situation où les profils varient considérablement, comme c'est le cas dans un estuaire où les profils peuvent s'élargir au milieu, cette approche peut ne pas produire des résultats précis. Les lignes de contrainte générées peuvent être imprécises dans ces cas. C'est pourquoi j'ai mis en place un code qui s'appuie sur une approche différente, qui ne dépend pas uniquement de la géométrie des profils. Le code utilise une méthode basée sur la corrélation : pour chaque point extrême (ou point d'intérêt) dans le premier profil, le code construit une fenêtre autour de ce point et récupère les points voisins. Nous considérons ce point extrême comme l'origine d'un repère. Le code utilise ensuite cette fenêtre, qui a le point d'intérêt pour origine, pour parcourir le deuxième profil. Pour chaque point dans le deuxième profil, il construit une fenêtre similaire et calcule la corrélation entre les deux ensembles de points. Après avoir traversé tout le deuxième profil, le code enregistre le point qui a la corrélation la plus élevée avec le point d'intérêt du premier profil. En répétant ce processus pour chaque point d'intérêt dans le premier profil, le code génère une liste de points correspondants dans le deuxième profil. Cette approche peut être plus robuste face à des variations importantes entre les deux profils.

La figure ci-dessus illustre l'opération de l'algorithme, qui débute par la recherche des points extrêmes du profil N. L'établissement d'une fenêtre de dimension ajustable permet de moduler la quantité de points contenus dans celle-ci. L'étape suivante consiste à extraire ce segment du premier profil et à le faire parcourir dans le deuxième profil, calculant ainsi les coefficients de corrélation.

Il est important de noter que la première fenêtre est centrée sur le point d'intérêt, tandis que la fenêtre glissante du profil N+1 se centre sur chaque point et prend en compte la quantité de ces points pour finalement calculer le coefficient de corrélation.

Un autre défi peut se présenter lors de la définition d'un seuil de corrélation. Il est possible de se retrouver dans une situation où plusieurs pics dépassent ce seuil. L'algorithme peut alors attribuer plusieurs points du second profil, qu'il considère correspondants au point d'intérêt du premier profil. Cela peut engendrer un problème de redondance des lignes de contrainte qui se superposent lors sa

création. La solution à ce problème a été de supprimer manuellement les lignes redondantes.

Un autre problème peut s'ajouter c'est l'apparition des croisements entre les profils ce qui génère des correspondances qui n'ont pas de sens même en jouant sur la valeur de la corrélation ou sur la taille de la fenêtre de sélection c'est pour cela il faut réfléchir à une nouvelle fenêtre d'ouverture pour une méthode optimale pour la détection des points homologues entre les profils dans les deux cas quand identiques ou différents.

2.2.1.2. Création des lignes de contrainte

Une fois les correspondances définies, la prochaine étape consiste à créer des lignes de contrainte, car nous utiliserons l'outil Tatoonine Mesher pour l'interpolation, en tenant compte de ces lignes contraintes. Cette démarche nous aidera à évaluer et expérimenter si cette approche peut effectivement améliorer l'interpolation. Il est nécessaire de faire correspondre le format de nos données aux formats reconnus par l'outil, comme précédemment mentionné. Ainsi, les profils et l'axe hydraulique sont convertis au format shp, ce qui signifie que les lignes de contrainte doivent également être dans ce format. Nous devons d'abord créer des lignes reliant les correspondances entre un profil et un autre de manière consécutive. Pour ce faire, j'ai mis en œuvre un script qui stocke d'abord les points de correspondance dans des fichiers csv. Par exemple, un csv peut contenir 6 colonnes (x1, y1, z1) représentant les points extrêmes du premier profil et (x2, y2, z2) représentant les points correspondant à chaque point extrême du premier profil. Chaque fichier CSV généré et indexé correspond à la correspondance entre deux profils consécutifs, nous permettant ainsi de construire des lignes de contraintes entre ces profils successifs. En utilisant la bibliothèque "geometry. shapely", nous pouvons créer des lignes au format PolylineZ et les stocker pour les utiliser avec Tatoonine Mesher.

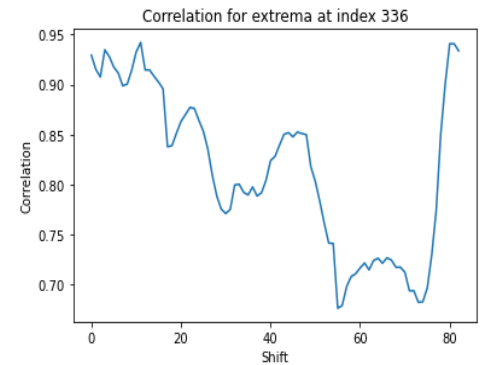


Figure 40 : Exemple du résultat de la corrélation entre un extremum local d'indice 336 dans la liste des données et les points du deuxième profil

Une étape clé de ce processus consiste à vérifier que ces lignes de contraintes sont cohérentes avec la géométrie naturelle de la rivière et ne provoquent pas d'anomalies. Cela assure l'intégrité des données sur lesquelles nous travaillons ceci peut être fait grâce aux images des satellites ou des orthophotos pour pouvoir relever les imprécisions et déduire l'homogénéité des résultats. Afin de faciliter la manipulation et la visualisation de ces données, j'ai implémenté un code qui navigue à travers un dossier contenant les profils décomposés. En utilisant la bibliothèque "os", le code est capable de lire les fichiers csv dans un dossier pour après générer un autre fichier csv contenant tous les points d'intérêt, ce qui facilite grandement l'affichage des résultats. Cela permet de suivre les lignes de contraintes à travers leurs extrémités et de vérifier qu'il n'y a pas de superposition de lignes. Cela m'a été particulièrement utile pour comparer les lignes de contraintes obtenues à partir des deux méthodes de recherche et de mise en correspondance que j'ai précédemment décrites. La première méthode s'appuie sur une approche géométrique pour

l'identification des points d'intérêt, tandis que la seconde s'appuie sur une approche plus directe et basique pour la détection de ces points. La figure suivante illustre clairement la différence entre les deux méthodes après la construction des lignes de contraintes. Il est important de noter que nous pouvons ajuster la quantité et la précision des points d'intérêt en modifiant les dimensions de la fenêtre réglable et le seuil de corrélation. La modification de ce seuil entraîne des changements

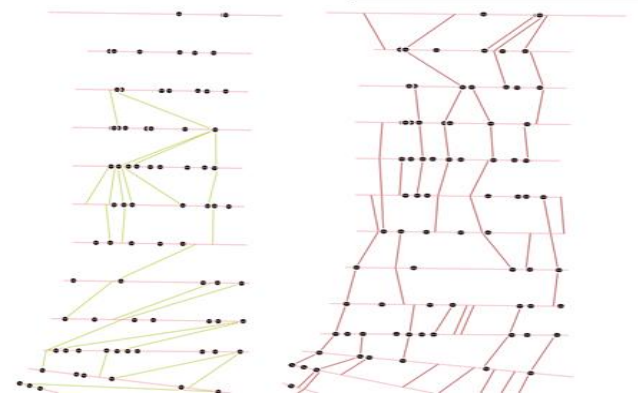


Figure 41 : [en vert] les lignes de contraintes générées à partir des points d'intérêt détectés avec l'approche basique, [en rouge] les lignes de contraintes générées à partir des points d'intérêt détectés avec l'approche géométrique différents (seuil de corrélation =0.9 ; pas =1)

significatifs dans les résultats. Un seuil très élevé génère un résultat moins dense qui est plus facile à interpréter, tandis qu'un seuil plus faible donne un résultat très dense et donc plus complexe à analyser. Bien que les codes ne soient pas parfaits, ils fournissent des résultats significatifs qui nécessitent obligatoirement la vérification et le nettoyage des erreurs et des imprécisions. La prochaine étape consiste à importer les données nécessaires pour démarrer l'outil Tatoonine Mesher. Cet outil effectue des interpolations entre les lignes de contraintes, mais cet outil peut parfois échouer, surtout lorsqu'il y a des discontinuités dans les lignes de contraintes. Cela peut limiter la capacité de Tatoonine Mesher à effectuer l'interpolation. C'est pourquoi je recommande de ne pas se concentrer sur les lignes de contraintes générées par les codes mais il faut rajouter deux lignes de contraintes qui seront continues et les fusionner avec la couche des lignes qu'on a générés avec les codes, en l'occurrence les berges gauches et droites. Il peut être nécessaire d'intervenir manuellement pour supprimer ou ajouter des lignes

de contraintes par l'option modifier une couche sur QGIS, si l'outil ne fonctionne pas pour un cas particulier. Cela rend l'opération semi-automatique, mais permet une plus grande flexibilité et précision dans le traitement des données.

Partie 3 : Résultats et discussions

Cette partie est dédiée à l'évaluation des méthodes proposées précédemment pour la recherche des points homologues et la création des lignes de contrainte. En d'autres termes, nous allons comparer deux ensembles de données : des données monofaisceau interpolées à l'aide de méthodes traditionnelles, et des données où nous avons mis en œuvre des lignes de contrainte. Pour effectuer cette évaluation, nous utiliserons comme référence le levé multifaisceaux effectué à une date proche du levé monofaisceau. Cela nous permettra d'analyser l'efficacité de l'approche des lignes de contrainte générées en fonction des différentes méthodes utilisées pour les générer.

3.1. Présentation des relevés disponibles

EDF possède une large quantité de relevés bathymétriques effectués par des sous-traitants tels que GEOxyz et INGEO qui effectuent des levés mono ou multi faisceau selon la demande et le besoin de DTG (équipe qui s'occupe du traitement des données bathymétriques d'EDF), ce qui nous offre un ensemble de données substantiel pour expérimenter et évaluer différentes méthodes d'interpolation, ainsi que pour identifier leurs forces et faiblesses respectives. Cependant, étant donné que nous sommes contraints par un nombre limité de pages pour ce travail, il est nécessaire de se concentrer uniquement sur les données les plus pertinentes.

C'est pourquoi, après avoir obtenu l'autorisation de mon encadrant, j'ai choisi de me concentrer sur des relevés spécifiques qui sont caractéristiques et diversifiés, chacun présentant des caractéristiques distinctes. Cette sélection de données nous permet d'éprouver les nouvelles approches d'interpolation sur une variété d'ensembles de données, ce qui, à son tour, offre l'opportunité d'identifier et d'analyser leurs éventuelles lacunes et imperfections. En se concentrant sur ces relevés caractéristiques, nous pouvons non seulement gagner en efficacité en travaillant avec des données significatives, mais aussi assurer une évaluation plus robuste et complète des différentes méthodes d'interpolation, ce qui nous rapproche de notre objectif d'améliorer ces méthodes.

3.1.1. Canal de Penly

Les levés bathymétriques, effectués annuellement sur la plage et le chenal de la centrale de Penly, ont pour objectif principal d'étudier les variations et les mouvements de sédiments autour du complexe nucléaire de production d'électricité (CNPE). Ces études permettent de suivre l'impact des travaux effectués dans le chenal et de surveiller l'état de ce dernier au niveau des stations de pompage, pour réaliser ces levés dans le chenal, la société INGEO est



Figure 43 : Photo prise par un drone aérien de la centrale et chenal de Penly (extrait d'un rapport de fin d'intervention dans le chenal de Penly effectué par INGEO effectué le 15/05/2021)

souvent sollicitée pour effectuer les levés monofaisceau, tandis que les levés multifaisceaux sont généralement réalisés par la société GEOxyz. Ces deux types de levés, bien que différents dans leur mise en œuvre, sont essentiels pour fournir une image complète de l'état et de l'évolution du chenal et de ses environs. Il est important de noter que la centrale nucléaire de Penly est située dans la commune de Petit-Caux, sur la côte de la Manche, entre Le Tréport et à 70 kilomètres de Rouen, en Seine-Maritime. La construction de cette centrale a commencé en 1982 et 1984 pour les tranches 1 et 2 respectivement. EDF, qui a mené la construction, a été autorisée à exploiter la centrale à partir de 1990 et 1992. Cette centrale joue un rôle crucial dans la production d'électricité en France, ce qui souligne l'importance de surveiller attentivement son environnement marin immédiat.

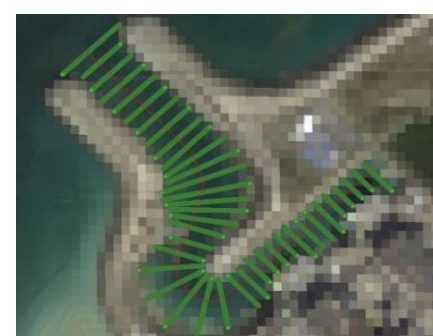


Figure 42 : Semis de points du levé mono du chenal Penly importé sur QGIS, formant des profils avec la présence d'un axe hydraulique

3.1.2. Bassin de St-Aignan

Le choix de ce levé repose sur la question : est-ce que l'application des nouvelles approches d'interpolation peut s'avérer efficace, même face à des défis tels que le croisement des profils et l'irrégularité de leur distribution tout au long du bassin de Saint-Aignan ? Ce bassin est situé à proximité du barrage de Guerlédan, près de la ville de Guerlédan, dans la région de Bretagne. Le levé de ce bassin semble avoir rencontré certaines difficultés, ce qui a conduit à l'apparition de profils non réguliers. Il est clair que ces croisements de profils rendent difficile la réalisation d'une interpolation, que ce soit par une méthode linéaire ou par la méthode de splines cubique d'Hermite. Le défi dans ce cas réside principalement dans le découpage des profils, car lors de



Figure 44 : Semis des points du levé de St-Aignan importé sur QGIS, formant des profils avec la présence d'un axe hydraulique

l'exécution des programmes d'interpolation, il est nécessaire d'identifier chaque profil du relevé pour pouvoir procéder à l'interpolation. Une des stratégies envisageables pour éliminer ces croisements, qui nuisent à la qualité et à l'esthétique de notre relevé, consiste à supprimer les profils qui se croisent. Cependant, cette approche comporte le risque de perte de données, ce qui peut affecter la précision de l'interpolation et augmenter la distance entre certains profils. Il est important de noter que plus la distance entre deux profils est grande, plus la précision de l'interpolation diminue, ce qui peut compromettre la qualité du résultat final.

3.2. Interpolation sans lignes de contrainte

Après avoir segmenté les relevés au format xyz en profils pour réaliser l'interpolation, qu'elle soit linéaire ou à l'aide des splines cubiques d'Hermite, nous avons employé l'outil Tatoonine Mesher, déjà introduit dans les sections précédentes. Cet outil simplifie considérablement l'interpolation sans nécessiter une manipulation intensive de données. La gestion de ce fichier n'est pas trop complexe et requiert l'importation de données pertinentes telles que les profils au format shp polylineZ, une exigence de l'outil. Un axe hydraulique est également nécessaire pour guider l'interpolateur ; dans ce cas, j'ai utilisé le thalweg comme mon axe hydraulique. Ensuite, il est nécessaire de spécifier l'emplacement de sortie des données interpolées qui se présenteront sous deux formes : un fichier de nœuds au format shp ou xyz, et une grille contenant les informations d'interpolation qui sera visualisée à l'aide de Bluekenue, car QGIS ne peut pas afficher les données aux formats slf et t3s. L'observation des données interpolées permet non seulement d'identifier les différentes failles et limites de chaque méthode, mais aussi de comprendre les contraintes qui empêchent chaque méthode de produire un modèle précis. Avant de l'exécution de l'outil, nous devons spécifier les emplacements de nos données et les emplacements de sortie des résultats. J'ai réalisé une interpolation linéaire sur le relevé monofaisceau effectué le 22 juin 2020. Par défaut, Tatoonine Mesher exécute une interpolation linéaire, si elle n'est pas spécifiée avec la commande "--interp_values", que ce soit dans le sens longitudinal ou transversal. De plus, l'outil offre la possibilité de choisir l'espacement et le nombre de nœuds latéralement, et uniquement l'espacement pour le sens longitudinal, avec respectivement les commandes --lat_step, --nb_pts_lat et --long_step. Dans le cadre de mes traitements et afin d'obtenir un résultat dense et cohérent pour en déduire des conclusions, j'ai utilisé un espacement de 0,5 m entre les nœuds dans les deux directions. Le résultat produit par Tatoonine Mesher et visualisé par Bluekenue apparaît dans la figure 44.

D'un autre côté, si l'on souhaite appliquer une interpolation par les splines cubiques d'Hermite, il suffit d'utiliser la commande `--interp_values CUBICSPLINE`. Bien que cela soit une méthode générale d'interpolation par splines, elle produit des résultats satisfaisants. Dans leur article explicatif sur l'outil Tatoonine Mesher, L. Duron et K. Saad recommandent d'utiliser les splines d'Akima. Cette méthode d'interpolation par splines, introduite par Hiroshi Akima, utilise des polynômes cubiques, similaires aux splines cubiques d'Hermite.

Cependant, elle intègre des informations sur les points situés à proximité de l'intervalle interpolé pour définir les coefficients du polynôme cubique. J'ai testé les deux méthodes, Akima et spline cubique, tout en spécifiant également une interpolation cubique dans le sens longitudinal avec la commande `--interp_constraint_lines CARDINAL`, qui est également une sorte de spline cubique. Le résultat peut être vu dans la figure 45, j'ai affiché uniquement la figure de l'interpolation par les splines cubiques d'Hermite, car les deux rendus sont identiques, et ont le même aspect visuel.

On peut clairement remarquer une grande différence entre les deux résultats, surtout au niveau visuel. La première interpolation linéaire présente un effet géométrique notamment au niveau des rives avec un effet droit, comme s'ils étaient tracés à la règle. Pour la seconde interpolation, on obtient un rendu très lisse qui est qualitativement plus proche de la réalité. Quant aux détails, les deux interpolations mettent en avant les mêmes spécificités et détails du terrain.

Pour évaluer l'efficacité et la robustesse de nos deux méthodes, il est essentiel de les soumettre à des tests dans des conditions extrêmes. Par exemple, à Penly, nous avons eu des profils bien définis et réguliers, sans erreurs dans le relevé, tels que des croisements. C'est pourquoi j'ai décidé de tester ces deux méthodes sur un relevé de St-Aignan. Cependant, j'ai rencontré une première difficulté : ce relevé contient de nombreux profils qui se croisent et intersectent avec les profils voisins. J'ai donc dû découper les profils à l'aide de la méthode du plus proche voisin que j'ai précédemment décrite, ce qui m'a permis d'éliminer les profils qui se croisent. Pour l'interpolation, j'ai utilisé Tatoonine Mesher, mais malheureusement, l'outil n'a pas fonctionné correctement et m'a renvoyé un

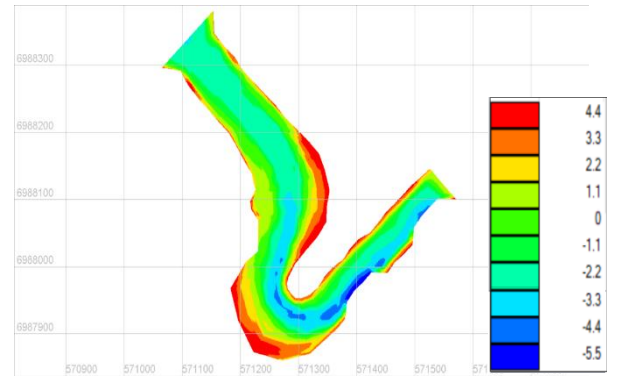


Figure 45 : Maillage interpolé linéairement du chenal de Penly avec l'outil Tatoonine Mesher et visualisé par le logiciel BlueKenue

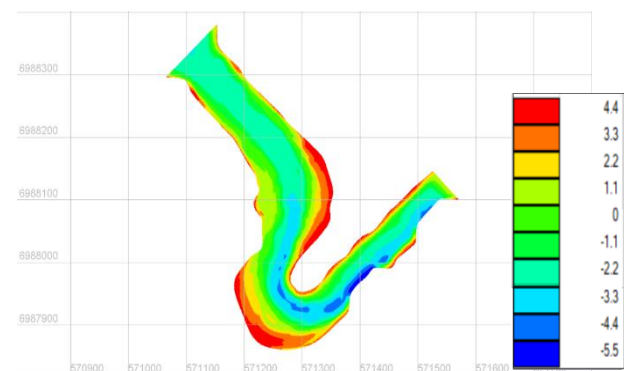


Figure 46 : Maillage interpolé par cubique spline d'Hermite du chenal de Penly avec l'outil Tatoonine Mesher et visualisé par le logiciel BlueKenue

message d'erreur indiquant que le maillage était corrompu. L'erreur semble être due à une incohérence entre le nombre de points fournis et les sommets des triangles générant le maillage, rendant ainsi le modèle non fidèle. La solution à ce problème a été de modifier l'espacement des points, soit uniquement dans une direction, soit dans les deux. Bien qu'il en résulte une perte de densité du modèle, le pas minimal nécessaire pour que Tatoonie fonctionne correctement était de 13,5 m, ce qui est relativement grand.

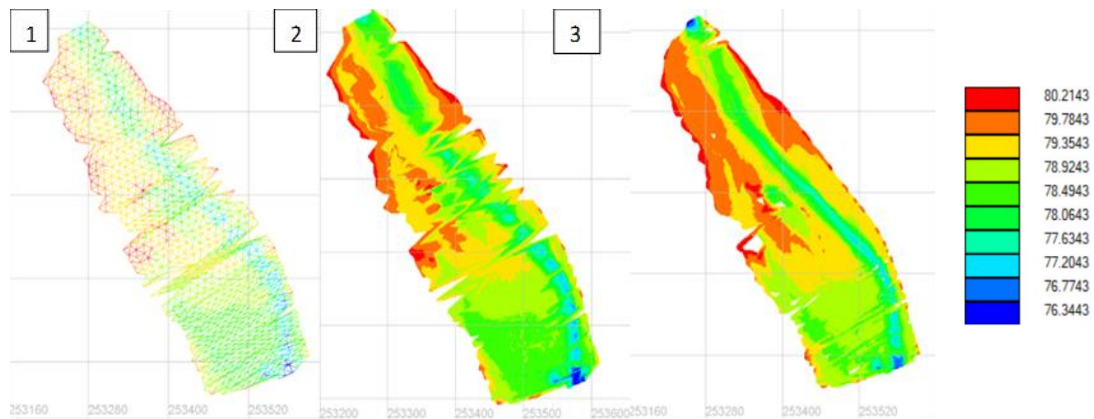


Figure 47 : [1] maillage interpolé linéairement de pas 13.5 m de la zone levée de St-Aignan, [2] nœuds obtenus par Tatoonie Mesher des profils découpés par plus proche voisin (interpolé linéairement), [3] nœuds obtenus par une implémentation SCILAB réalisé par l'équipe bathymétrie d'EDF des profils découpés selon l'approche géométrique (interpolé CHS).

En augmentant le pas, nous pouvons récupérer le maillage (ou MNT) au format SLF. Cependant, nous pouvons aussi réduire le pas à 0.5m pour obtenir un fichier XYZ contenant les coordonnées des nœuds nécessaires à la constitution d'un maillage. L'interpolation réalisée par Tatoonie Mesher est linéaire. Malheureusement, je n'ai pas réussi à effectuer une interpolation avec CHS car Tatoonie Mesher continue de signaler la même erreur, à savoir que le maillage est corrompu. De ce fait, j'ai dû faire appel à un code mis en place par l'équipe bathymétrie d'EDF. Ce code réalise une interpolation CHS et génère un maillage interpolé, ce qui nous permet de distinguer les différences entre ces deux types d'interpolation.

On peut bien remarquer qu'un maillage de 13.5m ne donne pas suffisamment de détails pour nous permettre de tirer des conclusions précises sur la morphologie et les caractéristiques spécifiques du lieu étudié, ce qui limite son utilité. Cela est également évident lors de l'examen des nœuds obtenus à l'aide de Tatoonie Mesher. Nous observons des lacunes dans la répartition des nœuds dans la zone soulevée, ce qui peut être attribué à un manque d'information et à la présence de formes irrégulières, comme les zigzags apparents dans la partie verte au centre de la zone. Ces anomalies peuvent être le résultat de la méthode de découpage utilisée, en ce qui concerne les nœuds obtenus par interpolation CHS et découpés selon l'approche géométrique, le résultat est toujours imparfait en raison des lacunes, bien que les formes soient plus

régulières. Cela souligne l'importance de la phase de découpage des profils dans le processus de traitement. Cependant, au-delà de cette phase, la phase d'acquisition est également cruciale pour minimiser la présence de formes irrégulières dans les relevés, qui peuvent entraver l'obtention de résultats parfaits. Il est donc essentiel de prêter une attention particulière à ces deux phases pour améliorer la qualité des résultats obtenus, dans la suite de notre étude, nous n'envisagerons pas le cas de St-Aignan en utilisant des lignes de contrainte, car la qualité du relevé est médiocre. Il serait donc inutile de tenter de l'améliorer.

3.3. Interpolation avec des lignes de contrainte

Après avoir identifié les points d'intérêt sur chaque profil dans un relevé monofaisceau, nous avons établi des correspondances entre ces points grâce à une approche géométrique. Cette méthode semble donner des résultats satisfaisants, non seulement pour des profils identiques, mais également lorsqu'il y a une différence significative dans les formes des profils. D'autre part, l'approche basée sur la corrélation des portions de profils ne semble pas être aussi efficace. Elle fonctionne plutôt bien pour les profils identiques, mais rencontre des difficultés lorsqu'elle est confrontée à des profils différents.

Une étape cruciale de ce processus consiste à tenter une interpolation en utilisant les méthodes d'interpolation déjà explorées et couramment utilisées par l'équipe bathymétrie d'EDF. L'objectif est de déterminer la méthode qui produit les meilleurs résultats en prenant en compte les lignes de contrainte, ces résultats sont ensuite comparés aux résultats précédents pour déterminer si l'introduction des lignes de contrainte a pu améliorer la précision des données interpolées, les rapprochant ainsi des données multifaisceaux (prétendu données « pseudo-vraies » dans ce sujet). Pour nous, ces données « pseudo-vraies » proviendraient d'un maillage ou de profils d'un relevé multifaisceaux.

J'ai commencé d'abord par l'application des lignes de contrainte sur le chenal de Penly avec l'outil de Tutooine Meshier qui permet d'imposer ces lignes de contrainte lors l'interpolation par les deux méthodes linéaires et CHS, j'ai testé d'abord la première approche géométrique (qui consiste à se baser sur la géométrie des profils pour construire des lignes de contrainte), il est nécessaire d'utiliser la commande "--interp_constraint_lines" avec l'emplacement du fichier de préférence au format shp. Malheureusement, l'outil ne parvient pas à effectuer un lissage en utilisant l'interpolation CHS, que j'ai essayé à plusieurs reprises, la raison derrière ce problème est que l'outil n'est pas capable de transformer les lignes de contraintes en des splines car elles sont de base de format POLYLINEZ. Cependant, cela ne devrait pas affecter la précision des données car L. Duron et al. estiment que l'interpolation linéaire, qui est utilisée dans notre cas,

est suffisante et produit des résultats satisfaisants par rapport aux autres types d'interpolation. Bien sûr, sur le plan visuel, nous n'obtenons pas un produit lisse et fluide, mais cela est suffisant pour conclure sur l'utilité des lignes de contrainte pour améliorer l'interpolation des données monofaisceau.

Visuellement, les différences entre le maillage sans lignes de contrainte et avec les lignes de contrainte sont les suivantes : dans ce dernier cas, les zones bleues se sont étendues et sont devenues discontinues sur la partie haute du canal, tandis que les zones rouges le long des rives se sont rétrécies par rapport au

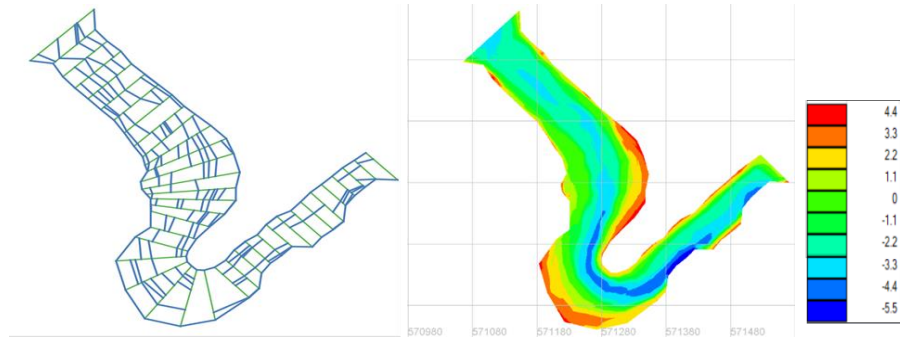


Figure 48 : [à gauche] lignes de contraintes réparties de façon discrètes au long des profils, [à droite] maillage interpolé linéairement en tenant compte des lignes de contrainte (approche géométrique)

maillage premier, ce qui montre que les lignes de contrainte peuvent entraîner une modification sur la géométrie du terrain, cela ne permet de conclure qui est le plus proche visuellement à la réalité c'est pour cela on doit faire appel au relevé multifaisceaux de la zone pour pouvoir conclure lequel est plus réel.

En analysant la visualisation du relevé multifaisceaux, on peut conclure que le maillage réalisé en prenant en compte les lignes de contrainte ressemble davantage à la réalité au niveau des rives et du fond par rapport au relevé interpolé sans lignes de contrainte. J'ai effectué des essais avec la deuxième méthode basée sur la corrélation pour déterminer laquelle donne des résultats plus précis et se rapproche le plus de la réalité. Cependant, cette

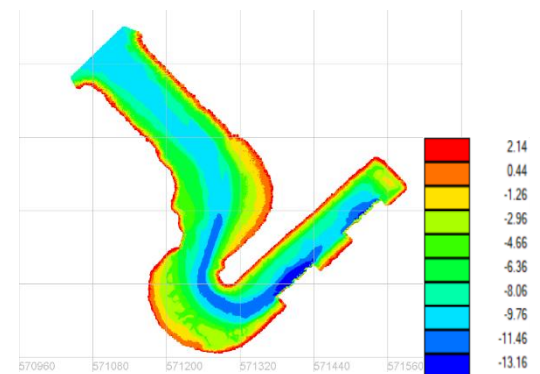


Figure 49 : levé multifaisceau du chenal de Penly réalisé le 06/2020, visualisé par BlueKenue

dernière ne semble pas produire de bons résultats en raison d'une taille de fenêtre inadaptée pour certains profils. En effet, le choix de la taille de fenêtre n'offre pas des résultats optimaux pour certains profils. Par conséquent, j'ai envisagé de modifier mon implémentation de manière à tester différentes tailles de fenêtres et à conserver celle qui offre la meilleure corrélation. Cette approche permet d'améliorer la qualité des correspondances en optimisant la taille de la fenêtre de corrélation pour chaque point d'intérêt. Cependant, cela augmente considérablement le temps d'exécution. Malgré cela, la méthode n'a pas généré des résultats satisfaisants. J'ai donc dû intervenir manuellement pour supprimer les profils mal adaptés ou mal positionnés, ce qui rend l'approche plus manuelle.

D'après la figure, on peut observer que le résultat ne semble pas proche de la réalité au niveau des détails, ce qui montre visuellement que la méthode basée sur la corrélation ne pourrait pas être une bonne approche pour améliorer l'interpolation par rapport à la méthode géométrique. Cependant, cela n'est pas suffisant pour tirer des conclusions définitives. En outre, cela ne permet pas de déterminer si les méthodes proposées améliorent l'interpolation. C'est pourquoi il est nécessaire de comparer ces résultats avec des données multifaisceaux dans le plan quantitatif et non seulement qualitatif et visuel. On ne va pas traiter le cas avec les points d'inflexions car il est équivalent à l'approche géométrique la seule différence c'est qu'on aura des lignes de contraintes plus densifiées.

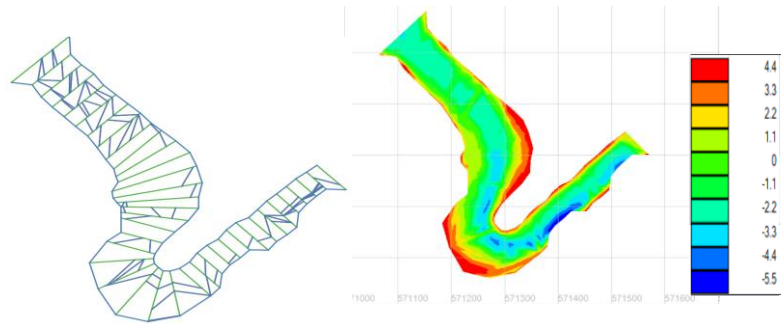


Figure 50 : [à gauche] lignes de contraintes réparties de façon discrètes au long des profils, [à droite] maillage interpolé linéairement en tenant compte des lignes de contrainte (approche à base de corrélation)

3.4. Comparaison et discussions

Cette comparaison nous aidera à déterminer quelle méthode offre des résultats les plus précis et fidèles à la réalité, en évaluant l'efficacité de chaque approche. Ainsi, l'analyse portera sur un relevé monofaisceau du canal de Penly étudié auparavant et traité avec des interpolations linéaires et CHS, avec et sans lignes de contraintes. Pour ce faire, j'ai comparé les données rééchantillonnées multifaisceaux, afin de les rendre compatibles avec le maillage interpolé. Les performances de ces différentes méthodes d'interpolation sont évaluées en calculant certaines statistiques clés (expliqués dans les annexes) :

- MSD (Mean Standard Deviation) ou bien l'Écart-type : que j'ai calculé grâce au logiciel Cloud Compare entre les données de la zone d'étude interpolées et le levé multifaisceaux ;
- RMSD (Root Mean Standard Deviation) ou bien la variance : exprimée dans l'annexe 3 ;
- Distance moyenne (Mean Distance) : la distance euclidienne moyenne entre le point le plus proche dans le nuage de référence (levé multifaisceaux) et le nuage comparé (levé interpolé) ;

Le tableau ci-dessous explicite le résultat de la comparaison entre les différentes méthodes proposées dans le cadre de l'amélioration de l'interpolation par des lignes de contrainte d'un

relevé monofaisceau (levé effectué le 15/06/2020 et le 18/06/2020) avec un relevé multifaisceaux (levé effectué en juin 2020) selon les critères statistiques ci-dessus :

| <i>Méthode utilisée pour interpoler entre des données monofaisceau</i> | MSD | RMSD | Mean Distance |
|---|-------|-------|---------------|
| Interpolation linéaire sans lignes de contrainte | 0.295 | 0.087 | 0.276 |
| Interpolation CHS sans lignes de contrainte | 0.289 | 0.083 | 0.257 |
| Interpolation linéaire avec lignes de contrainte (Approche géométrique) | 0.291 | 0.084 | 0.279 |
| Interpolation linéaire avec lignes de contrainte (Approche à base de corrélation) | 0.546 | 0.298 | 0.38 |

Tableau 1 : Comparaison entre les données de référence (les données multifaisceaux) et les données comparées (les données monofaisceau)

D'après les résultats du tableau, La méthode d'interpolation linéaire avec lignes de contrainte selon l'approche géométrique présente des valeurs d'écart type similaires à celles sans lignes de contrainte. Cela suggère que l'approche des lignes de contrainte telle qu'elle est utilisée ne semble pas générer des résultats permettant de tirer des conclusions significatives. Ainsi que l'approche CHS ne génère pas de résultats de meilleure qualité par rapport aux autres méthodes testées. La méthode d'interpolation linéaire avec lignes de contrainte selon l'approche de corrélation montre des résultats qui semblent être très éloignés par rapport aux autres méthodes, avec des valeurs d'écart type (MSD, RMSD et Mean Distance) plus élevées, Néanmoins, il n'est pas possible de tirer des conclusions définitives quant à l'efficacité de cette méthode, étant donné que le levé monofaisceau réalisé en 2020 présente un biais de mesure dû à des erreurs systématiques, mais cela ne cache pas le fait qu'on a besoin des méthodes plus avancées pour la définition des lignes de contrainte.

Conclusion

L'interpolation est une étape clé dans le traitement des données bathymétriques monofaisceau pour la création d'un modèle numérique de terrain précis. Cette étape est toutefois tributaire de celle qui la précède, celle de l'acquisition et traitement des données (i.e synchronisation des infos, élimination des sondes aberrantes, décimation de sonde.... etc). Il est important de faire preuve de rigueur lors de cette phase afin de garantir la qualité des données recueillies (comme les mesures de profondeur ou les trajectoires linéaires lors de l'acquisition latérale des profils). Cette attention permet de faciliter la phase de découpage ultérieure. Cette

dernière, ne doit pas être négligée car elle permet de déterminer si les données peuvent être exploitées ou non. Par exemple, si un levé est réalisé de manière imprécise, les données obtenues ne sont pas exploitables, comme le montre l'exemple du relevé de St-Aignan. Le découpage est donc une phase cruciale du traitement, que ce soit via une approche géométrique, qui est généralement efficace pour les levés bien réalisés, ou l'approche du plus proche voisin, qui fonctionne dans des cas plus complexes. Pour ce qui est de l'interpolation, nous avons examiné deux méthodes souvent utilisées par l'équipe d'EDF, à savoir CHS pour obtenir un effet fluide ou la méthode linéaire. Bien sûr, il existe d'autres méthodes non présentées ici, mais en raison des contraintes de place, seules les méthodes les plus pertinentes ont été abordées.

En effet, l'utilisation de lignes de contrainte pour l'interpolation est une approche prometteuse qui peut potentiellement générer de bons résultats. Cependant, les résultats actuels ne permettent pas de tirer des conclusions définitives en raison de certaines limites rencontrées lors du traitement. Les méthodes utilisées pour générer les lignes de contrainte à l'aide des points d'intérêt n'ont pas été très performantes, ce qui a pu influencer les résultats obtenus. Il est donc prématuré de juger pleinement l'efficacité de cette approche. Pour améliorer l'interpolation en utilisant des lignes de contrainte, il serait judicieux d'explorer d'autres méthodes plus avancées pour la détection et la mise en correspondance des points d'intérêt, en utilisant des outils mathématiques plus sophistiqués.

Enfin, nous avons réussi à mettre en place les grandes idées pour la définition des lignes de contraintes. Initialement, la découverte de l'outil Tatooine Mesher a permis d'identifier la voie à suivre, bien que cela ne soit pas immédiatement évident au début. Cet outil n'est pas entièrement automatisé pour prendre en compte les lignes de contrainte. Alors, il a fallu d'abord créer des lignes de contrainte et ensuite de préparer minutieusement les données dans le format approprié afin d'assurer son fonctionnement. La chaîne de traitement a déjà été mise en place, mais il pourrait être nécessaire d'envisager un autre travail de fin d'études pour pousser cette démarche encore plus loin.

Bibliographie

Travaux universitaires

Deneu, Q. (2014, 9 juillet). Élaboration d'une méthode de mise en évidence de l'érosion : dépôt sur des rivières à faible énergie par bathymétrie multifaisceaux et scan laser 3D, Travail de fin d'études, ESGT-CNAM. 52p

Lamy, N. (2009). Performances et améliorations des protocoles de bathymétrie fluviale au Cemagref de Lyon. Travail de fin d'études, ESGT-CNAM. 110p

Articles de périodiques électroniques

Merwade, V., Maidment, D. R., & Goff, J. A. (2006). Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. *Journal of Hydrology*, 331(3-4), 731-741. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.018>

Wu, C., Mossa, J., Mao, L., & Almulla, M. (2019). Comparison of different spatial interpolation methods for historical hydrographic data of the lowermost Mississippi River. *Annals of GIS*, 25(2), 133-151. <https://doi.org/10.1080/19475683.2019.1588781>

Duron, L., Cierco, F., & Saad, K. (2019, 16 novembre). TatoonineMesher : Anisotropic interpolation from 1D cross-sections and 2D channel mesher. https://www.researchgate.net/publication/337297834_TatoonineMesher_Anisotropic_interpolation_from_1D_cross-sections_and_2D_channel_mesher

Zhang, X., Liu, J., Hu, Z., & Zhong, M. (2020b). Flow Modeling and Rendering to Support 3D River Shipping Based on Cross-Sectional Observation Data. *ISPRS international journal of geo-information*, 9(3), 156. <https://doi.org/10.3390/ijgi9030156>

Bhagabati, S. S., Kawasaki, A., Takeuchi, W., & Zin, W. W. (2020). Improving River Bathymetry and Topography Representation of a Low-Lying Flat River Basin by Integrating Multiple Sourced Datasets. *Journal of disaster research*, 15(3), 335-343. <https://doi.org/10.20965/jdr.2020.p0335>

Chen, W., & Liu, W. (2017). Modeling the Influence of River Cross-Section Data on a River Stage Using a Two-Dimensional/Three-Dimensional Hydrodynamic Model. *Water*, 9(3), 203. <https://doi.org/10.3390/w9030203>

Zhang, Y., Xian, C., Chen, H., Grieneisen, M. L., Liu, J., & Zhang, M. (2016). Spatial interpolation of river channel topography using the shortest temporal distance. *Journal of Hydrology*, 542, 450-462. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.022>

Zhuo, Y., Hou, J., Zhi, Z., Li, B., & Guo, K. (2019). An Improved Method Constructing 3D River Channel for Flood Modeling. *Water*, 11(3), 403. <https://doi.org/10.3390/w11030403>

Du, P., Kibbe, W. A., & Lin, S. (2006). Improved peak detection in mass spectrum by incorporating continuous wavelet transform-based pattern matching. *Bioinformatics*, 22(17), 2059-2065. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btl355>

Liang, Y., Wang, B., Sheng, Y., & Liu, C. (2022). Two-Step Simulation of Underwater Terrain in River Channel. *Water*, 14(19), 3041. <https://doi.org/10.3390/w14193041>

Huizinga, R. J., & Heimann, D. C. (2018). Hydrographic surveys of rivers and lakes using a multibeam echosounder mapping system. Fact sheet /. <https://doi.org/10.3133/fs20183021>

Wöfl, A., Snaith, H. M., Amirebrahimi, S., Devey, C. W., Dorschel, B., Ferrini, V. L., Huvenne, V. A., Jakobsson, M., Jencks, J., Johnston, G., Lamarche, G., Mayer, L. A., Millar, D. P., Pedersen, T. R., Picard, K., Reitz, A., Schmitt, T., Visbeck, M., Weatherall, P., & Wigley, R. (2019c). Seafloor Mapping – The Challenge of a Truly Global Ocean Bathymetry. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00283>

Batista, P., Silva, M. L. N., Avalos, F. A. P., De Oliveira, M. G., De Menezes, M. D., & Curi, N. (2017b). Hybrid kriging methods for interpolating sparse river bathymetry point data. *Ciencia E Agrotecnologia*, 41(4), 402-412. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017414008617>

Sites web

Yahiko. (s. d.-b). Introduction à l'interpolation numérique. Developpez.com. <https://yahiko.developpez.com/tutoriels/introduction-interpolation>. [Consulté le 11/05/2023]

Mathématiques pour le français langue étrangère 5. (s. d.). <https://public.iutenligne.net/francais-langue-etrangere/paronneau/maths-fle/maths-fle5/Chapitre-4/index.html> [consulté le :12/06/2023]

Cadden. (2022, 6 décembre). Bathymétrie : la cartographie des fonds marins - CADDEN. Cadden. <https://www.cadden.fr/bathymetrie-cartographie-fonds-marins/> [En ligne], [consulté le :07/04/2023]

<https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/interpolate.html> [En ligne], [consulté le :03/04/2023]

https://en.wikipedia.org/wiki/Cubic_Hermite_spline [En ligne], [consulté le :14/03/2023]

<https://www.geeksforgeeks.org/cubic-spline-interpolation/> [En ligne], [consulté le :03/03/2023]

https://xcdskd.readthedocs.io/en/latest/cross_correlation/cross_correlation_coefficient.html

[En ligne], [consulté le :07/05/2023]

<https://numpy.org/doc/stable/reference/routines.statistics.html> [En ligne], [consulté le :12/06/2023]

<https://anomaly.io/understand-auto-cross-correlation-normalized-shift/index.html> [En ligne], [consulté le :12/06/2023]

<https://realpython.com/numpy-scipy-pandas-correlation-python/> [En ligne], [consulté le :07/04/2023]

https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient [En ligne], [consulté le :12/06/2023]

Ouvrages imprimés

Rémy BOUDON - Guillaume THIBAUT - Michel TROUILLET, (2019), Évolution des techniques topographiques à EDF depuis les 40 dernières années. (s. d.). Revue XYZ, 3e trimestre 2019(N° 160), p :79.

Arnaud ABADIE - Christophe VIALA, (2018), Le sondeur multifaisceaux en hydrographie : Utilisations actuelles et futures. La revue trimestrielle XYZ N°157, p :21.

Velut Paul, (2023), EDF et la bathymétrie : entre terre, mer et montagne, La revue trimestrielle XYZ N°175, p :31.

Rapport de Fin d'Intervention de GEOxyz, 22/06/2020

Annexes

Annexe 1

Comparaison des caractéristiques d'un sondeur monofaisceau et d'un sondeur multifaisceaux.

| Type d'appareil | Type de mesure | Nombre d'angles de mesure (transversalement) | Fréquences | Ouverture angulaire longitudinale | Ouverture angulaire transversale par faisceau | Ouverture angulaire transversale totale | Portée | Prix | Applications |
|------------------------|---|---|--------------|-----------------------------------|---|---|--------------|----------------------|--|
| Sondeur monofaisceau | Réponse impulsionnelle | Un angle fixe (nadir) dû à la directivité du transducteur | 1 à 500 kHz | 5 à 30° | 5 à 30° | 5 à 30° | 3 à 4 000 m | 10 000 à 50 000 € | Bathymétrie Structures géologiques Processus sédimentaires Archéologie Classification des fonds Halieutique |
| Sondeur multifaisceaux | Plusieurs centaines de réponses impulsionnelles calculées par formation de voie | Plusieurs centaines dues à la formation de voie | 12 à 500 kHz | 0,5° | 0,5 à 4° | 150° | 1 à 12 000 m | Supérieur à 50 000 € | Bathymétrie Archéologie Classification des fonds Halieutique Faciès sédimentaires Cartographie des habitats marins Détection de structures artificielles |

Source : [« Le sondeur multifaisceaux en hydrographie : Utilisations actuelles et futures », p28, 2018]

Annexe 2

Tableau spécifiant les formats reconnus par Tatoonine Mesher pour la lecture des données d'entrée.

| | Reading | Writing | Extension | Multiple Z(*) |
|----------------------|----------------|----------------|------------------|----------------------|
| BlueKenue | X | X | *.i3s | Non |
| shp POINTZ | X | X | *_pts.shp | Oui |
| shp POLYLINEZ | X | X | *.shp | Non |
| georefC | - | X | *. georefC | Oui |

Source : [Duron et al. (2019)]

Annexe 3

Formules mathématiques utilisés pour le traitement et le calcul des écarts

- La corrélation croisée entre deux profils traduit par les deux fonctions suivantes $f_1(x) = z_1$ et $f_2(x) = z_2$ alors j'ai d'abord normalisé z_1 et z_2 pour centrer les valeurs après j'ai utilisé la formule :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{i,j} = \frac{Z_{i,j}}{\sqrt{\sigma_i^2 \cdot \sigma_j^2}} \\ Z_{i,j} = \frac{1}{N} \cdot [\sum_{t=1}^N (Z_{1,i}^t - \bar{Z}_{1,i}) \cdot (Z_{2,j}^t - \bar{Z}_{2,j})] \end{array} \right. \longrightarrow \rho_{i,j} = \frac{\sum_{t=1}^N (Z_{1,i}^t - \bar{Z}_{1,i}) \cdot (Z_{2,j}^t - \bar{Z}_{2,j})}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Z_{1,i}^t - \bar{Z}_{1,i})^2 \cdot \sum_{t=1}^N (Z_{2,j}^t - \bar{Z}_{2,j})^2}}$$

Tels que $Z_{1,i}$ et $Z_{2,j}$ sont deux profondeurs, chacune correspondant respectivement au premier et au deuxième profil

Les valeurs de $\rho_{i,j}$ varient de -1 à 1 :

- Si $\rho_{i,j}$ est proche de 1, cela indique une corrélation positive forte, c'est-à-dire que les deux séries sont très semblables.
- Si $\rho_{i,j}$ est proche de -1, cela indique une corrélation négative forte, ce qui signifie que les deux séries sont très semblables.
- Si la valeur est proche de 0, cela signifie que les deux séries n'ont pas de ressemblance notable à ce décalage.

Source : <https://realpython.com/numpy-scipy-pandas-correlation-python/#example-scipy-correlation-calculation>

- MSD = l'écart type (où z représente l'altitude d'un point) : est une mesure de la dispersion des valeurs d'un échantillon statistique ou d'une distribution de probabilité. Il est défini comme la racine carrée de la variance ou, de manière équivalente, comme la moyenne quadratique des écarts par rapport à la moyenne.

$$\text{MSD} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z(i) - \bar{z})^2 \right)^{1/2}$$

Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cart_type [Consulté : 28/06/2023]

- RMSD = la variance, est une mesure de la dispersion des valeurs d'un échantillon ou d'une variable aléatoire. Elle exprime la moyenne des carrés des écarts à la moyenne, aussi égale à la différence entre la moyenne des carrés des valeurs de la variable et le carré de la moyenne,

$$RMSD = (MSD)^2$$

Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Variance_\(math%C3%A9matiques\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Variance_(math%C3%A9matiques)) [Consulté : 28/06/2023]

- Mean Distance = la distance moyenne entre un nuage de points de référence un nuage de points comparés.

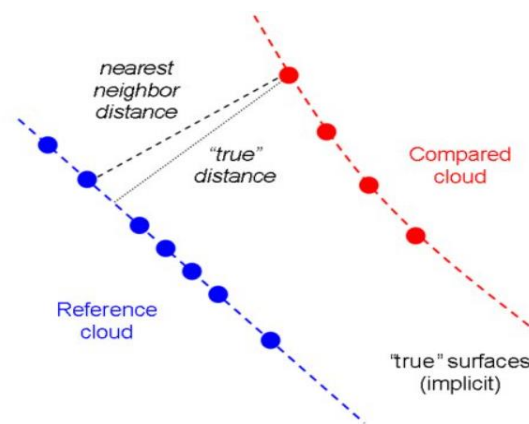


Figure : Calcul de différence entre deux nuages de points de référence avec un nuage de points comparés

Source : https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Distances_Computation [Consulté : 31/07/2023]

Annexe 4

Logiciel Hypack

HYPACK est l'un des packages logiciels de levés hydrographiques les plus prisés à l'échelle mondiale, bénéficiant d'une base de plus de 10 000 utilisateurs. Ce logiciel offre à l'utilisateur toutes les fonctionnalités requises pour planifier son levé, recueillir et traiter des données, les réduire et produire des résultats finaux. Que le travail consiste à collecter des données de levés hydrographiques, des données environnementales, ou simplement à positionner votre navire pour un projet d'ingénierie, HYPACK dispose des outils indispensables pour accomplir votre mission. Son usage s'étend des petits navires équipés uniquement d'un GPS et d'un échosondeur monofaisceau jusqu'aux grands navires de levé dotés de capteurs et systèmes en réseau, HYPACK offrant la puissance nécessaire dans un système que vos opérateurs peuvent facilement maîtriser.

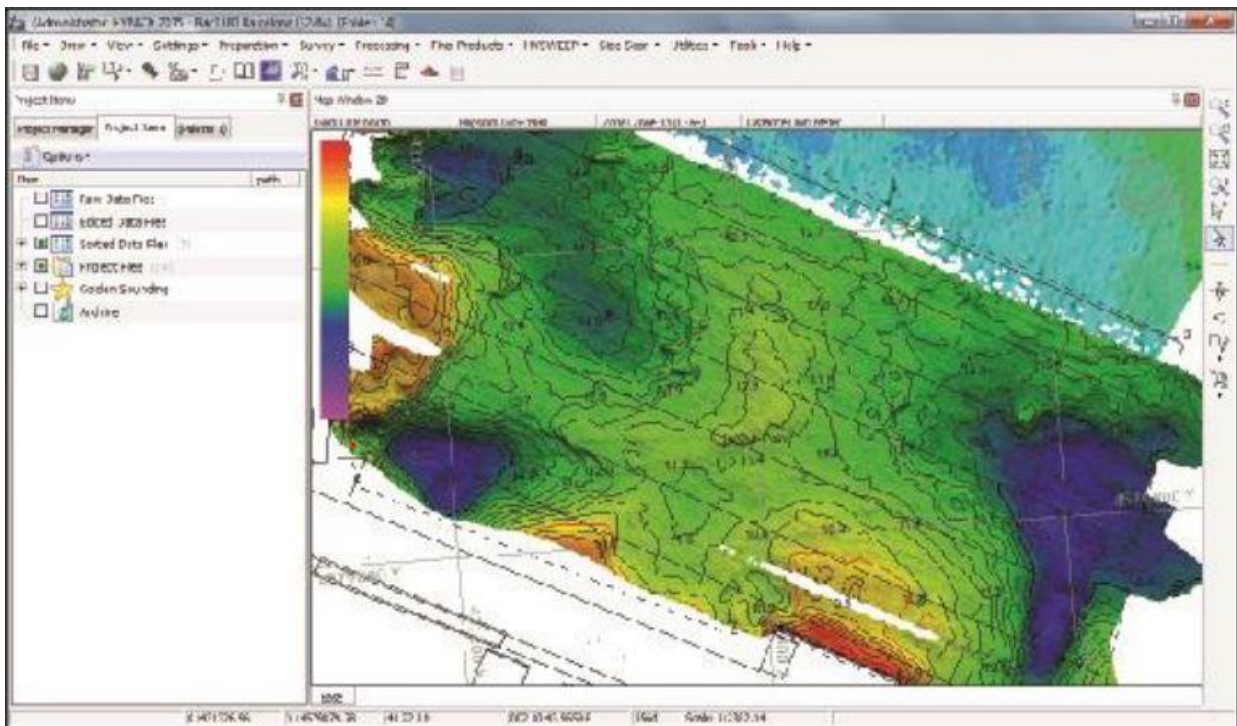


Figure : fenêtre du logiciel hypack, Source : <https://www.subtop.fr/vente-dequipements/equipements-subaquatiques/echosondeurs-et-scanner-3d-sous-marins/logiciels-echosondeurs/logiciel-hypack/> consulté : 30/06/2023]

Annexe 5

Logiciel BlueKenue

BlueKenue est un outil sophistiqué conçu pour aider les modélisateurs hydrauliques à préparer, analyser et visualiser leurs données. C'est une interface graphique avancée qui combine des données environnementales et géoréférencées avec des données de modélisation. Il peut lire directement les résultats des modèles TELEMAC, ADCIRC et HydroSim. Il permet une visualisation dynamique des résultats à travers diverses vues (1D, polaires, 2D, 3D ou sphériques) que l'utilisateur peut enregistrer comme vidéos ou images pour des rapports et présentations. Les vues et les données sont géoréférencées et le logiciel permet la conversion entre différents systèmes de coordonnées. Il gère aussi une grande variété de données utilisées couramment par les modélisateurs hydrauliques, disponibles dans les formats de fichiers ASCII et binaires, fixes ou variables dans le temps. Le logiciel permet l'importation et l'exportation de données aux formats SIG courants.

En ce qui concerne la préparation des données du modèle, BlueKenue offre la possibilité de générer des grilles rectangulaires et triangulaires à partir de diverses entrées. Il facilite également la création de cartes de friction hydrodynamique.

Pour analyser les résultats de simulation, BlueKenue offre des fonctionnalités comme l'animation des fichiers de résultat, l'extraction de profils temporels à n'importe quel point du domaine, et l'interrogation interactive de valeurs numériques. Il fournit également des statistiques sur le modèle et permet de définir des données complexes à partir des résultats de base du modèle.

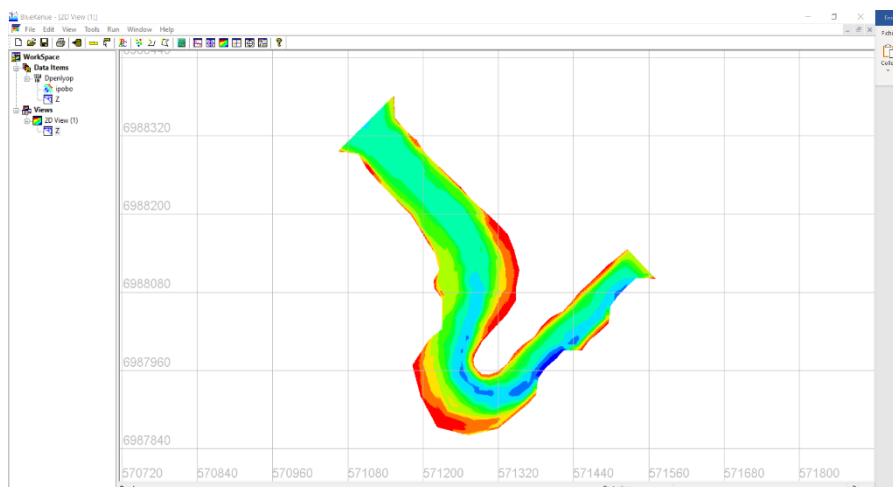


Figure : Fenêtre du logiciel BlueKenue

Annexe 6

Explication des codes et fonctions utilisés pour le traitement

Les codes sont disponibles avec un tutoriel d'utilisation dans le lien suivant :
<https://drive.google.com/drive/folders/1p3BJVqUVeIWRwom430QAd361uUrNy-Ta?usp=sharing>

- ***Decoupage_profiles_knn.py*** : ce code permet de découper un fichier xyz en des profils de format csv. Pour le faire fonctionner :
 - Il faut spécifier les entrées des codes qui sont :
 - *xyz_filename*
 - *lnw_filename*
 - Il faut spécifier la sortie dans la fonction *write_output_files* pour récupérer les fichiers csv des profils :
 - *output_dir*
 - On peut visualiser les profils grâce à la fonction *plot_profiles*, avant de l'exécuter il faut spécifier
 - *profiles_data* : emplacement des profils en format csv ;
 - *names_profiles* : nom de profil souhaitons le visualiser ;
 - *output_path* : emplacement pour sauvegarder l'image du profil visualisé ;
 - *window_length* : taille de la fenêtre de visualisation ;
 - *polyorder* : ordre du polynôme de lissage qui relie les points d'un profil ;
- ***Find_and_match_candidates.py*** : ce code permet de chercher les points candidats dans un profil et trouve leurs meilleures correspondances dans le profil suivant selon une approche géométrique (distance euclidienne). Pour le faire fonctionner :
 - Il faut charger les données des deux profils que l'on souhaite traiter
 - `x1, y1= load_data(r"C:\Users\Admin\Desktop\profiles_output\profile_{i}.csv")`
 - `x2, y2 = load_data(r"C:\Users\Admin\Desktop\profiles_output\profile_{i+1}.csv")`
 - le code se compose de plusieurs fonctions :
 - *load_data* : charger les données ;
 - *detect_extrema* : détecter les extremums locaux de chaque profil ;
 - *find_matching_candidates_euclidean_distance* : trouver les points candidats dans chaque profil, la distance est réglable ;

- *calculate_cross_correlation* : calcule la corrélation croisée entre deux points donnés ;
 - *find_best_match* : trouver les meilleures correspondances parmi les points candidats, on peut modifier la fenêtre « window » et le seuil de corrélation « thershold » ;
 - *draw_profile_endpoints* : dessiner des lignes qui relient les extrémités des profils ;
 - *find_lowest_points* : trouver le point le plus bas pour dessiner le thalweg à la fin ;

- ***Generate_csv_interest_point.py*** : ce code génère un dossier contenant des fichiers de format chaque fichier correspond aux points d'intérêt de chaque profil, ce code est utile pour pouvoir repérer les positions des points dans les profils avec un logiciel de SIG comme QGIS. Les fichiers sont nommés de cette façon : *best_match_points_i-j_profile_index_k*, ce code est identique à *Find_and_match_candidates.py*, la seule nouveauté est marquée par la présence de la fonction *process_all_profiles* qui permet de procéder à un dossier et effectuer le même traitement sur un ensemble des profils de format csv.
 - On peut spécifier l'emplacement du fichier de sortie dans :
 - *folder_path*

- ***Approche_inflexion.py*** : Ce code permet de chercher les points candidats dans un profil et trouve leurs meilleures correspondances dans le profil suivant selon une approche des points d'inflexion. le code est identique a celui de l'approche de distance euclidienne. On peut modifier *Generate_csv_interest_point.py* pour récupérer les points d'intérêts obtenus par cette approche et pouvoir les visualisé après.

- ***Convertir_csv_shp_linez.py*** : Ce code permet de convertir les profils de format csv en fichier shp, cela est utile si on souhaite travailler avec l'outil Tatoonine Mesher.
 - Il faut spécifier l'entrée et la sortie de notre code qui sont :
 - *input_folder*
 - *output_forlder*

- ***Convertir_to_polylinez.py*** : Ce code permet de convertir des points d'intérêt en des polygones, ceci est utile pour obtenir des lignes de contrainte et les utiliser dans Tutooine Mesher. Pour le faire fonctionner :
 - Il faut spécifier l'entrée et la sortie de notre code qui sont :
 - *input_folder*
 - *output_forlder*

- ***thalweg+RiveG+RiveD.py*** : Ce code permet de récupérer le thalweg et le rive gauche et droite de notre zone d'étude, ceci peut être utilisé dans notre traitement avec Tutooine Mesher notamment pour la définition de l'axe hydraulique avec le thalweg si on ne dispose pas d'un traversier et les rives gauche et droite peuvent être utilisés comme des lignes de contrainte. Pour le faire fonctionner :
 - Il faut spécifier l'entrée et la sortie de notre code qui sont :
 - *folder_path* : l'emplacement du dossier contenant les fichiers obtenus par le code *Generate_csv_interest_point.py* ;
 - pour enregistrer les GeoDataFrames séparément au format shapefile (SHP)
 - *lowest_points_shp*
 - *endpoints_shp*

- ***Approche_corrélation.py*** : ce code permet de chercher les points candidats dans un profil et trouve leurs meilleures correspondances dans le profil suivant selon une approche de corrélation, la spécificité de ce code est que le choix du pas de la fenêtre et le seuil de corrélation est automatisé pour obtenir des meilleurs résultats. Le code est identique à *Find_and_match_candidates.py*, sauf qu'il applique une approche par corrélation pour trouver les correspondances entre les points d'intérêt.

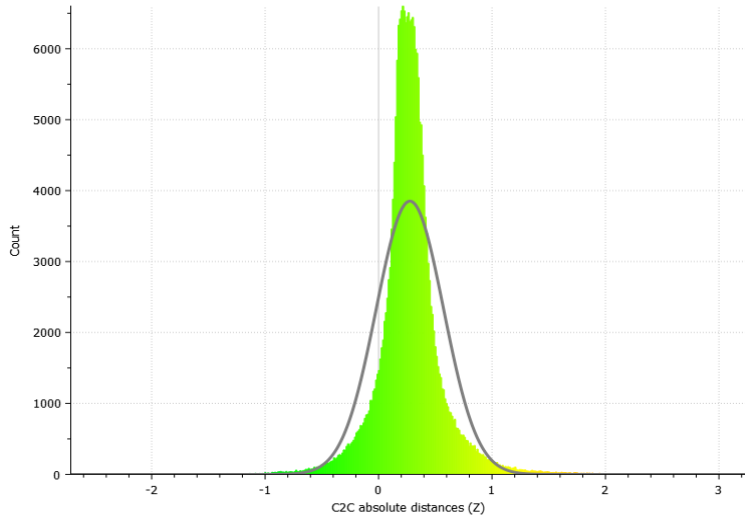
- ***Estimate_deviation.py*** : ce code permet le calcul des déviations entre les points interpolés et les points vrais qui sont des points issus d'un relevé multifaisceaux. Il calcul d'abord :
 - La Difference
 - MAD : Mean Absolute Deviation
 - MSD : Mean Standard Deviation

- RMSD : Root Mean Square Deviation
- ***Generate_csv_interest_point_version_2.py*** : ce code génère un dossier contenant des fichiers de format chaque fichier correspond aux points d'intérêt de chaque profil, il est adapté pour générer les résultats du code : *Approche_corrélation.py*.
- ***Tatooine Mesher*** : c'est un outil développé par le CNR pour effectuer des interpolations avec la prise en compte des lignes de contrainte, pour l'utiliser il faut d'abord.
 - *Télécharger l'outil depuis le lien suivant: <https://github.com/CNR-Engineering/TatooineMesher>*
 - *De préférence je recommande de copier les 4 codes et les coller directement dans le dossier téléchargé :*
 - `densify_cross_sections.py`
 - `mesher_and_interpolator.py`
 - `mesh_crue10_run.py`
 - `mesh_mascaret_run.py`
 - Lancer l'invite de commande/Anaconda powershell Prompt
 - Utiliser `cd` pour ouvrir le fichier de l'outil dans l'environnement de travail, par exemple : `cd C:\Users\Admin\Desktop\TatooineMesher-master`
 - Taper la commande qu'on veut utiliser : tout est expliqué dans ce lien = <https://github.com/CNR-Engineering/TatooineMesher/wiki>

Annexe 7

Histogrammes de comparaison entre un relevé multifaisceau et un relevé monofaisceau interpolé selon les approches utilisées dans le traitement

Gauss: mean = 0.276171 / std.dev. = 0.295492 [481 classes]



Gauss: mean = 0.257325 / std.dev. = 0.289951 [480 classes]

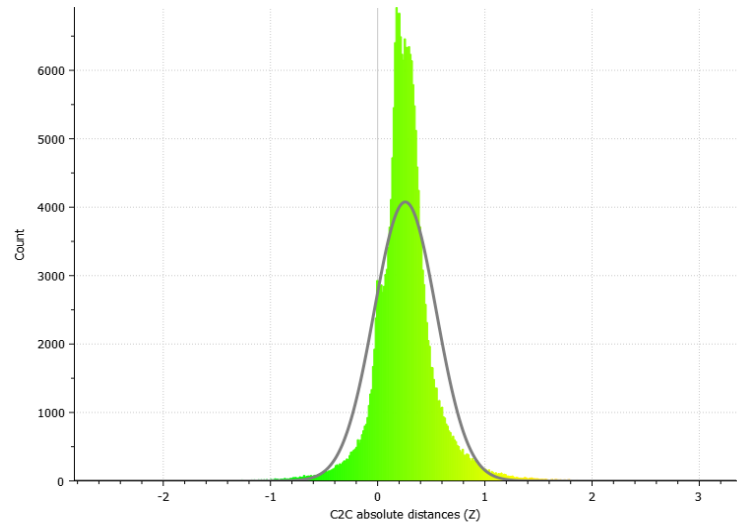
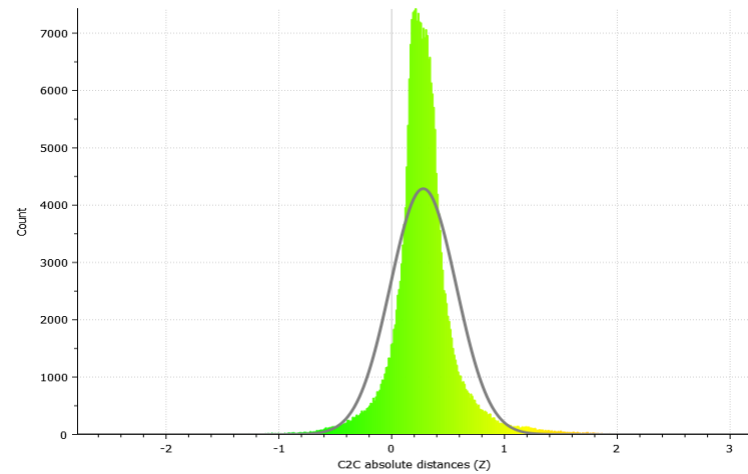


Figure 1 : Histogramme explicitant l'écart-type entre le relevé multifaisceau et le relevé monofaisceau interpolé linéairement

Figure 2 : Histogramme explicitant l'écart-type entre le relevé multifaisceau et le relevé monofaisceau interpolé par la méthode CHS

Gauss: mean = 0.279832 / std.dev. = 0.291189 [525 classes]



Gauss: mean = 0.380797 / std.dev. = 0.546513 [538 classes]

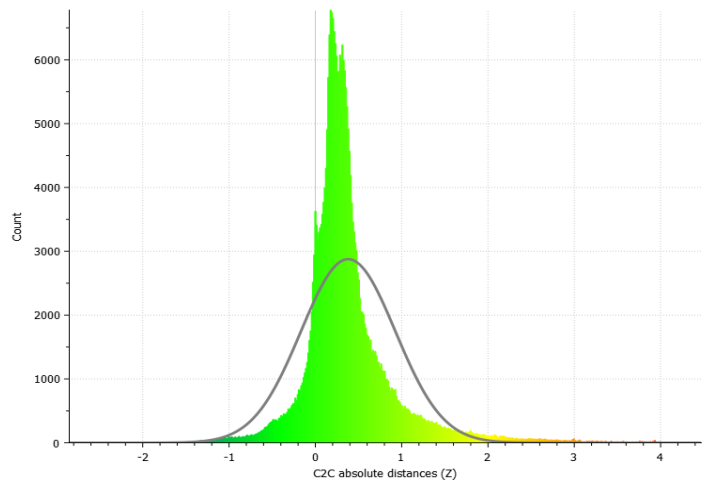


Figure 1 : Histogramme explicitant l'écart-type entre le relevé multifaisceau et le relevé monofaisceau interpolé linéairement sous lignes de contrainte construites par l'approche géométrique

Figure 1 : Histogramme explicitant l'écart-type entre le relevé multifaisceau et le relevé monofaisceau interpolé linéairement sous lignes de contrainte construites par l'approche à base de corrélation

Liste des figures

| | |
|--|----|
| figure 1 : exemple de representation tridimensionnelle de l'affouillement autour d'une pile de pont obtenue a l'aide d'un systeme de cartographie multifaisceau. dans la riviere missouri a randolph. source : (huizinga 2016)..... | 7 |
| figure 2 : vue en plan du canal de la riviere missouri cartographié atteindre à kansas city, mo., indiquant les zones de sedimentation en bleu du lit entre 2011 et 2015. (huizinga 2016). | 7 |
| figure 3 : sondeur monofaisceau. source: [cadden (2022)] | 8 |
| figure 4 : principe de fonctionnement d'un sondeur multifaisceaux. source : (abadie & christophe, 2018. p :21).. | 9 |
| figure 5 : comparaison entre un leve multifaisceau et un leve monofaisceau (extrait de la riviere de mississippi rivers a missouri aux etats unis). source : [huizinga et heimann (2018)]..... | 11 |
| figure 6 : bathymetrie mesuree (a gauche) comparee a la bathymetrie interpoolee a partir de l'altitude le long des sections transversales (3 methodes d'interpolation). à partir de l'altitude le long des sections transversales (3 methodes d'interpolation : lineaire, idw et krigeage). source : [duron et al. (2019)] | 12 |
| figure 7 : extrait d'un leve interpoole selon la methode classique par le logiciel cloud compare | 13 |
| figure 8 : schema expliquant la methode classique d'interpolation en mettant en evidence la mise en correspondance des points situes en vis-a-vis le long des profils. source : [liang et al. (2022)]..... | 13 |
| figure 9 : illustrations des etapes de generation du maillage pour un seul sous-modele en deux lignes de contrainte. source : [duron et al. (2019)] | 14 |
| figure 10 : schema illustrant la difference entre l'interpolation entre deux profils sans l'utilisation de lignes de contrainte et l'interpolation qui integre les lignes de contrainte..... | 15 |
| figure 11 : vue en plan illustrant les possibles lignes de contrainte en prenant en consideration la geometrie du canal. | 15 |
| figure 12 : exemple de distribution des profils dans un leve monofaisceau. source : [liang et al. (2022)]..... | 16 |
| figure 13 : exemple du fichier xyz d'un leve monofaisceau realise le 2020/06/22 | 17 |
| figure 14 : fenetre du logiciel hypack avec le decoupage en profil manuel des donnees monofaisceau | 18 |
| figure 15 : composantes du fichier lnw exporte par le logiciel hypack | 19 |
| figure 16 : vue en plan mettant en avant le processus d'indentification d'un profil..... | 19 |
| figure 17 : vue en plan qui explique les etapes de creation des polygones | 20 |
| figure 18 : exemple des anomalies resultantes de l'approche geometrique..... | 20 |
| figure 20 : vue en plan du processus de la recherche du point le plus proche pour decouper en profil les donnees bathymetriques monofaisceau | 21 |
| figure 19 : vue en travers qui explique le processus de la recherche du point le plus proche pour decouper en profil les donnees bathymetriques monofaisceau (cercles rouges ayant pour centre des points generes.) .. | 21 |
| figure 21 : [en orange] le decoupage effectue par l'approche geometrique [en vert] le decoupage effectue par l'approche de plus proche voisin | 22 |
| figure 22 : [a gauche] ensemble de points initiaux a interpoler et [a droite] une courbe representative d'une interpolation lineaire. source : [yahiko, s. d.-b] | 23 |
| figure 23 : vue en travers d'un profil intermediaire genere a l'aide d'une interpolation lineaire | 24 |
| figure 24 : exemple d'un maillage interpoole lineairement avec l'outil tatooine mesher. source : [duron et al. (2019)]..... | 24 |
| figure 25 : construction des splines par chs. source : [yahiko, s. d.-b]..... | 25 |
| figure 26 : les tangentes d'une spline cubique d'hermite sur deux points consecutifs. source : [yahiko, s. d.-b] . | 25 |
| figure 27 : representations des fonctions h00, h01, h10 et h11 dans un intervalle [0 ;1] | 27 |
| figure 28 : vue en travers d'un profil intermediaire genere a l'aide d'une interpolation chs | 27 |
| figure 29 : exemple d'un maillage interpoole par la methode chs. source : [duron et al. (2019)] | 27 |
| figure 30 : schema expliquant le processus de conversion des profils en un fichier shp..... | 28 |
| figure 31 : la commande utilisee pour effectuer l'interpolation et generer un maillage avec l'outil tatooine mesher, l'interpolation specifie ici est : lineaire. | 29 |
| figure 33 : m0 est un point d'inflexion de coordonnees (x0, f(x0)). source : [mathematiques pour le français langue etrangere 5] | 32 |
| figure 32 : pour la premiere figure spectre brut avec des pics identifies par un algorithme base sur cwt, et la deuxieme snr des pics calcules dans un algorithme base sur cwt avec des pics identifies, cela explique le processus de detections des maximas locaux avec la cwt. source : [du et al. (2006)] | 32 |
| figure 34 : extrait de resultat de l'execution du code implemente pour la recherche des candidats entre les deux profils et les trier pour laisser que les points qui etablissent la meilleure correspondance | 33 |

| | |
|---|----|
| figure 35 : exemple d'une mise en correspondance entre deux profils identiques issus d'un leve monofaisceau, les etoiles correspondent aux points les plus bas des deux profils (seuil de correlation = 0.1 ; pas =1)..... | 33 |
| figure 36 : exemple d'une mise en correspondance entre deux profils differents (seuil de correlation = 0.1 ; pas =1) | 34 |
| figure 37 : exemple d'une mise en correspondance entre deux profils differents avec la methode des points d'inflexion pour la detection des points d'interet | 34 |
| figure 38 : schema explicatif du processus de recherche des points de correspondance entre deux profils d'ordre respectivement n, n+1 | 34 |
| figure 39 : exemple d'une mise en correspondance par l'approche de correlation (basique) entre deux profils differents (seuil de correlation = 0.1 ; pas =1)..... | 35 |
| figure 40 : exemple du resultat de la correlation entre un extremum local d'indice 336 dans la liste des donnees et les points du deuxieme profil..... | 36 |
| figure 41 : [en vert] les lignes de contraintes generees a partir des points d'interet detectes avec l'approche basique, [en rouge] les lignes de contraintes generees a partir des points d'interet detectes avec l'approche geometrique differents (seuil de correlation =0.9 ; pas =1) | 37 |
| figure 43 : photo prise par un drone aerien de la centrale et chenal de penly (extrait d'un rapport de fin d'intervention dans le chenal de penly effectue par ingeo effectue le 15/05/2021)..... | 39 |
| figure 42 : semis de points du leve mono du chenal penly importe sur qgis, formant des profils avec la presence d'un axe hydraulique | 39 |
| figure 44 : semis des points du leve de st-aignan importe sur qgis, formant des profils avec la presence d'un axe hydraulique | 39 |
| figure 45 : maillage interpole lineairement du chenal de penly avec l'outil tatooine mesher et visualise par le logiciel bluekenue..... | 41 |
| figure 46 : maillage interpole par cubique spline d'hermite du chenal de penly avec l'outil tatooine mesher et visualise par le logiciel bluekenue | 41 |
| figure 47 : [1] maillage interpole lineairement de pas 13.5 m de la zone levee de st-aignan, [2] noeuds obtenus par tatooine mesher des profils decoupees par plus proche voisin (interpole lineairement), [3] noeuds obtenus par une implementation scilab realisee par l'equipe bathymetrie edf des profils decoupees selon l'approche geometrique (interpole chs)..... | 42 |
| figure 48 : [a gauche] lignes de contraintes reparties de facon discretees au long des profils, [a droite] maillage interpole lineairement en tenant compte des lignes de contrainte (approche geometrique) | 44 |
| figure 49 : leve multifaisceau du chenal de penly realise le 06/2020, visualise par bluekenue..... | 44 |
| figure 50 : [a gauche] lignes de contraintes reparties de facon discretees au long des profils, [a droite] maillage interpole lineairement en tenant compte des lignes de contrainte (approche a base de correlation)..... | 45 |

RESUME

Un levé bathymétrique est régulièrement effectué pour identifier les zones d'ensablement et de sédimentation dans les lits de rivière, ce qui est essentiel pour planifier les opérations de dragage. Pour ce faire, on utilise souvent des sondeurs monofaisceau en raison de leur coût inférieur et de leur facilité de mise en place dans des zones étroites. Cependant, ces sondeurs produisent des données discrètes qui nécessitent une interpolation. Les méthodes d'interpolation traditionnelles couramment utilisées présentent des limites en termes de précision et de rendu. Pour améliorer ces méthodes, une approche basée sur les données des profils a été créée. Cette approche utilise des lignes de contrainte pour guider les interpolateurs et limiter les zones d'interpolation, ce qui permet d'améliorer considérablement la précision de l'interpolation.

Mots clés : bathymétrie, ensablement, sondeur, monofaisceau, interpolation, lignes de contrainte, profil

SUMMARY

A bathymetric survey is regularly carried out to identify areas of siltation and sedimentation in river beds, which is essential for planning dredging operations. For this purpose, single-beam echosounders are often used due to their lower cost and ease of implementation in narrow areas. However, these echosounders produce discrete data that requires interpolation. The traditional interpolation methods commonly used have limitations in terms of accuracy and rendering. To improve these methods, an approach based on profile data has been created. This approach uses constraint lines to guide the interpolators and limit the interpolation areas, which significantly improves the accuracy of the interpolation.

Key words : bathymetry, siltation, sounder, single beam, interpolation, constraint lines, cross section