



Titre: Estimation du débit solide en rivière par algorithme ensembliste et régression stochastique
Title: régression stochastique

Auteur: Gabriel Metri
Author:

Date: 2024

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Metri, G. (2024). Estimation du débit solide en rivière par algorithme ensembliste et régression stochastique [Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/61265/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/61265/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Tew-Fik Mahdi
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Estimation du débit solide en rivière par algorithme ensembliste et régression
stochastique**

GABRIEL METRI

Département de génies civil, géologique et des mines

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*
Génie civil

Novembre 2024

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Cette thèse intitulée :

**Estimation du débit solide en rivière par algorithme ensembliste et régression
stochastique**

présentée par **Gabriel METRI**

en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

Musandji FUAMBA, président

Tew-Fik MAHDI, membre et directeur de recherche

Elmira HASSANZADEH, membre

Ahmad SHAKIBAEINIA, membre

Ousmane SEIDOU, membre externe

DÉDICACE

"On ne voit bien qu'avec le coeur. L'essentiel est invisible pour les yeux."

Antoine de Saint-Exupéry

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, Tewfik Mahdi. Je vous remercie sincèrement pour le soutien, les conseils avisés et le temps précieux que vous m'avez consacrés, tant pour ma recherche académique que pour mes aspirations professionnelles. Chaque moment passé à travailler à vos côtés m'a été extrêmement enrichissant, et l'expérience que vous m'avez permis d'acquérir est inestimable. Grâce à vous, je peux affirmer avec fierté que je suis pleinement satisfait de ma thèse.

Je souhaite également exprimer ma gratitude aux membres de mon jury de thèse pour le temps qu'ils ont consacré, ainsi que pour leurs commentaires et conseils, qui ont grandement contribué à l'amélioration de ce travail. Je remercie également Hydro-Québec, et tout particulièrement M. George Tchamen, pour l'opportunité de financer une partie de cette recherche, ce qui a grandement facilité mon parcours académique.

Je tiens ensuite à remercier ma conjointe, Laurie Fontaine, pour son soutien indéfectible tout au long des défis rencontrés au cours de ce projet de recherche. Un grand merci à mon ami Alexandre Beauchamp pour les nombreuses heures passées à m'aider à examiner la problématique de recherche sous différents angles et à m'écouter lorsque j'en avais besoin. Je suis également reconnaissant envers Étienne Bélanger pour le temps qu'il m'a consacré lors des expérimentations au laboratoire d'hydrodynamique de Polytechnique. Enfin, un remerciement tout particulier à ma famille pour leur soutien tout au long de ce défi qu'a été ma thèse de doctorat.

RÉSUMÉ

La gestion des rivières et la protection contre les risques naturels, tels que l'érosion et les crues, dépendent des estimations et des modélisations du transport sédimentaire dans les écoulements à surface libre. Ces phénomènes sont complexes et influencés par une multitude de facteurs, incluant les conditions hydrauliques et physiographiques des rivières et leurs caractéristiques sédimentaires. Bien que des équations classiques existent pour estimer ce transport, leurs performances varient en fonction des conditions spécifiques rencontrées, ce qui limite leur efficacité dans des situations plus complexes ou extrêmes.

Cette thèse présente le développement et l'évaluation de nouveaux algorithmes visant à améliorer l'estimation du transport sédimentaire par charriage dans les écoulements à surface libre. L'objectif principal est de proposer un algorithme intégrant la régression par processus gaussien (RPG) et un algorithme ensembliste, utilisant les conditions hydrauliques, physiographiques et sédimentaires propres aux rivières. Le développement de modèles plus précis est essentiel pour une meilleure gestion des rivières, notamment dans le cadre de l'ingénierie fluviale, la protection contre l'érosion et la gestion des crues.

La recherche se fonde sur une approche méthodologique intégrée combinant des données expérimentales, issues d'expérimentations en laboratoire, et des données extraites de la littérature. Un ensemble de 11 463 données provenant de diverses études a été utilisé pour calibrer et valider les algorithmes développés. Les performances des algorithmes ont été comparées aux équations classiques de transport solide, telles que celles de Meyer-Peter, Yang, et Ackers-White, en se basant sur des critères de performance comme la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et la moyenne des rangs. Ces critères permettent d'évaluer la qualité des estimations pour différentes concentrations de sédiments.

Les expérimentations en laboratoire ont permis de valider les performances des algorithmes sur trois types de sédiments : le gravier, le sable grossier et le sable fin. Les tests ont été réalisés dans un canal rectangulaire avec une pente longitudinale de 0,4% et un débit maximal de $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$. Les résultats montrent que la régression par processus gaussien se classe parmi les cinq meilleures équations pour les trois types de sols, avec des performances particulièrement remarquables pour le sable fin. L'algorithme ensembliste, quant à lui, offre des résultats compétitifs pour le gravier et le sable grossier, mais est moins performant pour le sable fin, probablement en raison de la complexité des interactions hydrauliques et sédimentaires à faible granulométrie.

La validation des algorithmes a toutefois révélé certaines limites liées au montage expéri-

mental. Notamment, le système d'alimentation en débit liquide a montré des fluctuations, affectant ainsi la précision des résultats. De plus, l'utilisation d'un canal à pente variable et d'un débit plus élevé pourrait élargir le domaine de validation et améliorer la robustesse des algorithmes.

Un algorithme d'extraction de données homogènes est conçu pour sélectionner des ensembles de données cohérentes, pertinentes et représentatives des comportements sédimentaires typiques des rivières étudiées. Dans le cadre de cette recherche, il est particulièrement utilisé pour améliorer la précision des estimations du transport solide dans différentes conditions sédimentaires. Pour ce faire, les paramètres adimensionnels significatifs du transport sédimentaire par charriage sont définis. Ceux-ci sont le nombre de Froude, le débit unitaire adimensionnel, le paramètre des particules, la puissance de courant unitaire et le paramètre de vitesse adimensionnel.

Cet algorithme fonctionne en extractant les données expérimentales ou issues de la littérature, en les classant selon des critères spécifiques, en sélectionnant des listes de données qui présentent des caractéristiques similaires. Cela permet d'assurer que les ensembles de données extraits sont homogènes, ce qui facilite l'analyse et permet de développer des modèles plus robustes.

Les résultats montrent que cet algorithme est performant pour les concentrations de sédiments comprises entre 0 et 10 000 PPM, capturant efficacement les comportements sédimentaires des rivières à l'étude. Cependant, au-delà de cette concentration, l'algorithme rencontre des limitations, notamment en raison du manque de données disponibles à haute concentration. Cette situation entraîne une augmentation de l'incertitude et une diminution de la performance des modèles développés pour ces domaines d'écoulement.

L'évaluation des performances des algorithmes par rapport aux équations classiques de transport solide a révélé plusieurs éléments intéressants. L'équation de Meyer-Peter s'est avérée particulièrement performante pour les concentrations élevées de sédiments, obtenant les meilleures RMSE sur l'ensemble des données de la littérature. En revanche, pour les faibles concentrations, cette équation tend à surestimer les débits solides, ce qui favorise les algorithmes développés, notamment pour les concentrations inférieures à 10 000 PPM. La méthode de la moyenne des rangs a également montré que les algorithmes ensemblistes et la régression par processus gaussien se classent parmi les modèles les plus performants, avec des scores moyens respectifs de 4,59 et 4,77, comparativement à 5,72 pour l'équation de Yang qui a la meilleure performance des équations existantes évaluée selon ce critère.

Cependant, les résultats suggèrent que pour les concentrations supérieures à 100 000 PPM, la performance de la régression par processus gaussien diminue, en raison d'un manque de

données homogènes à haute concentration dans la littérature. Cela souligne l'importance d'enrichir la base de données avec des mesures supplémentaires à haute concentration pour améliorer la fiabilité des estimations dans ce domaine d'écoulement.

En conclusion, cette thèse a permis de développer et d'évaluer de nouveaux algorithmes pour améliorer l'estimation du transport sédimentaire dans les écoulements à surface libre. En intégrant la régression par processus gaussien et un algorithme ensembliste, ces méthodes offrent des performances prometteuses, en particulier pour des concentrations de sédiments variées. Les expérimentations en laboratoire, ainsi que la création d'une base de données riche et diversifiée, ont renforcé la validité des approches proposées, tout en soulignant la nécessité de données supplémentaires pour les concentrations élevées de sédiments. Ces travaux ouvrent des perspectives intéressantes pour la gestion des cours d'eau et la prévention des risques naturels, en fournissant des outils plus précis et adaptés aux conditions complexes des rivières. Les résultats obtenus constituent une base solide pour de futures recherches dans l'optimisation des méthodes de prédiction du transport solide, tout en élargissant le domaine d'application à des situations plus complexes.

ABSTRACT

River management and protection against natural hazards, such as erosion and floods, rely on accurate estimates and modeling of sediment transport in open channel flows. These processes are complex and influenced by a multitude of factors, including the hydraulic and physiographic conditions of rivers, as well as their sedimentary characteristics. While classical equations exist for estimating sediment transport, their performance varies depending on the specific conditions encountered, limiting their effectiveness in more complex or extreme situations.

This thesis presents the development and evaluation of new algorithms aimed at improving the estimation of sediment transport by bedload in free-surface flows. The main objective is to propose an algorithm integrating Gaussian Process Regression (GPR) and an ensemble algorithm, utilizing the hydraulic, physiographic, and sedimentary conditions specific to rivers. The development of more accurate models is essential for better river management, particularly in the fields of fluvial engineering, erosion control, and flood management.

The research is based on an integrated methodological approach, combining experimental data from laboratory experiments and data extracted from the literature. A dataset of 11,463 entries from various studies was used to validate the developed algorithms. The performance of these algorithms was compared to classical sediment transport equations, such as those of Meyer-Peter, Yang, and Ackers-White, using performance criteria like the Root Mean Square Error (RMSE) and the mean ranks. These criteria allow for the evaluation of estimation accuracy across different sediment concentrations.

Laboratory experiments were conducted to validate the performance of the algorithms on three types of sediments: gravel, coarse sand, and fine sand. The tests were carried out in a rectangular flume with a longitudinal slope of 0.4% and a maximum discharge of $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$. The results show that the Gaussian Process Regression ranks among the top five equations for all three soil types, with particularly outstanding performance for fine sand. The ensemble algorithm, on the other hand, produces competitive results for gravel and coarse sand but performs less effectively for fine sand, likely due to the complexity of hydraulic and sediment interactions at smaller grain sizes.

However, the validation of the algorithms revealed certain limitations related to the experimental setup. Specifically, the liquid flow supply system exhibited fluctuations, which impacted the accuracy of the results. Additionally, the use of a flume with a variable slope and higher discharge could expand the validation domain and improve the robustness of the

algorithms.

An homogeneous data extraction algorithm is developed to select consistent, relevant, and representative datasets that reflect typical sediment transport behaviors in the studied rivers. In this research, it is specifically employed to enhance the accuracy of solid transport estimations under various sedimentary conditions. To achieve this, significant dimensionless parameters of bedload sediment transport are defined, including the Froude number, dimensionless unit discharge, particle parameter, unit stream power, and dimensionless velocity parameter.

This algorithm operates by filtering experimental or literature-based data, classifying them according to specific criteria, and selecting datasets with similar characteristics. This ensures that the extracted datasets are homogeneous, facilitating analysis and enabling the development of more robust models.

The results show that this algorithm performs well for sediment concentrations between 0 and 10,000 PPM, effectively capturing the sedimentary behaviours of the rivers under study. However, beyond this concentration, the algorithm encounters limitations, primarily due to the lack of available high-concentration data. This leads to increased uncertainty and a decrease in the performance of the models developed for these flow conditions.

The performance evaluation of the algorithms compared to classical sediment transport equations revealed several interesting findings. The Meyer-Peter equation proved particularly effective for high sediment concentrations, achieving the best RMSE across the dataset from the literature. However, for low concentrations, this equation tends to overestimate sediment transport rates, which favors the developed algorithms, especially for concentrations below 10,000 PPM. The rank averaging method also demonstrated that the ensemble algorithms and Gaussian process regression rank among the top-performing models, with average scores of 4.59 and 4.77, respectively.

However, the results suggest that for concentrations exceeding 100,000 PPM, the performance of Gaussian process regression decreases due to a lack of homogeneous high-concentration data in the literature. This underscores the importance of enriching the database with additional high-concentration measurements to improve the reliability of estimates in this flow regime.

In conclusion, this thesis has developed and evaluated new algorithms to improve the estimation of sediment transport in open channel flows. By integrating Gaussian process regression and an ensemble algorithm, these methods offer promising performance, particularly for a wide range of sediment concentrations. Laboratory experiments and the creation of a rich

and diverse database have reinforced the validity of the proposed approaches, while also highlighting the need for additional data at higher sediment concentrations. This work presents interesting prospects for river management and natural hazard prevention, providing more accurate and adaptable tools for the complex conditions found in rivers. The results form a solid foundation for future research in optimizing sediment transport prediction methods, expanding their application to more complex scenarios.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xvi
LISTE DES FIGURES	xvii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xx
LISTE DES ANNEXES	xxiii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 NOTIONS DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS NON-COHÉSIFS EN HYDRAULIQUE FLUVIALE	3
2.1 Comportement de la phase liquide	3
2.1.1 Hypothèses fondamentales	5
2.1.2 Variables hydrauliques	5
2.2 Propriétés des sédiments	8
2.2.1 Taille	8
2.2.2 Forme	9
2.2.3 Masse volumique	9
2.2.4 Vitesse de chute	10
CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE	11
3.1 Analyse des paramètres adimensionnels liés au transport sédimentaire	11
3.1.1 Définition des paramètres adimensionnels	11
3.1.2 Sensibilité des paramètres adimensionnels	13
3.2 Interaction entre la phase liquide et solide	14

3.2.1	Types de débit solide	16
3.2.2	Débit solide total	17
3.3	Les équations de transport solide existantes	17
3.3.1	Différentes approches physiques	17
3.3.2	Domaine d'application des équations de transport solide	21
3.3.3	Évaluation des équations existantes	24
3.4	Traitement de base de données en transport sédimentaire	25
3.5	Auto-apprentissage dans le transport sédimentaire	27
3.5.1	Réseaux de neurones	27
3.5.2	Régression par processus gaussien	29
3.5.3	Forêt aléatoire	31
3.5.4	Algorithme ensembliste	32
CHAPITRE 4 SYNTHÈSE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE		34
4.1	Synthèse de la revue de littérature	34
4.2	Objectifs	35
CHAPITRE 5 APPROCHE ET MÉTHODE SCIENTIFIQUE		36
5.1	Protocole expérimental des mesures de débit solide pour des écoulements uni- formes et permanents	37
5.2	Mesures existantes du transport sédimentaire et homogénéisation des écoule- ments	38
5.3	Développement d'une régression par processus gaussien et d'un algorithme ensembliste pour estimer le débit solide	39
CHAPITRE 6 THÉORIE SUR LES STATISTIQUES ET L'AUTO-APPRENTISSAGE		41
6.1	Tests statistiques	41
6.1.1	Test t des Students	41
6.1.2	Test de Levene	42
6.2	Théorie sur la régression par processus gaussien	42
6.3	Théorie sur les algorithmes ensemblistes	46
6.4	Validation croisée	48
CHAPITRE 7 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL DES MESURES DE TRANSPORT SOLIDE		50
7.1	Montage expérimental	50
7.2	Manipulations expérimentales	53

7.2.1	Manipulations expérimentales avant l'écoulement dans le canal	53
7.2.2	Manipulations expérimentales pendant l'écoulement dans le canal	55
7.2.3	Manipulations expérimentales après l'écoulement dans le canal	56
7.3	Domaine d'application expérimentale	56
CHAPITRE 8 MESURES EXISTANTES DU TRANSPORT SOLIDE ET HOMO-		
GÉNÉISATION DES ÉCOULEMENTS		58
8.1	Mesures de transport sédimentaires provenant de la littérature	60
8.1.1	Conditions hydrauliques	60
8.1.2	Conditions physiographiques	64
8.1.3	Paramètres significatifs adimensionnels du transport sédimentaire	66
8.2	Extraction des listes de données au comportement sédimentaire homogènes	67
8.2.1	Création des listes de données similaires d'un écoulement à l'étude	68
8.2.2	Tri des données	72
CHAPITRE 9 ESTIMATION DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS AVEC LA RÉ-		
GRESSION PAR PROCESSUS GAUSSIEN ET L'ALGORITHME ENSEMBLISTE		74
9.1	Régression par processus gaussien	76
9.1.1	Caractérisation de la RPG en transport sédimentaire	76
9.1.2	Analyse de sensibilité de la RPG	78
9.1.3	Calibration de la RPG	78
9.2	Algorithme ensembliste	79
9.2.1	Implémentation des équations de transport solide existantes.	79
9.2.2	Sélection des équations de transport solide pour l'algorithme ensembliste	83
9.2.3	Critères pour l'évaluation des performances des équations de transport solide existantes et des algorithmes développés	87
CHAPITRE 10 RÉSULTATS		89
10.1	Analyse de l'incertitude des expérimentations	89
10.1.1	Incertitudes sur les mesures du débit liquide	89
10.1.2	Incertitudes sur les mesures de l'élévation du sol	93
10.1.3	Incertitudes sur les mesures de la profondeur d'eau	97
10.1.4	Incertitude sur les mesures du débit solide	98
10.2	Résultats de la création des listes de données homogènes	101
10.2.1	Nombre de données	101
10.2.2	Similarité des données	104
10.3	Évaluation des performances des algorithmes	110

10.3.1	Analyse de sensibilité de la régression par processus gaussien	110
10.3.2	Validation de la performance des modèles	112
10.3.3	Évaluation des performances avec le critère de la racine de l'erreur quadratique moyenne	114
10.3.4	Évaluation des performances avec le critère la moyenne des rangs	119
10.3.5	Variation des rangs en fonction de la concentration	122
CHAPITRE 11 DISCUSSION ET CONCLUSION		124
11.1	Discussion	124
11.1.1	Analyse de l'incertitude du protocole expérimentale des mesures de transport solide	124
11.1.2	Mesures existantes du transport solide et homogénéisation des écoule- ments	127
11.1.3	Régression par processus gaussien et algorithme ensembliste pour l'es- timation du débit solide	128
11.2	Originalité et impacts	130
11.3	Limitations et perspectives	132
11.3.1	Montage expérimental	132
11.3.2	Extraction de liste de données homogènes	132
11.3.3	Algorithmes d'estimation du débit solide	133
11.3.4	Étude de cas	134
CHAPITRE 12 CONCLUSION		135
RÉFÉRENCES		137
ANNEXES		155

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Paramètres adimensionnels en transport des sédiments	12
Tableau 3.2	Tableau récapitulatif des domaines d'applications des équations de transport solide existantes en fonction du diamètre médian, de la vitesse d'écoulement, la profondeur d'eau et la pente longitudinale (Adapté de Acharya [1])	23
Tableau 3.3	Sources et nombre de données mesurées en conditions expérimentales	25
Tableau 3.4	Sources et nombre de données mesurées en conditions naturelles . . .	26
Tableau 3.5	Avantages et inconvénients des réseaux de neurones artificiels	29
Tableau 3.6	Avantages et inconvénients des régressions par processus gaussien . .	30
Tableau 3.7	Avantages et inconvénients des régressions par forêt aléatoire	31
Tableau 3.8	Avantages et inconvénients des algorithmes ensemblistes	32
Tableau 7.1	Frontières des conditions hydrauliques et sédimentaires du montage expérimental	57
Tableau 8.1	Conditions hydrauliques recueillies dans la littérature pour la conception d'une base de données pour l'estimation du débit solide	62
Tableau 8.2	Conditions physiographiques et sédimentaires recueillies dans la littérature	65
Tableau 8.3	Le domaine des paramètres adimensionnels significatifs du débit solide par charriage des données collecté dans la littérature	67
Tableau 8.4	Le nombre de données de mesure du transport sédimentaire en fonction des périodes de 20 ans	72
Tableau 9.1	Les différents paramètres utilisés pour les analyses de sensibilités reliés à la calibration de la régression par processus gaussien	78
Tableau 9.2	Liste d'équations de transport solide existantes utilisées pour l'algorithme ensembliste	81
Tableau 9.3	Les différentes valeurs du critère du p_{value} utilisées pour l'analyse de sensibilité dans l'optique d'investiguer l'homogénéité des estimations des équations de transport solide existantes	84
Tableau 9.4	Exemple du calcul de la moyenne des rangs pour cinq modèles hypothétiques	88

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Schéma d'une rivière a) Vue longitudinale b) Vue transversale	4
Figure 2.2	Exemple de courbes granulométrique pour du sable et gravier	8
Figure 3.1	Schéma des types de transports sédimentaires en rivière (Adapté de Wu [2])	15
Figure 3.2	Récapitulatif des tests comparatifs des équations de transport solide .	24
Figure 3.3	Schéma d'un réseau de neurones artificiel simple	28
Figure 5.1	La méthodologie générale du projet de recherche segmentée en sous-objectifs	36
Figure 5.2	Étapes du protocole expérimental et du traitement de données	37
Figure 5.3	Étapes pour l'extraction des listes de données homogènes	38
Figure 5.4	Schéma des étapes pour le développement de la régression par processus gaussien et l'algorithme ensembliste	39
Figure 6.1	Exemple d'une régression par processus gaussien en incluant la zone d'incertitude en fonction de la variable prédictive x	43
Figure 6.2	Illustration de l'amélioration des modèles individuels via un algorithme ensembliste sur un échantillon de 10 données	47
Figure 6.3	Exemple de l'utilisation de la validation croisée	49
Figure 7.1	Montage expérimental	51
Figure 7.2	Courbes granulométriques des matériaux sédimentaires	52
Figure 7.3	Étapes des manipulations expérimentales	53
Figure 7.4	La disposition du sable fin (a) Avant l'expérimentation (b) Après l'expérimentation	54
Figure 8.1	Schéma du processus d'extraction de liste de données homogènes pour le transport des sédiments	59
Figure 8.2	La variation de la température moyenne des rivières aux États-Unis en fonction des mois	63
Figure 8.3	Étapes de l'algorithme d'extraction des listes de données similaires pour un écoulement à l'étude	69
Figure 8.4	Exemple numérique de l'élargissement du domaine pour une valeur initiale du nombre de Froude de 0.75 pour l'extraction d'une liste de données similaires à un écoulement à l'étude	70

Figure 8.5	Exemple de l'application du test d'homogénéité de la moyenne et la variance pour différente taille de liste de données a) en considérant l'ensemble des données b) en considérant chaque groupe de nouvelles données ajoutées	71
Figure 9.1	Méthodologie pour la régression par processus gaussien et l'implémentation de l'algorithme ensembliste	75
Figure 9.2	Processus de pondération des équations de transport solide existantes pour l'utilisation de l'algorithme ensembliste	85
Figure 10.1	Variation du débit instantané en fonction du débit d'écoulement moyen	90
Figure 10.2	La fluctuation du débit liquide mesuré au début et à la fin de chaque expérimentation pour une période de deux minutes pour un sol en a) Gravier b) Sable grossier c) Sable fin	91
Figure 10.3	La disposition des capteurs de distance et l'influence des dunes sur la lecture du niveau du sol	94
Figure 10.4	La fluctuation de l'élévation du sol mesurée au début et à la fin de chaque expérimentation pour une période de une minute pour un sol en a) Gravier b) Sable grossier c) Sable fin	95
Figure 10.5	Différence de la hauteur d'eau par rapport à la moyenne en fonction de l'axe longitudinal du canal expérimental pour les différents types de sédiments	97
Figure 10.6	La fluctuation du débit solide mesurée pour une période de trois minutes pour un sol en a) Gravier b) Sable grossier c) Sable fin	99
Figure 10.7	La fonction de densité de probabilité et la fonction de densité cumulée du nombre de données composant les listes de données homogènes (a) avec élargissement (b) sans élargissement	102
Figure 10.8	La densité des données et la densité cumulée du nombre de données composant les listes de données homogènes en fonction des données du protocole expérimental	103
Figure 10.9	Nombre de mesures de la concentration sédimentaire des rivières qui se retrouve dans les plages d'incertitudes des listes de données similaires en fonction de la concentration en PPM	104
Figure 10.10	Fonction de densité cumulée des différences relatives des variables adimensionnelles mesurées et de la proportion du domaine de la liste des données similaires	105

Figure 10.11	Comparaison des limites minimales et maximales des listes de données homogènes en fonction des valeurs mesurées pour a) le nombre de Froude b) le débit unitaire adimensionnel c) paramètre des particules d) la puissance de courant unitaire e) le paramètre de vitesse adimensionnel e) la concentration	106
Figure 10.12	Analyse de sensibilité des points de départ des paramètres de calibration de la RPG en fonction de a) RSME b) moyenne des rangs	111
Figure 10.13	La concentration (PPM) estimée en fonction de la concentration mesurée pour a) l’algorithme ensembliste b) la régression par processus gaussien	113
Figure 10.14	RMSE des équations de transport solide existantes, de l’algorithme ensembliste et de la régression par processus gaussien pour la base de données de transport sédimentaire provenant de la littérature	115
Figure 10.15	L’erreur absolue des estimations du débit solide en fonction de la concentration mesurée pour l’algorithme ensembliste et l’équation de Meyer-Peter pour a) le domaine total de la concentration b) les concentrations inférieures à 1000 PPM	116
Figure 10.16	Le RMSE des équations de transport solide existantes, de la régression par processus gaussien et de l’algorithme ensembliste pour les expérimentations en laboratoire en fonction du a) Gravier b) Sable grossier c) Sable fin	118
Figure 10.17	La moyenne des rangs des équations de transport solide existantes et des modèles développés pour la base de données de transport sédimentaire provenant de la littérature	120
Figure 10.18	La moyenne des rangs des équations de transport solide existantes et des modèles développés pour les expérimentations en laboratoire en fonction du a) Gravier b) Sable grossier c) Sable fin	121
Figure 10.19	La moyenne des rangs des nouveaux modèles d’estimation et d’équations de transport solide existantes en fonction de la concentration (PPM) mesurée	123
Figure A.1	Entrants de l’outil de calcul	156
Figure A.2	Résultats des estimations du débit solide de l’outil de calcul	157
Figure A.3	Limites de la base de données extraites du cas d’application	158
Figure A.4	Message d’avertissement de l’outil de calcul	158

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Abréviations

1D	Unidimensionnel
AE	Algorithme ensembliste
ÉTS	Équation de transport solide
LOOCV	Validation croisée Leave-One-Out
MPM	Meyer-Peter et Müller
PIV	Vélocimétrie par images de particules
RMSE	Moyenne de la racine des résidus au carré
RNA	Réseau de neurones artificiel
RPG	Régression par processus gaussien
SO	Sous-objectif

Nomenclature **Chapitre 2**

A	Aire mouillée (m ²)
B	Largeur de la surface libre (m)
C	Concentration de sédiment (PPM)
C_{AE}	Concentration calculée par l'algorithme ensembliste (PPM)
C_i	Concentration de l'équation i (PPM)
C_t	Concentration totale de sédiment (PPM)
C_u	Coefficient d'uniformité (-)
d_{50}	Diamètre médian (m)
d_*	Diamètre médian adimensionnel (-)
D_h	Profondeur hydraulique (m)
D_x	Caractéristiques hydrauliques et physiographiques de l'échantillon d'entraînement
D_y	Concentrations mesurées de l'échantillon d'entraînement
F_r	Nombre de Froude (-)
g	Accélération gravitationnelle (m/s ²)
G_s	Densité spécifique des sédiments (-)
$g(x_i)$	La valeur de la régression pour les covariables de la mesure i
h	Profondeur d'eau (m)
H	Hauteur énergétique de l'écoulement (m)

i	Identifiant d'un paramètre (-)
i_{BW}	Pondération du type de sédiment (-)
n	Nombre de données de l'échantillon i
P	Périmètre mouillé (m)
q	Débit liquide unitaire (m^2/s)
q_b	Débit solide unitaire ($kg/s/m$)
q_{bw}	Débit solide pas charriage unitaire ($kg/s/m$)
Q	Débit (m^3/s)
Q_b	Débit solide par charriage (kg/s)
Q_s	Débit solide (kg/m^3)
Q_{sus}	Débit solide en suspension (kg/s)
Q_{Total}	Débit solide total (kg/s)
$Rapport_i$	Terme de calcul pour calculer la pondération
Re	Nombre de Reynolds (-)
R_h	Rayon hydraulique (m)
$RMSE_i$	Le RMSE pour l'équation i
s_p	Variance combinée
$s_{X_i}^2$	Biais de la variance de l'échantillon i
S	Densité spécifique des grains (-)
S_0	Pente longitudinale du canal (m/m)
S_{cr}	Pente longitudinale critique (m/m)
S_e	Pente énergétique (m/m)
S_f	Facteur de forme (-)
t	Paramètre de Student
T	Température ($^{\circ}C$ ou $^{\circ}K$)
U	Vitesse d'écoulement (m/s)
U_*	Vitesse de cisaillement (m/s)
U_{cr}	Vitesse d'écoulement critique (m/s)
V	Erreur de mesure représentée par $N(\nu; 0; \sigma_{\nu}^2)$
W	Paramètre de calibration (-)
W_i	Pondération de l'équation i
x	Axe longitudinal du canal (m)
x_i	Les covariables de la mesure i
\bar{x}_i	Moyenne des échantillons i
y	Élévation de la surface libre (m)
Y_i	La valeur mesurée de la donnée i

$\left(\frac{K_s}{K_r}\right) S$	Perte d'énergie due aux sédiments (-)
η	Rendement énergétique (-)
γ	Poids volumique de l'eau (N/m^2)
γ_s	Poids volumique des sédiments (N/m^2)
ν	Viscosité cinématique (m^2/s)
ω	Vitesse de chute des sédiments (m/s)
ϕ	Flux sédimentaires (-)
ϕ_b	Flux sédimentaire par charriage (-)
ϕ_*	Paramètre estimé de la méthode d'Einstein (-)
$\rho_{x,y}$	Dépendance entre deux paramètres (-)
τ	Contrainte de cisaillement (N/m^2)
τ_0	Contrainte de cisaillement moyenne (N/m^2)
τ_*	Contrainte de cisaillement adimensionnel (-)
τ_{cr}	Contrainte de cisaillement critique (N/m^2)
θ	Paramètre de mobilité des particules (-)
θ^*	Paramètres optimisés

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Utilisation de l'outil de calcul	155
----------	--	-----

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les inondations sont responsables de la majorité des catastrophes naturelles et une menace omniprésente touchant des millions de personnes chaque année. En 2011, 50% des catastrophes naturelles étaient des inondations, représentant 57,1% du nombre total de victimes des catastrophes naturelles à l'échelle mondiale [3]. Un exemple québécois est la crue naturelle de 2011 dans la région de la Montérégie, qui a entraîné l'évacuation de 1650 résidents, l'inondation de 2535 résidences et des dommages matériels estimés à 82 millions de dollars [4]. De plus, les inondations sont plus fréquentes en raison des changements climatiques [5].

Pour atténuer les conséquences des inondations, les ingénieurs utilisent des modèles hydrauliques pour identifier les zones potentiellement inondables. Ces modélisations sont généralement réalisées en supposant un lit de rivière fixe. Toutefois, il est reconnu que le lit d'une rivière varie dans le temps en raison du transport de sédiments provoqué par le frottement entre l'eau et le sol [2]. La modélisation à fond mobile consiste à intégrer la variation de l'élévation du lit de la rivière due à l'érosion ou à la sédimentation des sédiments. Cette modification de la morphologie permet d'obtenir une meilleure précision dans la modélisation des zones inondables. L'importance de l'inclusion du fond mobile est illustrée par la rupture de la digue sur la rivière Ha!Ha! en 1996, qui a fait passer la largeur de la rivière d'environ 10 mètres à 100 mètres en raison de l'érosion [6].

L'estimation du transport sédimentaire est une science marquée par de nombreuses incertitudes [7]. Aujourd'hui, il existe plus d'une centaine d'équations pour quantifier le transport solide [8]. L'un des principaux défis dans l'estimation du transport des sédiments réside dans le choix de l'équation appropriée en fonction des conditions hydrauliques, des paramètres physiographiques et des caractéristiques sédimentaires. Le grand nombre d'équations de transport solide s'explique par leurs limitations quant à leur domaine d'application. Par exemple, certaines équations comportent plusieurs versions adaptées à différents types de sédiments [9–11]. Ainsi, il est difficile de choisir la bonne équation pour une rivière spécifique, car de nombreuses équations présentent un chevauchement théorique dans leur domaine d'application. De plus, le lit d'une rivière peut être composé de plusieurs types de sédiments aux comportements variés [12].

Un défi supplémentaire dans l'utilisation des équations de transport solide réside dans la calibration basée sur des données empiriques. Le comportement hydraulique des rivières peut varier d'une rivière à une autre en fonction du régime d'écoulement. Par conséquent, il devient complexe de développer une équation de transport solide compatible avec différents

régimes d'écoulement.

L'objectif général de cette recherche est de développer un algorithme pour améliorer l'estimation du débit solide pour différentes conditions hydrauliques et physiographiques d'un écoulement à surface libre. Plus précisément, cet algorithme permet l'utilisation de la régression par processus gaussien et d'un algorithme ensembliste pour estimer le transport sédimentaire par charriage et total de matériaux non cohésifs. Cette recherche est divisée en trois parties distinctes.

- Collecter des mesures expérimentales de débit solide réalisées en laboratoire sur un régime d'écoulement quasi-uniforme et quasi-permanent, dans le but de valider l'algorithme développé (Chapitre 7).
- Créer une base de données des mesures de transport solide existantes dans la littérature, afin de générer des ensembles de données présentant des comportements hydrauliques et physiographiques homogènes (Chapitre 8).
- Développer une régression probabiliste et un algorithme ensembliste afin d'estimer le débit solide d'un écoulement à surface libre pour des sédiments non cohésifs (Chapitre 9).

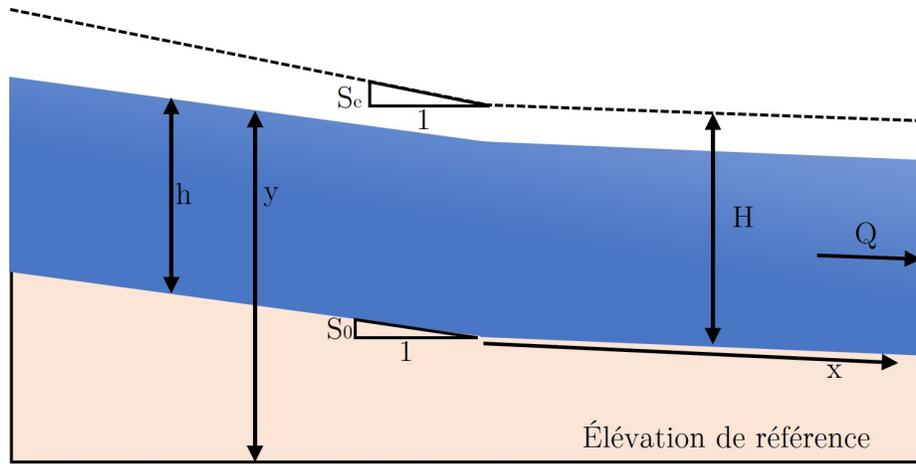
CHAPITRE 2 NOTIONS DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS NON-COHÉSIFS EN HYDRAULIQUE FLUVIALE

Le transport des sédiments repose sur l'interaction entre les phases liquide et solide d'un cours d'eau. Cependant, certaines simplifications sont nécessaires afin de rester dans un cadre de modélisation maîtrisé. Ce chapitre expose les bases théoriques des écoulements fluviaux, en abordant les propriétés physiques de l'eau et des sédiments.

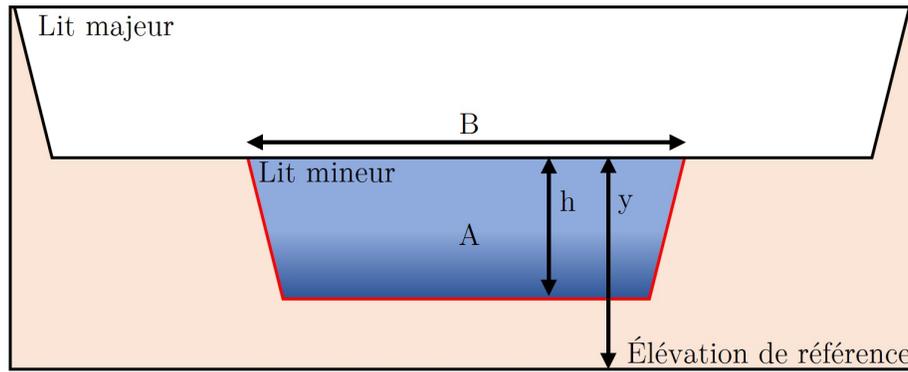
2.1 Comportement de la phase liquide

L'hydraulique des sédiments est une discipline qui étudie les interactions entre l'eau et les particules solides dans les cours d'eau. Elle s'appuie sur les principes fondamentaux de la mécanique des fluides et de la dynamique des particules pour quantifier ces phénomènes. Cette sous-section examine le comportement de la phase liquide et explore l'interaction entre les phases liquide et solide dans les rivières.

La phase liquide se réfère au comportement de l'eau dans un écoulement hydraulique. L'étude hydraulique d'un cours d'eau permet de calculer les forces exercées sur un volume de contrôle, telles que la pression, le frottement et les forces gravitationnelles. La Figure 2.1 illustre un écoulement unidimensionnel (1D) et met en évidence les variables hydrauliques utilisées pour quantifier la vitesse d'écoulement et la profondeur de l'eau, à l'aide d'une vue longitudinale et transversale d'une rivière. Pour décrire la largeur d'un cours d'eau, il est courant d'utiliser la largeur à la surface (B) [13]. Les variables présentées servent à décrire les aspects géométriques du comportement hydraulique des cours d'eau.



(a)



(b)

FIGURE 2.1 Schéma d'une rivière a) Vue longitudinale b) Vue transversale

Où

S_e = Pente énergétique (m/m)

h = Profondeur d'eau (m)

y = Élévation du niveau d'eau (m)

S_0 = Pente longitudinale (m/m)

x = l'axe d'écoulement unidimensionnel (m)

H = l'énergie spécifique de l'écoulement (m)

Q = Débit liquide (m^3/s)

B = Largeur à la surface (m)

A = Aire mouillée (m^2)

L'estimation du transport des sédiments est généralement calibrée pour des écoulements unidimensionnels en régime permanent. Par conséquent, cette section présente les hypothèses fondamentales formulées, l'équation de continuité, ainsi que certaines variables qui définissent le comportement hydraulique.

2.1.1 Hypothèses fondamentales

Plusieurs hypothèses sont formulées pour calculer le comportement hydraulique d'un cours d'eau. Barré de Saint-Venant a établi les hypothèses suivantes concernant un écoulement à surface libre, afin de déterminer la vitesse moyenne et la profondeur d'eau dans le cadre d'un écoulement non permanent et unidimensionnel [14].

- Eaux peu profondes : La profondeur d'eau doit être considérée faible en fonction des mouvements horizontaux.
- Équilibre hydrostatique : La vitesse verticale est faible en relation avec les vitesses horizontales et indépendantes de la hauteur.
- Incompressibilité : Le fluide est considéré incompressible, imposant une densité du fluide constante.
- Conditions aux limites : La vitesse d'écoulement est considérée nul au lit de la rivière et la pression de surface est équivalente à la pression externe.
- Pente faible : La pente longitudinale de la rivière est supposée faible, impliquant que le sinus de l'angle formé est égal à la tangente de l'angle ($\sin(\theta) \approx \tan(\theta)$).

2.1.2 Variables hydrauliques

Le comportement hydraulique d'un cours d'eau peut être décrit à l'aide de différentes variables, telles que la vitesse d'écoulement moyenne et la profondeur d'eau. Cependant, certaines de ces variables sont difficiles à mesurer et sont généralement calculées à l'aide d'équations empiriques.

Nombre de Froude

Le nombre de Froude est un paramètre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser l'écoulement d'un fluide. Il est défini comme le rapport entre la vitesse d'écoulement moyenne et la vitesse de propagation des ondes, permettant ainsi de comparer l'influence des forces d'inertie à celles de la gravité (Eq. 2.1).

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{g \cdot D_h}} \quad (2.1)$$

Où :

- F_r = Le nombre de Froude (-)
- U = Vitesse d'écoulement moyenne (m/s)
- g = Accélération gravitationnelle (m/s²)
- D_h = Profondeur hydraulique (m)

Prendre note que pour les canaux rectangulaires, la profondeur hydraulique est égale à la profondeur d'eau. L'interprétation du nombre de Froude est présenté ci-dessous.

- $F_r < 1$: L'écoulement est considéré fluvial. Ainsi la vitesse d'écoulement est relativement faible et l'énergie de l'écoulement est dirigée par la profondeur d'eau.
- $F_r = 1$: L'écoulement est considéré critique. La vitesse d'écoulement est égale à la vitesse de propagation de l'onde. L'énergie cinétique et l'énergie de pression sont équivalentes.
- $F_r > 1$: L'écoulement est considéré torrentiel. La vitesse d'écoulement est relativement élevée et l'énergie de l'écoulement est dirigée par la vitesse d'écoulement moyenne.

Contrainte de cisaillement

En hydraulique fluviale, la contrainte de cisaillement correspond à la force exercée par l'eau sur le lit et les parois de la rivière. Elle permet de comprendre et de modéliser l'érosion du lit fluvial ainsi que le transport des sédiments. Cette contrainte résulte du mouvement du fluide et de sa viscosité, générant des forces de frottement entre les couches de fluide et les surfaces solides. En régime uniforme, l'accélération de l'écoulement est considérée nulle. Ainsi, les forces gravitationnelles sont équilibrées par les forces de frottement. Partant de cette hypothèse, la contrainte de cisaillement moyenne exercée sur le lit de la rivière est calculée à l'aide de l'équation 2.2.

$$\tau_0 = \gamma R_h S_0 \quad (2.2)$$

Où :

- τ_0 = Contrainte de cisaillement moyenne (N/m²)
 γ = Poids volumique (N/m³)
 R_h = Rayon hydraulique (m)
 S_0 = Pente longitudinale du lit de la rivière (m/m)

Il est important de noter que l'équation 2.2 ne prend pas en compte la distribution des contraintes sur le lit de la rivière et suppose que celles-ci sont uniformes.

En utilisant la contrainte de cisaillement moyenne, il est possible de calculer la vitesse de cisaillement (u_*) à l'aide de l'équation 2.3.

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.3)$$

Où :

- U^* = Vitesse de cisaillement (m/s)
 ρ = Masse volumique (kg/m³)

Viscosité cinématique

La viscosité cinématique (ν) est définie comme le rapport entre la viscosité dynamique et la densité du fluide. En hydraulique fluviale, ce paramètre est difficile à mesurer directement, car il varie en fonction de la température du fluide. Pour pallier cette difficulté, Vogel (1926) a développé l'équation 2.4, qui permet d'estimer la viscosité cinématique en fonction de la température du fluide [15].

$$\nu = \frac{e^{-3.7188 + \left(\frac{579.919}{-137.546 + T}\right)}}{10^6} \quad (2.4)$$

Où :

- τ = Viscosité cinématique (m²/s)
 T = Température (K)

La viscosité cinématique peut varier en fonction de divers paramètres, tels que la concentration de sel [16]. Cependant, les cours d'eau naturels sont généralement constitués d'eau douce.

2.2 Propriétés des sédiments

Le transport sédimentaire est fortement influencé par les caractéristiques des sédiments présents dans les cours d'eau. Cette section aborde les propriétés permettant de définir les sédiments, telles que la taille, la forme, la masse volumique et la vitesse de chute.

2.2.1 Taille

La taille des sédiments est mesurée par une analyse granulométrique réalisée par tamisage, en faisant passer les sédiments à travers des tamis de différentes tailles. Cette méthode permet d'identifier le type de sédiments (ex. : argile, limon, sable, gravier, etc.). La figure 2.2 présente un exemple de courbe granulométrique.

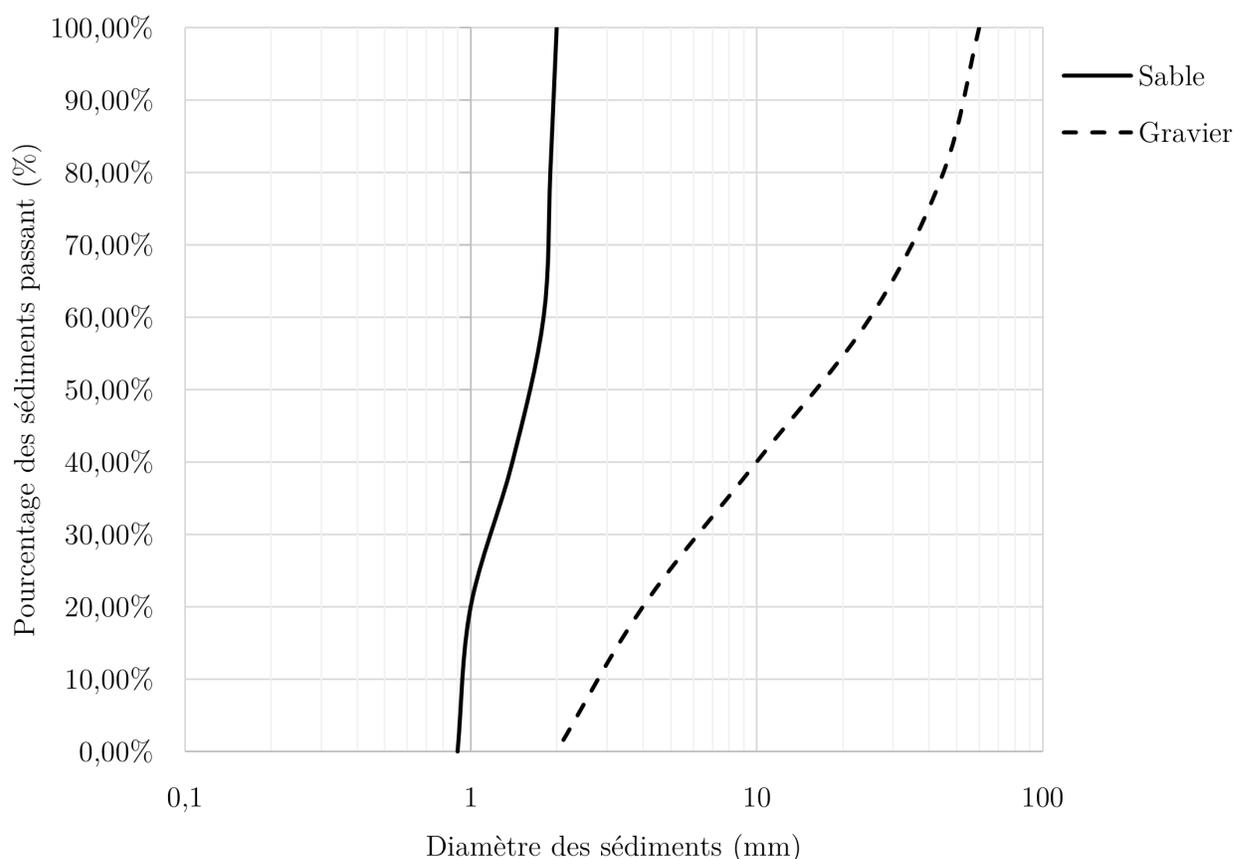


FIGURE 2.2 Exemple de courbes granulométrique pour du sable et gravier

La figure 2.2 illustre que les types de sédiments sont définis en fonction de la taille des particules. Étant donné que la taille des sédiments varie au sein d'un même sol, le diamètre

médian (d_{50}) est utilisé pour caractériser le type de sol. En raison de cette variabilité, un coefficient d'uniformité peut être calculé à l'aide de l'équation 2.5.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.5)$$

Plus le coefficient d'uniformité est faible, plus la taille des sédiments est homogène. Un sol peut être considéré uniforme lorsque C_u est inférieur à 4 [17].

2.2.2 Forme

La forme des sédiments influence leur comportement sédimentaire en raison du taux de contrainte exercée par le frottement de l'eau. Le facteur de forme peut être calculé à l'aide de l'équation 2.6.

$$S_f = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (2.6)$$

Où :

S_f = facteur de forme (-)

a = Dimension maximale (mm)

b = Dimension intermédiaire (mm)

c = Dimension minimale (mm)

Le facteur de forme permet d'évaluer la sphéricité d'une particule et, par conséquent, son interaction avec la résistance de l'eau. Plus le facteur de forme est élevé, plus la particule est considérée comme sphérique, entraînant une contrainte appliquée par l'eau plus faible. Ainsi, on observe des vitesses de chute plus élevées pour les particules sphériques en raison de la réduction de la résistance de l'eau sur le grain. Un facteur de forme de 0,7 est généralement supposé pour les sédiments en rivière lorsque ce paramètre est inconnu [18].

2.2.3 Masse volumique

La masse volumique des sédiments (ρ_s) est définie comme le rapport entre la masse des sédiments et leur volume (Eq. 2.7).

$$\rho_s = \frac{Masse}{Volume} \quad (2.7)$$

Où :

ρ_s = Masse volumique (kg/m^3)
Masse = Masse des sédiments (kg)
Volume = Volume des sédiments (m^3)

Plus la masse volumique est élevée, plus la contrainte de cisaillement nécessaire pour déplacer les sédiments doit être importante. Pour les sédiments en rivière, il est généralement admis d'utiliser une masse volumique de $2\,650 \text{ kg}/\text{m}^3$ lorsque la masse volumique est inconnue, car les matériaux transportés sont généralement constitués de quartz [18].

2.2.4 Vitesse de chute

La vitesse de chute des sédiments (ω) est définie comme la vitesse à laquelle une particule tombe à travers l'eau. Les paramètres influençant cette vitesse incluent généralement la taille des sédiments, le facteur de forme, la densité des particules et la viscosité du fluide. Le transport des sédiments par charriage est souvent associé aux particules ayant une vitesse de chute élevée [2]. Zhiyao a développé une équation empirique pour estimer la vitesse de chute des particules (Eq. 2.8) [19].

$$\omega = \frac{\nu}{50} d_*^3 \left(38.1 + 0.93 d_*^{\frac{12}{7}} \right)^{-\frac{7}{8}} \quad (2.8)$$

Où :

ω = Vitesse de chute des grains (m/s)
 ν = Viscosité cinématique (m^2/s)
 d_* = contrainte de cisaillement adimensionnelle (-)

CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE

Le transport sédimentaire est un phénomène complexe et sujet à plusieurs hypothèses simplificatrices dans l’optique de simplifier la caractérisation du comportement hydrosédimentaire. Les différents types de transport solide sont présentés en relation avec l’interaction entre la phase liquide et solide des écoulements fluviaux. D’une part, les équations existantes pour quantifier le débit solide en rivière ainsi que leurs limitations sont étudiées. D’autre part, les études reliant les conditions hydrauliques et physiographiques des écoulements au transport solide sont discutées. Puis, les comportements hydrosédimentaires sont caractérisés et un résumé de la majorité des données de transport des sédiments est présenté. Finalement, les algorithmes d’auto-apprentissage sont investigués dans le but de déterminer celles applicables à l’estimation du transport sédimentaire.

3.1 Analyse des paramètres adimensionnels reliés au transport sédimentaire

La compréhension des conditions hydrauliques et physiographiques est nécessaire pour la conception d’un modèle mathématique permettant d’estimer le débit solide. Cependant, les paramètres dimensionnels ne suffisent pas à appréhender pleinement le comportement des rivières [20]. La conversion des comportements d’écoulement en paramètres adimensionnels permet de travailler dans un domaine dimensionnel hétérogène [21].

3.1.1 Définition des paramètres adimensionnels

De nombreuses variables adimensionnelles ont été dérivées des paramètres hydrosédimentaires. Ces variables ont permis d’établir différentes relations entre le transport sédimentaire et le comportement hydraulique d’un cours d’eau. Par exemple, Shields a développé une relation entre la contrainte de cisaillement adimensionnelle (τ_*) et le diamètre adimensionnel des grains (d_*) [22]. Par la suite, Yalin a établi une relation entre le transport par charriage, le nombre de Reynolds (R_e) et le paramètre de mobilité des particules (θ) [23]. Il est possible de retrouver plusieurs équations de transport solide utilisant des paramètres adimensionnels tel que l’équation de Yang qui utilise la puissance de courant unitaire pour quantifier le débit solide [9]. Plusieurs auteurs ont utilisé l’analyse adimensionnelle [24–29] pour mieux comprendre le comportement hydrosédimentaire d’un cours d’eau. L’ensemble des paramètres adimensionnels relié au transport sédimentaire retrouvé dans la littérature sont résumés par Pektas [20] et présentés dans le tableau 3.1.

TABLEAU 3.1 – Paramètres adimensionnels en transport des sédiments

Paramètre	Terme	Variable
Profondeur d'eau adimensionnelle	$\frac{h}{d_{50}}$	h = Profondeur d'eau (m)
Nombre de Reynolds	$\frac{Uh}{\nu}$	U = Vitesse d'écoulement moyenne (m/s)
Nombre de Reynolds des sédiments	$\frac{U_* d_{50}}{\nu}$	d_{50} = Diamètre médian (m)
Contrainte de cisaillement adimensionnelle	$\frac{hS_0}{(S-1)d_{50}}$	ν = Viscosité cinématique (m^2/s)
facteur de frottement	$\frac{U}{U_*}$	U_* = Vitesse d'écoulement de cisaillement (m/s)
Rapport de largeur	$\frac{B}{h}$	S_0 = Pente moyenne longitudinale du canal (m/m)
Nombre de Froude	$\frac{q}{\sqrt{ghh}}$	S = Densité spécifique des sédiments (-)
Débit unitaire adimensionnel	$\frac{q}{U_* d_{50}}$	B = Largeur de la surface libre (m)
largeur de canal adimensionnelle	$\frac{B}{d_{50}}$	q = Débit liquide unitaire (m^2/s)
Rugosité relative	$\frac{R_h}{d_{50}}$	g = Constante gravitationnelle (m/s^2)
Paramètres des particules	$\left[\frac{g(S-1)}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} d_{50}$	ω = Vitesse de chute des sédiments (m/s)

TABLEAU 3.1 – Paramètres adimensionnels en transport des sédiments (suite)

Paramètre	Terme	Variable
Paramètre des particules 2	$\frac{\nu U_*}{g(S-1)d_{50}^2}$	$R_h =$ Rayon hydraulique (m)
Paramètre des particules 3	$\frac{q^2}{g(S-1)d_{50}^3}$	
Puissance de courant unitaire 2	$\frac{US_0}{\sqrt{gd_{50}}}$	
Nombre de Froude des sédiments	$\frac{U}{\sqrt{g(S-1)d_{50}}}$	
Paramètre des particules 4	$\frac{1}{g(S-1)d_{50}^3 \nu^2}$	
Puissance de courant unitaire	$\frac{US}{\omega}$	
Paramètre des sédiments en suspension	$\frac{\omega}{U_*}$	
Nombre de Reynolds des particules	$\frac{\omega d_{50}}{\nu}$	
Paramètre de vitesse	$\frac{U^3}{gh\omega}$	

3.1.2 Sensibilité des paramètres adimensionnels

Des analyses de sensibilité ont été menées afin de définir les paramètres adimensionnels significatifs du débit solide [26, 28, 29]. Cette approche permet de mieux comprendre l'interaction entre les différents paramètres et leur impact sur le transport sédimentaire [20]. L'ANOVA, l'analyse de sensibilité univariée et multivariée, ainsi que la méthode de Monte-Carlo sont des tests d'analyse de sensibilité régulièrement utilisés [30]. Plusieurs auteurs ont cherché à

identifier les différents paramètres adimensionnels significatifs en raison du comportement hydrosédimentaire complexe des rivières. Pektas a appliqué quatre tests de sensibilité différents pour déterminer les paramètres significatifs [20].

- L'analyse par groupement (Cluster analysis)
- L'analyse des composantes principales (Principal component analysis)
- L'analyse de régressions multiples (Multiple regression analysis)
- L'analyse de sensibilité pour les réseaux de neurones (Sensitivity analysis for neural network)

Ces tests concluent que le nombre de Froude, le débit unitaire adimensionnel, le paramètre des particules, la puissance du courant unitaire et le paramètre de vélocité sont des paramètres significatifs. Ceux-ci sont présentés dans l'équation 3.1 :

$$\phi_B = f \left(\frac{q}{\sqrt{gh}h}, \frac{q}{U_*d_{50}}, \frac{\nu U_*}{g(S-1)d_{50}^2}, \frac{US}{\omega}, \frac{U^3}{gh\omega} \right) \quad (3.1)$$

Où :

ϕ_b = Flux sédimentaire par charriage (PPM ou kg/s)

3.2 Interaction entre la phase liquide et solide

L'interaction entre la phase liquide et solide d'un écoulement fait référence au phénomène d'échange entre le mouvement de l'eau et des sédiments du lit de la rivière. Dans un cours d'eau, la phase liquide entraîne le déplacement des particules solides, principalement en raison des forces de frottement et de turbulence [18]. Les différents phénomènes résultant de cette interaction sont présentés ci-dessous [2].

1. Transport solide : Les sédiments sont transportés par l'eau en état de suspension ou par charriage sur le fond du lit de la rivière. Ce transport sédimentaire est principalement causé par les forces de frottement et de turbulence de la phase liquide. Il est directement lié à la capacité de transport des sédiments. Les caractéristiques des sédiments, telles que leur taille, influencent les pertes de charge de la phase liquide, impactant la vitesse d'écoulement et la profondeur d'eau [31].
2. Érosion et sédimentation : La physiographie d'une rivière varie le long de son axe longitudinal, causant des variations dans le comportement hydraulique. Ces variations influencent la capacité de transport sédimentaire et peuvent entraîner des phénomènes d'érosion ou de sédimentation sur le lit de la rivière [18]. Par exemple, des dépôts de

sédiments sont observés en amont des barrages [32]. L'érosion et la sédimentation des matériaux dans un cours d'eau causent une modification de la morphologie de la rivière.

La Figure 3.1 présente les différents types de transport sédimentaire en fonction de la taille des sédiments et de leur élévation dans la rivière [2]. Celle-ci illustre que la présence de particules très fines entraîne un transport par suspension appelé "Washload" [11]. Ce type de transport est caractérisé par une répartition homogène de la concentration des sédiments sur la profondeur d'eau. Le débit solide par charriage est composé de sédiments transportés au niveau du lit de la rivière. Ces sédiments sont généralement plus grossiers, impliquant une vitesse de chute plus élevée [33]. Le transport solide en suspension est caractérisé par le transport sédimentaire dans l'eau, sans contact direct avec le lit du cours d'eau.

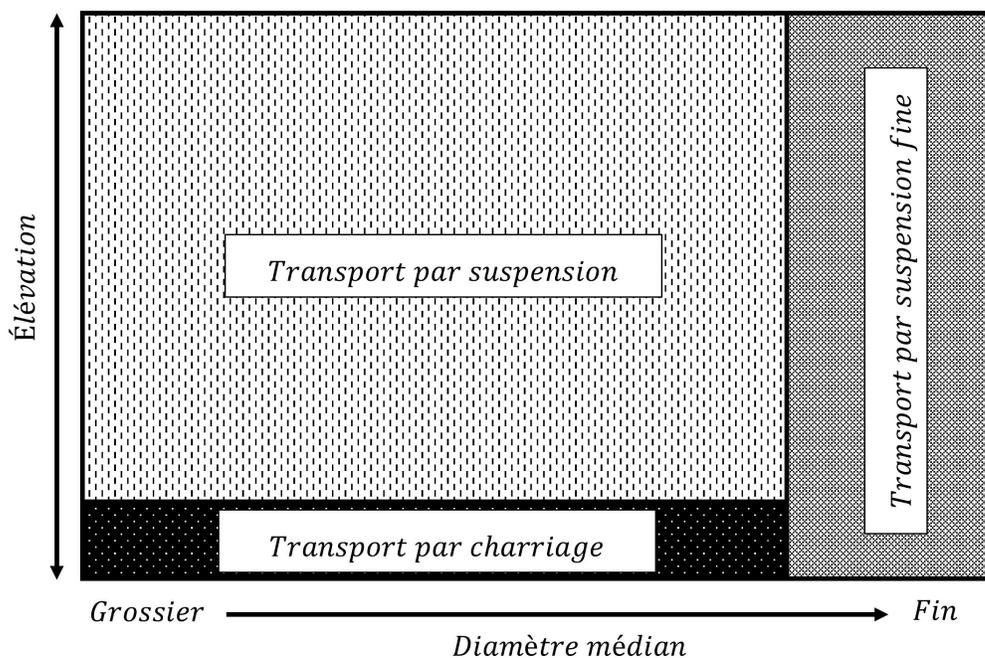


FIGURE 3.1 Schéma des types de transports sédimentaires en rivière (Adapté de Wu [2])

Des recherches basées sur ces catégories de transport des sédiments ont été menées pour quantifier la capacité de transport des sédiments dans un cours d'eau en utilisant la concentration volumique des sédiments dans l'écoulement [34]. De cette théorie, deux approches ont été étudiées pour calculer la capacité de transport des sédiments en rivière.

1. Poser que le débit solide total est la somme du transport solide par charriage et par suspension [18].

$$Q_{total} = Q_{suspension} + Q_{charriage} \quad (3.2)$$

2. Calculer le débit solide totale en considérant le transport sédimentaire comme étant une seule phase [9].

3.2.1 Types de débit solide

Débit solide par charriage

Les premières équations empiriques pour le transport des sédiments ont principalement été développées pour le transport par charriage en raison de la simplicité de la mesure du débit solide. Plusieurs de ces équations ont été développées avant les années 1950 par des chercheurs tels que Duboys [35], Shields [22], Kalinske [36], Meyer-Peter [37], Meyer-Peter et Müller [38], Schoklitsch [39, 40], Einstein [41] et Brown [42]. En raison de données de calibration ou d'hypothèses simplificatrices, ces équations sont limitées à des domaines d'application restreints [43]. Par conséquent, différentes modifications ont été proposées pour étendre leur domaine d'application. Par exemple, Smart [44] a modifié l'équation de Meyer-Peter & Müller pour des écoulements avec une pente longitudinale prononcée.

Ces équations sont couramment utilisées de nos jours. À titre d'exemple, l'équation développée par Meyer-Peter et Müller [38] est intégrée dans certains logiciels de modélisation hydrosédimentaire tels que Telemac et SRH-2D. Des études sur les limites de leur domaine d'application continuent d'être menées [45].

Débit solide par suspension

Le transport des sédiments par suspension se produit lorsque les forces de turbulence sont suffisamment fortes pour soulever les sédiments et les maintenir en suspension [2]. Leur déplacement est situé sur l'ensemble de la profondeur d'eau. Le débit solide causé par le transport en suspension représente généralement 75% à 95% du débit solide total des rivières [18]. Cette valeur peut diminuer pour des sédiments grossiers [2].

Les premiers auteurs à aborder cette problématique sont Lane et Kalinske [46], Einstein [47], Brooks [48] et Chang, Simons et Richardson [49]. Plusieurs études ont montré des limites quant à l'application de ces équations. C'est pourquoi, encore aujourd'hui, certains auteurs développent des régressions pour estimer le débit solide par suspension à partir des données mesuré en rivière [50].

3.2.2 Débit solide total

Le calcul de la concentration totale du débit solide considère le transport sédimentaire comme une seule phase. Le transport sédimentaire est ainsi défini comme étant la concentration totale de sédiments dans l'eau.

La concentration est une variable adimensionnelle et permet une meilleure flexibilité lors du développement des équations de transport solide total [20]. À partir des années 1950, plusieurs équations de transport sédimentaire ont été développées en adoptant cette approche (Laursen [51], Toffaleti [52], Engelund et Hansen [53], Ackers et White [54], Yang [11, 55, 56], Brownlie [57], Madden [58]). Ces équations sont limitées dans leur domaine d'application, et des révisions ont été apportées pour ajuster les équations en fonction de différents comportements hydrauliques et physiographiques [59].

De nombreuses régressions ont été développées à partir de ces théories, permettant de calculer directement les débits solides en fonction des caractéristiques hydrauliques et physiographique du cours d'eau [8].

3.3 Les équations de transport solide existantes

Plus d'une centaine d'équations de transport solide ont été développées pour calculer le débit solide ou la concentration volumique des sédiments en rivière [8]. Cette sous-section présente les théories physiques utilisées pour développer les équations de transport solide existantes, la variabilité des domaines d'application de ces équations, ainsi que différentes évaluations de leurs performances.

3.3.1 Différentes approches physiques

L'abondance des équations de transport solide s'explique par la difficulté à comprendre avec précision le phénomène naturel du transport des sédiments causé par l'écoulement d'un cours d'eau [7]. Au cours du siècle dernier, les ingénieurs civils ont exploré plusieurs approches pour quantifier le débit solide, parmi lesquelles inclut la contrainte de cisaillement, l'approche probabiliste, la pente énergétique et la puissance de courant. Cette sous-section présente ces approches pour le développement des équations de transport solide.

L'approche de la contrainte de cisaillement

L'approche de la contrainte de cisaillement pour calculer le débit solide est directement liée à l'équation de la quantité de mouvement. L'une des stratégies populaires pour développer

des équations de transport solide consiste à utiliser la contrainte de cisaillement adimensionnelle (τ_*) afin d'élargir le domaine d'application [22]. Cette approche permet de définir une relation entre le débit solide et la différence entre la contrainte de cisaillement appliquée et la contrainte de cisaillement critique ($Q_s \propto \tau - \tau_{cr}$). L'équation 3.3 présente le calcul de la contrainte de cisaillement moyenne exercée sur le lit d'une rivière [34].

$$\tau_0 = \gamma R_h S_e \quad (3.3)$$

Où :

- τ_0 = Contrainte de cisaillement moyenne (N/m^2)
- γ = Poids volumique de l'eau (N/m^3)
- R_h = Rayon hydraulique du cours d'eau (m)
- S_e = Pente énergétique de l'écoulement (m/m)

Cette approche d'estimation du débit solide ne prend pas en compte certains paramètres hydrauliques tels que la vitesse d'écoulement de l'eau. Chang, Simons et Richardson, ont étudié cette approche pour développer une équation de transport solide utilisant l'approche de la contrainte de cisaillement [49]. L'équation 3.4 développée par Shields utilise l'approche de la contrainte de cisaillement pour estimer le débit solide par charriage d'un cours d'eau [22].

$$q_b = 10 \frac{\tau - \tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma) d'} \frac{q \gamma S}{\gamma_s} \quad (3.4)$$

Où :

- q_b = Débit solide unitaire (kg/s)
- τ = Contrainte de cisaillement (N/m^2)
- τ_{cr} = Contrainte de cisaillement causant la mise en mouvement des sédiments (N/m^2)
- γ_s = Poids volumique des grains (N/m^3)
- γ = Poids volumique de l'eau (N/m^3)
- S = Densité volumique des grains (-)

L'approche probabiliste

Einstein a utilisé l'approche probabiliste pour quantifier l'incertitude du comportement sédimentaire d'une rivière à l'aide d'une probabilité 3.5. Ainsi, certaines hypothèses sont posées pour estimer le débit solide avec cette approche [41, 47] :

1. Il y a un échange constant de particules entre le matériau composant le lit de la rivière et le transport solide.
2. Les sédiments effectuent des bonds sur le lit de la rivière. La distance des bonds moyenne étant d'environ 100 fois le diamètre du grain.
3. La déposition et l'érosion des sédiments dépendent de la probabilité qu'une interaction entre les forces hydrodynamiques et les propriétés des grains permettent à un sédiment de s'éroder ou de se déposer.

Ces hypothèses simplifient la compréhension du transport sédimentaire en caractérisant la complexité du phénomène, telle que les forces de turbulence, par des valeurs probabilistes ($0 < p < 1$). Toutefois, la présence d'hypothèses limite le domaine d'application de l'équation. Par exemple, il est supposé qu'un sédiment de 5 cm effectue des bonds de 5 m, car les sédiments se déplacent à une distance proportionnelle à leur diamètre. L'équation 3.5 développée par Einstein utilise l'approche probabiliste pour estimer le débit solide par charriage d'un cours d'eau [47].

$$i_{BW}q_{bw} = \phi_* i_{bw} \rho_s g \left(\frac{\rho}{(\rho_s - \rho) g d_{50}^3} \right)^{(-1/2)} \quad (3.5)$$

Où :

- i_{BW} = Pondération du type de sédiment (-)
- q_{bw} = Débit solide unitaire (kg/s/m)
- ϕ_* = Paramètre estimé de la méthode d'Einstein (-)
- ρ_s = Masse volumique des grains (kg/m^3)
- ρ = Masse volumique de l'eau (kg/m^3)
- g = Accélération gravitationnelle (m/s^2)
- d_{50} = Diamètre médian des grains (m)

Plusieurs auteurs ont modifié l'équation d'Einstein pour accommoder ces hypothèses [52, 60, 61]. En raison des modifications apportées, cette approche est régulièrement utilisée de nos jours pour modéliser le fond mobile des rivières [62].

L'approche de la pente énergétique

L'approche de la pente énergétique est la plus populaire dans le domaine du transport sédimentaire. Meyer-Peter a développé une relation entre le débit solide par charriage et la pente énergétique pour estimer le débit solide [37]. Les modifications apportées par Müller

ont popularisé cette approche [38]. Elle consiste à relier la capacité de transport sédimentaire à une portion de l'énergie totale perdue en raison de la résistance des sédiments.

Cette approche est régulièrement utilisée comme donnée de référence pour comparer la performance des équations de transport solide. Par exemple, Beilicci et Beilicci ont inclus l'équation dans une étude comparative des modèles hydrosédimentaires [63]. L'équation 3.6, développée par Meyer-Peter et Müller, utilise l'approche de la pente énergétique pour estimer le débit solide par charriage d'un cours d'eau [38].

$$q_b = \left(\frac{\gamma \left(\frac{K_s}{K_r} \right)^{3/2} R_h S_e - 0.047(\gamma_s - \gamma) d_{50}}{0.25 \rho^{1/3}} \right)^{3/2} \quad (3.6)$$

Où :

q_b	= Débit solide unitaire (tonne/s/m)
γ	= Poids volumique de l'eau (tonne/ m^3)
γ_s	= Poids volumique des grains (tonne/ m^3)
K_s	= Perte de charge par les grains (-)
K_r	= perte de charge du système (-)
$\left(\frac{K_s}{K_r} \right) S_e$	= Perte d'énergie du aux sédiments (-)
S_e	= Pente énergétique (m/m)
d_{50}	= Diamètre médian (m)
ρ	= Masse volumique spécifique de l'eau (tonne/ m^4)
R_h	= Rayon hydraulique (m)

Plusieurs limitations de l'équation ont été reconnues. Par exemple, Smart a modifié l'équation pour augmenter le domaine d'application sur des pentes fortes [44]. De plus, une erreur mathématique a été constatée lors de la calibration de l'équation avec les données originales et a été corrigée en 2006 [64].

L'approche de la puissance de courant

L'approche de la puissance de courant est basée sur le concept de minimisation de l'énergie [65]. Le principe met en évidence qu'un écoulement déplace les sédiments pour minimiser les pertes de charge par frottements. La puissance de courant est utilisée pour calculer la concentration totale de sédiments en mouvement dans l'eau [7,53,54]. Cette approche exprime donc l'efficacité de l'écoulement à travers l'équation de la puissance de courant, donnée par l'équation 3.7.

$$\eta = \frac{\text{Perte de charge}}{\text{Énergie totale}} \quad (3.7)$$

Elle est limitée par l'hypothèse de l'équilibre dynamique, qui suppose que le débit solide est en équilibre avec la force de cisaillement de l'eau, ce qui n'est pas toujours vérifié en milieu naturel [66]. De plus, une variante de cette méthode consiste à transformer la puissance de courant en une variable adimensionnelle [55]. Ainsi, la concentration de sédiments dans l'eau est proportionnelle au taux de dissipation d'énergie par unité de poids de l'eau.

Plusieurs équations ont subi des ajustements au fil du temps, telles que la recalibration de l'équation de Yang [55, 56] sur un diamètre médian plus grossier. De plus, l'équation d'Ackers et White a été révisée en 1990 avec différentes données de calibration [59]. L'équation 3.8, développée par Yang, utilise l'approche de la puissance de courant pour estimer la concentration totale de sédiment dans un cours d'eau [55].

$$\log(C) = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{\omega} + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{\omega} \right) \log \left(\frac{US}{\omega} - \frac{U_{cr}S}{\omega} \right) \quad (3.8)$$

Où :

- C = Concentration (PPM)
- ω = Vitesse de chute des sédiments (m/s)
- d_{50} = diamètre médian (m)
- ν = Viscosité cinématique (m^2/s)
- U_* = Vitesse de cisaillement (m/s)
- U = Vitesse d'écoulement (m/s)
- U_{cr} = Vitesse d'écoulement critique
- S = Pente longitudinale (m/m)
- S_{cr} = Pente longitudinale critique (m/m)

3.3.2 Domaine d'application des équations de transport solide

Les sections précédentes ont révélé que le nombre d'équations et les méthodes de développement pour estimer le débit solide en rivière varient considérablement. Cette diversité résulte

en partie des différentes approches physiques utilisées pour élaborer des équations de transport solide. De plus, plusieurs équations sont le produit de modifications apportées à des équations préexistantes [58]. Ces modifications ont tendance à améliorer l'équation en élargissant le domaine d'application et en modifiant les données de calibration. Ainsi, il est difficile de discréditer une équation, car elles sont applicables pour des conditions hydrauliques, physiographiques et sédimentaires spécifiques.

Acharya a réalisé un résumé des domaines d'application pour un large éventail d'équations de transport solide [1]. Une adaptation de ce résumé est présentée au tableau 3.2 [7, 9, 10, 47, 49, 53–55, 57, 59, 66–86]. Prendre note que plusieurs équations de transport solide sont absentes du tableau. Étant donné que certaines équations ont des domaines d'application superposés, il est également difficile de déterminer quelle équation choisir pour la modélisation à fond mobile. Ainsi, il est indispensable d'étudier la performance des équations de transport solide existantes.

TABLEAU 3.2 Tableau récapitulatif des domaines d'applications des équations de transport solide existantes en fonction du diamètre médian, de la vitesse d'écoulement, la profondeur d'eau et la pente longitudinale (Adapté de Acharya [1])

Équation	$d_{50}(mm)$	$U (\frac{m}{s})$	h (m)	Pente ($S_0 \times 1000$)
Ackers et White (1973)	0.040-7.00	0.021-2.164	0.003-0.427	0.060-37.000
Bagnold (1966)	0.120-200.000	0.244-2.134	0.091-2.287	12.400-25.800
Bishop et al. (1965)	0.190-0.930	0.200-1.897	0.030-0.405	0.055-19.280
Brownlie (1981)	0.062-76.000	0.008-3.719	0.009-17.282	0.002-36.700
Brownlie (1983)	0.062-76.000	0.008-3.719	0.009-17.282	0.0021-36.700
Chang et al (1965)	0.19-0.93	0.091-0.305	0.019-0.488	8 1.000-15.000
Colby (1964)	0.100-0.800	0.030-3.049	0.030-30.488	0.010-18.000
Colby-Hembree (1955)	0.031-28.600	0.268-2.220	0.108-2.134	12.400-25.800
Copeland-Laursen (1989)	0.011-290.000	0.009-1.097	NA	0.250-25.000
Egelund-Hansen (1967)	0.19-0.93	0.198-1.933	0.058-0.405	0.055-0.019
Egiazaroff (1965)	0.050-20.000	NA	NA	0.900-11.000
Einstein (1950)	0.06-8.00	0.020-0.063	0.152-3.049	1.000-1.050
Graf et al. (1968)	0.010-30.000	0.198-2.134	0.091-0.400	0.500-1.000
Graf et al. (1987)	0.010-28.000	0.152-2.350	0.065-0.500	0.300-1.900
HR Wallingford (1990)	0.040-7.000	0.021-2.165	0.003-0.427	0.060-37.000
Karim-Kennedy (1981)	0.13-28.65	0.300-2.700	0.030-5.900	0.080-24.300
Maddock (1976)	0.001-100.000	0.622-0.878	0.183-0.200	0.600-3.200
Molinas-Wu (2001)	0.090-1.300	0.230-1.670	0.056-1.496	0.930-12.700
Moore-Burch (1986)	0.100-10.000	0.183-2.134	0.010-16.250	1.000-40.000
RangaRaju et al. (1981)	0.007-9.856	0.126-2.500	0.017-10.000	0.090-16.000
Rottner (1959)	0.150-7.000	0.198-2.546	0.003-14.924	0.060-30.568
Tofaletti (1969)	0.062-4.000	0.213-2.378	0.021-17.287	0.140-19.000
Vanoni-Raudkivi (1975,1976)	0.19-0.93	0.198-1.933	0.058-0.405	0.055-19.000
Velikanov (1954)	0.033-3.250	0.150-2.845	0.010-4.635	0.010-32.500
Vittal et al. (1973)	0.009-12.652	0.091-4.350	0.020-11.260	0.080-18.735
Wu et al. (2000)	0.010-128.000	0.140-2.800	0.030-4.400	0.110-16.200
Yang (1972)	0.150-7.000	0.243-1.951	0.012-15.244	0.043-29.000
Yang (1979)	0.062-2.000	0.230-1.970	0.010-15.198	0.043-27.900
Yang (1984)	3.170-7.010	0.221-1.549	0.009-0.226	0.120-13.400
Yang et al. (1996)	0.007-0.091	0.260-5.470	0.509-11.290	0.010-0.100
Yang-Lim (2003)	0.400-7.650	0.150-0.733	0.020-0.220	0.500-1.000

3.3.3 Évaluation des équations existantes

Une question régulièrement adressée en hydraulique sédimentaire est : quelle équation de transport des sédiments doit-on choisir pour notre projet [87] ? Par exemple, l'équation d'Inglis-Lacey [88] quantifie adéquatement le débit solide de la rivière Colorado. Cependant, pour une rivière ayant une pente énergétique et un diamètre médian des sédiments similaires, comme la rivière Niobrara, cette équation surestime grandement l'érosion [87].

Afin de mieux comprendre les limites de chaque équation de transport solide développée, plusieurs auteurs ont étudié leur applicabilité en les comparant sur des canaux présentant des conditions hydrauliques et physiographiques différentes. La figure 3.2 présente les résultats des études comparatives d'équations de transport solide [8, 89–102].

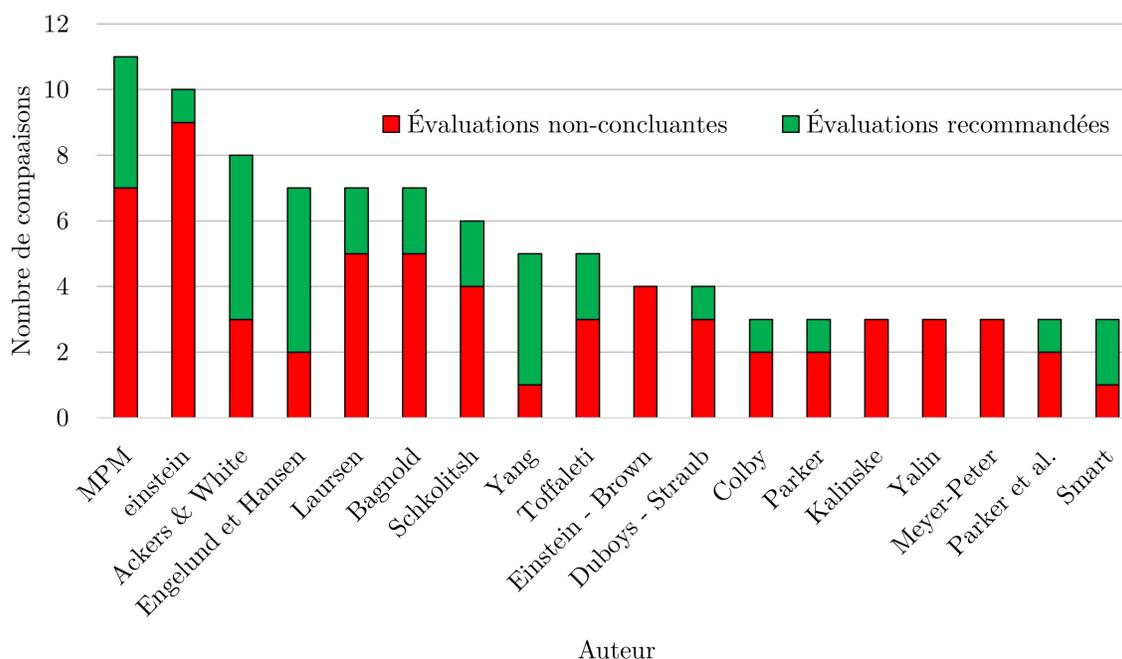


FIGURE 3.2 Récapitulatif des tests comparatifs des équations de transport solide

La figure 3.2 met en évidence qu'aucune équation ne fait l'unanimité dans l'estimation du débit solide. Par exemple, certaines équations, telles que celle de Smart, sont spécialisées pour des écoulements à forte pente [44].

3.4 Traitement de base de données en transport sédimentaire

La section suivante présente une revue de la littérature concernant les mesures des conditions hydrauliques, physiographiques et sédimentaires, des écoulements naturels et expérimentaux. Une base de données complète des mesures de transport sédimentaire permet d'améliorer les modèles d'estimations du débit solide en raison d'une meilleure calibration. Cette synthèse des données provient d'expérimentations [38, 44, 51, 103–107, 107–153] et de mesures sur le terrain [13, 52, 81, 154–172]. Les tableaux 3.3 et 3.4 permettent d'identifier les données hydro-sédimentaires disponibles pour l'estimation du débit solide. Il est possible de trouver un plus large éventail de données, cependant elles ne possèdent pas toutes les caractéristiques hydrauliques, physiographiques et sédimentaires nécessaires pour être utilisées dans la calibration ou la validation des équations de transport solide. Un total de 11 463 données est recensé dans la littérature. Certaines sources, telles que Hinton, regroupent différentes données de terrain mesurées depuis les années 1980 [13].

TABLEAU 3.3 – Sources et nombre de données mesurées en conditions expérimentales

Source	# données	Source	# données
ABDEL-AAL, F.M (1969)	10	BARTON, J.R AND LIN, P.N (1955)	28
GOUVERNMENT OF W. BENGAL (1965)	18	BOGARDI, J AND YEN, C H. (1939)	48
VANONI V.A AND BROOKS, N.H. (1957)	21	CASEY, H.J (1935)	92
CHYN, S.D. (1935)	32	COSTELLO, W.R. (1974)	28
DAVIES, T.R. (1971)	79	EINSTEIN AND CHIEN (1955)	16
PAK WAT AND POWER DEV. AUT. (1967)	68	GOUVT EST PAKISTAN (1966,68,69)	56
FOLEY, M. (1975)	12	FRANCO, J.J. (1968)	19
GIBBS, C.H. et NEIL, C.R. (1972)	9	GILBERT, G.K. (1914)	889
GILBERT G,K, ENERGY SLOPE (1914)	125	GILBERT, G.K. UNIFORM (1914)	62
GUY, SIMONS, RICHARDSON (1966)	339	HILL, SRINIVASAN, UNNY (1969)	46
PANG YUNG (1939)	80	JORISSEN, A.L (1939)	26
KALINSKE et HSIA (1945)	9	KALKANIS, G. (1957)	23
KENNEDY, J.F (1961)	41	KENNEDY ET BROOKS (1965)	9
LAURSEN, E.M. (1958)	24	MAVIE, LIU, SOUCEK	293
MACDOUGAL, C.H. (1933)	74	MEYER-PETER ET MÜLLER (1948)	135
MTTUER, D.G. (1971)	28	NEIL, C.R. (1967)	51
NOMICOSI (1957)	30	NORDIN, C.D., JR (1976)	62

TABLEAU 3.3 – Sources et nombre de données mesurées en conditions expérimentales (suite)

Source	# données	Source	# données
OBIREN, MÉPÉ (1936)	83	ONISHI, JAIN et KENNEDY (1972)	14
PAINTAL, A,A (1971)	96	PRATT, C.J (1970)	60
RECKING (2008)	80	RICKENMANN (2013)	46
SATO, KIKKAWA, ASHIDA (1958)	243	SINGH, B. (1960)	305
SMART (1984)	71	SONI, J.P (1980)	23
STEIN, R.A (1965)	56	STRAUB, L.G. (1954,58)	24
TAYLOR, B.D (1971)	39	VANONI ET BROOKS (1957)	15
VANONI ET HWANG (1967)	16	WILLIS, J.C. (1979)	32
WILLIAMS, G.P. (1970)	177	WILLIS, COLEMAN, ELLIS (1972)	96
WATER EXPERT STATION (1935A)	330	WATER EXPERT STATION (1936A)	101
WATER EXPERT STATION (1936C)	165	WATER EXPERT STATION (1936B)	312
WATER EXPERT STATION (1935B)	23	ZNAMENSKAYA (1983)	36

TABLEAU 3.4 – Sources et nombre de données mesurées en conditions naturelles

Source	# données	Source	# données
HINTON, (2017)	4276	WILLIAMS ET ROSGEN (1989)	177
MAHMOOD ET AL (1979)	151	SIMONS, D.B. (1957)	11
TOFFALETI, F.B (1968)	72	CHITALE, S.V. (1966)	32
COLORADO RIVER USBR (1958)	66	HII RIV SHINOHARA TSUBAKI (1959)	105
LEO RIVER LEOPOLD, L.B. (1969)	38	MIDDLE LOUP HUBEEL MA-TEJKA (1959)	55
MISSISSIPI TOFFALETI, F.B. (1968)	38	SHEN, MELLEMA, HARRISON (1978)	165
EINSTEIN, H.A (1944)	100	SOUTHAMERICAN RIVER NE-DECO (1973)	113
COLBY, HEMBREE (1955)	40	ELBOW, SAMIDE (1971)	55
MILHOUS, R.T. (1973)	17	CA CUNHA, L.V. (1969)	219
RED RIVER TOFFALETI (1968)	30	CULBERTSON, SCOTT, BEN-NETT (1976)	27
NORDIN, BEVERAGE (1965)	292	RIO GRANDE TOFFALETI (1968)	38
SEITZ, H.R. (1976)	17	KNOTT, K.M. (1974)	4

La date de mesure des données est un paramètre important pour évaluer leur qualité. Certaines données expérimentales, telles que Gilbert, ont plus de 100 ans et des erreurs de mesure doivent être prises en compte lors de leur utilisation [117]. Ainsi, la fiabilité des données doit être vérifiée lors de l'utilisation de données pour la calibration d'une équation de transport solide. L'utilisation de mesure terrain est préférable pour modéliser de manière plus précise les phénomènes hydrosédimentaires, en tenant compte de la variabilité inhérente à la physiographie des rivières [173]. L'importance de la qualité des données pour développer un modèle de régression est segmentée en 3 parties énumérées ci-dessous [14].

1. Précision des résultats : L'utilisation de données de haute qualité lors de la calibration d'une équation de transport solide contribue à obtenir des résultats plus précis et fiables.
2. Représentativité du système : Les données jouent un rôle essentiel pour capturer le comportement du système, notamment les conditions hydrauliques, les propriétés physiographiques et les caractéristiques sédimentaires.
3. Validation du modèle : Pour obtenir des résultats fiables, il est essentiel d'utiliser des données appropriées et de qualité lors de la phase de validation.

En résumé, la prise en compte de la temporalité des données, l'utilisation de sources fiables et la préférence pour les mesures terrain contribuent à améliorer la qualité de la calibration d'une équation de transport solide. En connaissance des données accessibles, il est possible d'investiguer les méthodes d'auto-apprentissages existantes dans le transport sédimentaire.

3.5 Auto-apprentissage dans le transport sédimentaire

Cette sous-section examine la possibilité d'appliquer les notions fondamentales de l'apprentissage automatique, également appelé "Machine Learning", dans le domaine de l'hydraulique des sédiments. Une régression consiste à estimer une variable de sortie en connaissant les co-variables d'une observation [174]. Il existe plusieurs méthodes de régression possibles pour estimer la réponse d'un système. Parmi les méthodes de régression populaires utilisées dans le contexte du transport sédimentaire, les réseaux de neurones, la régression par processus gaussien, les forêts aléatoires et l'algorithme d'ensemble sont investigués [1, 175–177].

3.5.1 Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des algorithmes populaires en apprentissage automatique. Ils permettent de simuler des phénomènes complexes et non linéaires à l'aide

d'une grande base de données. Ils peuvent donc être adaptés aux problèmes de prédiction dans des systèmes complexes tels que l'hydraulique des sédiments [26, 175, 178]. Pour mieux comprendre le concept des RNA, la figure 3.3 présente un schéma d'un RNA avec deux couches de profondeurs.

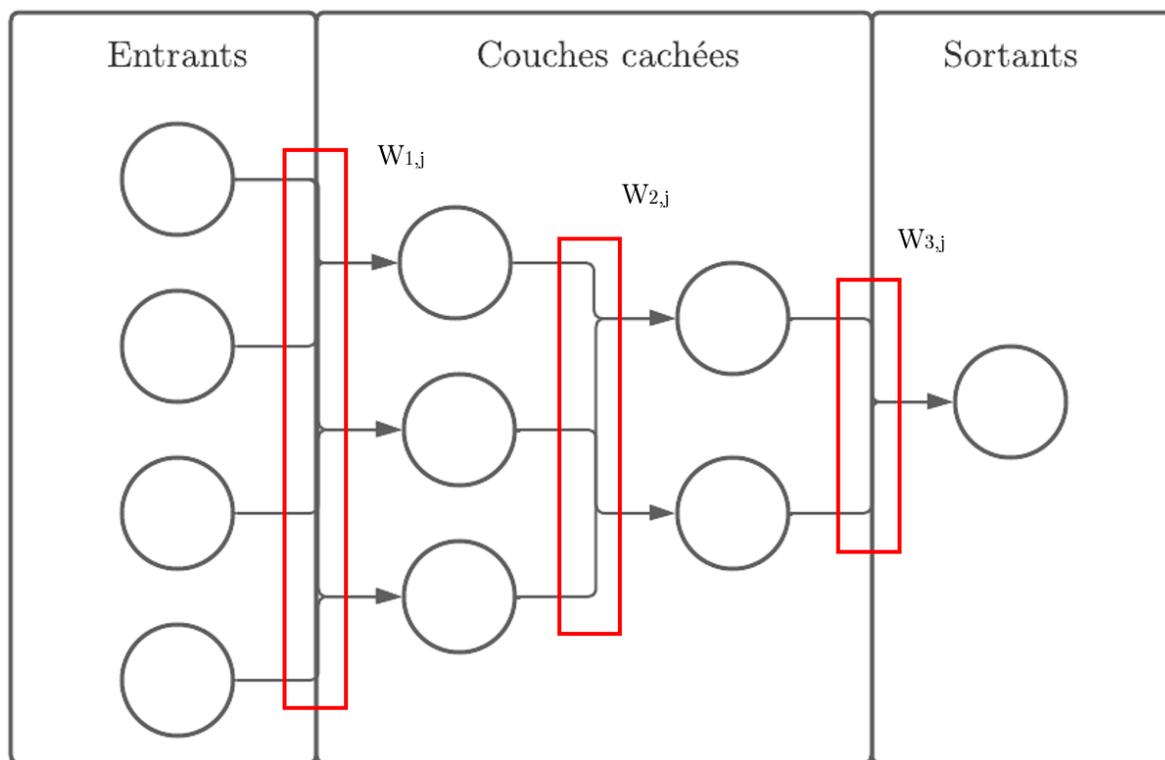


FIGURE 3.3 Schéma d'un réseau de neurones artificiel simple

W = Paramètres à calibrer

i = L'identifiant du paramètre pour la couche en question

La figure 3.3 montre que les entrants sont connectés à des paramètres intermédiaires situés dans les couches cachées. Chaque lien entre les paramètres doit être calibré pour développer un modèle de réseaux de neurones artificiels performants. Les performances d'un RNA sont souvent proportionnelles aux nombres de couches, à condition d'éviter le surapprentissage. L'ajout de profondeur augmente la complexité et la difficulté de la calibration en raison du grand nombre de paramètres à calibrer, ce qui nécessite une grande base de données pour utiliser ce type de régression [179]. Le tableau 3.5 présente les avantages et les inconvénients de ces réseaux de neurones.

TABLEAU 3.5 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones artificiels

Avantages	Inconvénients
L'état de l'art pour les régressions avec beaucoup de données.	Un grand nombre de données est nécessaire pour obtenir une précision adéquate.
Peuvent avoir la meilleure précision des différentes régressions.	Le temps nécessaire pour entraîner un modèle peut être très long
Ils sont capables de capturer des relations complexes et non linéaires entre les variables.	Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont souvent qualifiés de "boîtes noires", ce qui rend leur interprétation difficile

En se référant au tableau 3.5, le nombre limité de données disponibles dans le domaine de l'hydraulique des sédiments constitue souvent une contrainte majeure pour exploiter pleinement le potentiel de cette méthode de régression. Malgré tout, les réseaux de neurones ont souvent été utilisés pour estimer le débit solide en rivière [8, 28, 180–183].

Dans le contexte du transport des sédiments, les bases de données sont généralement restreintes à quelques milliers d'observations, ce qui rend l'utilisation de cette méthode plus difficile. Malgré le nombre de données dans le domaine du transport sédimentaire, cette approche continue à être étudiée.

3.5.2 Régression par processus gaussien

La régression par processus gaussien (RPG) estime les sortants d'un système de manière stochastique. Le principe de cette régression est de supposer que la similarité des covariables prédictives se traduit par une similarité de la variable estimée. En hydraulique des sédiments, cette méthode de régression présente l'avantage d'être peu sensible aux valeurs aberrantes, puisque la méthode de la minimisation de la fonction de vraisemblance est moins punitive pour les données éloignées que les calibrations basées sur les résidus aux carrés. De plus, son temps de calcul est faible [184]. Étant donné que la RPG est une régression stochastique, une fonction de densité de probabilité est requise. La loi normale est couramment utilisée, car elle permet une dépendance symétrique ($\rho(x_1, x_2) = \rho(x_2, x_1)$) [179]. Cependant, différentes fonctions de densité de probabilité symétriques peuvent être utilisées pour ajuster une RPG [185].

La présence d'erreurs de mesure peut être attendue puisque plusieurs bases de données de la littérature ont été construites avant les années 1980. Toutefois, la régression par processus

gaussien tient compte des erreurs de mesure lors de sa calibration en utilisant le principe de superposition, tel que présenté dans l'équation 3.9 [186].

$$Y_i = g(x_i) + V \quad (3.9)$$

Où :

Y_i = La valeur mesurée de la donnée i

i = L'identifiant d'une mesure

$g(x_i)$ = La valeur de la régression pour les covariables de la mesure i

x_i = Les covariables de la mesure i

V = Erreur de mesure représentée par $N(\nu; 0; \sigma_\nu^2)$

La RPG à une meilleure précision pour un domaine dans lequel le nombre d'observations est élevé [179]. De plus, pour les domaines présentant un faible nombre d'observations, il est possible d'estimer le débit solide en utilisant des connaissances a priori définies par une moyenne fixe ou variable. Le tableau 3.6 présente les avantages et les inconvénients de la RPG.

TABLEAU 3.6 Avantages et inconvénients des régressions par processus gaussien

Avantages	Inconvénients
Rapidité et simplicité de calibration.	La RPG couvre uniquement les phénomènes déterministes.
Certains modèles de RPG permettent de traiter l'hétéroscédasticité, c'est-à-dire la distribution non uniforme des erreurs.	La RPG dépend de la fonction de la moyenne à priori (qui peut être une régression déterministe) ainsi que de la fonction de covariance choisie.
La longueur de dépendance informe l'utilisateur sur la dépendance entre les covariables et la variable estimée.	L'optimisation des paramètres de la RPG dépend du point de départ et peut se limiter à un maximum local.
Ils fonctionnent bien avec des ensembles de données de petite taille.	La dépendance entre chaque covariable prédictive est fixe sur l'ensemble du domaine d'application.

Par rapport au tableau 3.6, la RPG offre la possibilité de combiner les équations de transport solide présentement développées dans la littérature en les incluant dans les connaissances a

priori. Ainsi, il est possible de pallier certaines faiblesses de ces équations telles que l'hétéroscédasticité.

La RPG est utilisée pour déterminer le début de la mise en mouvement des sédiments [187] et pour estimer le débit solide total [184]. La flexibilité et la capacité d'un modèle de RPG à résoudre des problèmes non linéaires et complexes rendent cette approche intéressante pour l'estimation du débit solide [176]. L'utilisation de la RPG en programmation est facilitée par la disponibilité de divers modules complets à source ouverte dans des logiciels de calcul tels que MATLAB [188].

3.5.3 Forêt aléatoire

La régression par forêt aléatoire est une méthode largement utilisée pour la classification et a été appliquée à l'évaluation des risques de glissement de terrain [189] et d'inondations [190]. Différents auteurs ont exploré l'utilisation d'une forêt aléatoire pour estimer le transport sédimentaire en suspension et par charriage en rivière [177, 191]. Cette méthode s'est avérée peu concluante en raison de la surestimation du débit solide. Le tableau 3.7 présente les avantages et les inconvénients de l'algorithme de forêt aléatoire pour l'estimation du débit solide.

TABLEAU 3.7 Avantages et inconvénients des régressions par forêt aléatoire

Avantages	Inconvénients
Utiliser pour interpoler et extrapoler les valeurs.	Meilleur pour la classification puisque cette méthode n'assure pas de continuité dans les valeurs prédites.
S'adapte facilement aux grandes bases de données.	Peut avoir une présence de surapprentissage lorsque les bases de données varient considérablement.
Temps de calcul très faible en raison de sa nature de décisions binaires.	Les forêts aléatoires peuvent être biaisées lorsqu'elles sont appliquées à des ensembles de données avec des classes ou des résultats déséquilibrés.
Les forêts aléatoires sont résistantes au surapprentissage, ce qui en fait un modèle stable et performant.	Le processus d'entraînement et le processus de prédiction nécessitent plus de mémoire et de puissance de calcul.

L'inconvénient majeur de la forêt aléatoire dans le domaine de l'hydraulique des sédiments réside dans son caractère principalement axé sur la classification. De plus, son biais aux données déséquilibrées peut concentrer les estimations vers les valeurs plus fréquentes.

3.5.4 Algorithme ensembliste

En transport des sédiments, plusieurs hypothèses sont posées pour estimer le débit solide. Par exemple, plusieurs équations de transport solide supposent un régime d'écoulement uniforme et permanent. L'approche ensembliste permet de combiner l'ensemble des modèles existants afin de pallier ces hypothèses inhérentes à chaque équation.

La performance de cette méthode est améliorée par une grande diversité de modèles existants [192–194]. Acharya a pondéré une trentaine d'équations de débit solide en utilisant un algorithme de Monte-Carlo pour estimer la déposition autour des digues [1]. Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients de l'algorithme ensembliste.

TABLEAU 3.8 Avantages et inconvénients des algorithmes ensemblistes

Avantages	Inconvénients
La performance de l'estimation est améliorée par la diversité des modèles utilisés.	Nécessite une grande diversité de modèles disponibles.
Permet de combiner différentes hypothèses afin de former une estimation plus adéquate.	La performance de l'algorithme est directement reliée à la performance des modèles utilisés.
Permet de combiner les différentes approches physiques du transport des sédiments.	Les algorithmes d'ensemble sont souvent plus complexes à comprendre, à mettre en œuvre et à interpréter que les modèles individuels.
Peut être utilisé pour combiner les domaines d'application des équations.	Certains algorithmes de pondération peuvent demander un temps de calcul important
L'algorithme ensembliste est plus robuste et moins sensible au surapprentissage puisqu'il agrège les erreurs des modèles individuels.	

Telle que présentée dans le tableau 3.8, cette approche est pertinente en transport des sédi-

ments en raison du grand nombre d'équations existantes pour estimer le débit solide. Ainsi, les prérequis nécessaires à l'utilisation de cet algorithme sont satisfaits. Il est possible de les combiner en un domaine d'application général compte tenu de la problématique des domaines d'application variables propres à chaque équation.

CHAPITRE 4 SYNTHÈSE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

4.1 Synthèse de la revue de littérature

La revue de littérature souligne l'utilisation fréquente de deux méthodes pour le calcul du débit solide. La première méthode consiste à évaluer séparément le transport par charriage et le transport en suspension, puis à les additionner pour obtenir le débit solide total ($Q_{\text{tot}} = Q_b + Q_{\text{sus}}$). La deuxième approche permet de calculer directement le débit solide total à partir de la concentration totale.

L'analyse adimensionnelle joue un rôle crucial dans le transport sédimentaire, car elle permet de caractériser les comportements hydrauliques, physiographiques et sédimentaires en utilisant un nombre réduit de variables prédictives. Pour le transport par charriage, cinq paramètres adimensionnels sont généralement utilisés : le nombre de Froude, le débit unitaire adimensionnel, le paramètre des particules, la puissance de courant unitaire et le paramètre de vitesse adimensionnelle. Ces cinq paramètres peuvent être employés pour harmoniser les bases de données hétérogènes issues de la littérature.

Différentes approches physiques ont été utilisées pour développer les équations de transport solide. Les méthodes les plus couramment employées sont les suivantes :

- La contrainte de cisaillement
- L'approche probabiliste
- La pente énergétique
- La puissance de courant

Chaque équation possède un domaine d'application spécifique, car elles sont calibrées à partir de différents ensembles de données. De nombreuses études visant à évaluer la performance des équations de transport solide montrent qu'aucune d'entre elles ne fait l'unanimité pour estimer avec précision le débit solide en rivière.

Un total de 58 bases de données expérimentales et 24 bases de données de terrain sont regroupées pour constituer une base de données comprenant 11 463 mesures de débits solides. Il convient de noter que certaines de ces données remontent à plus d'un siècle et peuvent présenter des incertitudes de mesure. Il est donc essentiel de prendre en compte cette limitation lors de la calibration des modèles.

Avec les avancées des outils de calcul, de nouveaux algorithmes d'estimation basés sur l'apprentissage automatique sont désormais disponibles. La régression par processus gaussien et

les algorithmes ensemblistes semblent être des méthodes appropriées pour estimer le transport sédimentaire. Ces deux approches présentent des avantages en raison de la quantité limitée de données mesurées disponibles dans la littérature sur le transport sédimentaire et de la diversité des modèles existants. Ainsi, les problématiques majeures dans le domaine de l'estimation du débit solide sont énumérées ci-dessous :

1. Il est difficile de choisir quel modèle d'estimation du débit solide choisir en raison du grand nombre d'équations disponibles et de leur diversité.
2. Chaque équation de transport solide possède un domaine d'application limité par les données utilisées lors de leur calibration.
3. Les variables utilisées pour la calibration des régressions empiriques sont dimensionnelles. Par conséquent, certaines équations sont calibrées avec des comportements hydrauliques et physiographiques hétérogènes, ce qui limite leur performance.
4. La littérature contient quelques milliers de données sur le transport solide, majoritairement concentré pour des débits solides faibles, ce qui restreint la représentation de l'ensemble des comportements hydrauliques existants.

4.2 Objectifs

L'objectif général de cette recherche est de développer un algorithme intégrant la régression par processus gaussien et un algorithme ensembliste pour estimer le transport sédimentaire par charriage de matériaux non cohésifs, en fonction des conditions hydrauliques, physiographiques et sédimentaires des rivières. Cet objectif sera atteint à travers quatre objectifs spécifiques.

1. Mesurer des débits solides expérimentalement sur un régime d'écoulement quasi-uniforme et quasi-permanent
2. Évaluer les performances des équations de transport solide existantes à l'aide de listes de données avec des comportements sédimentaires similaires aux données retrouvées dans la littérature
3. Concevoir et valider une régression par processus gaussien et un algorithme ensembliste en utilisant les équations de transport solide existantes pour un écoulement à surface libre étudié.
4. Comparer les performances des modèles développées aux équations de transport solide existantes.

CHAPITRE 5 APPROCHE ET MÉTHODE SCIENTIFIQUE

L'amélioration des estimations du transport des sédiments par régression par processus gaussien et algorithme ensembliste se fait en plusieurs étapes distinctes. La figure 5.1 présente la méthodologie générale pour répondre à l'objectif de recherche dans le cadre de ce projet.

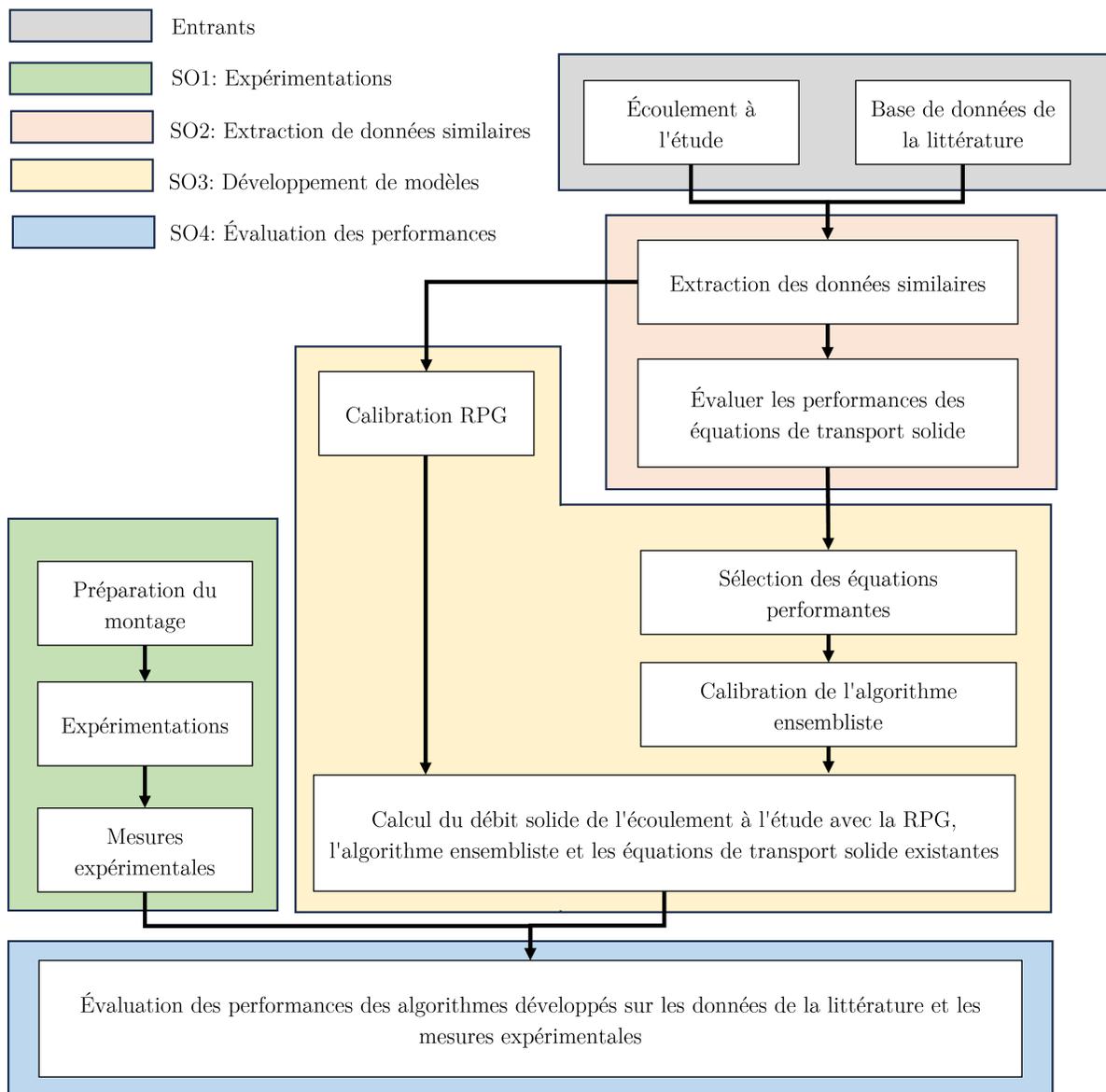


FIGURE 5.1 La méthodologie générale du projet de recherche segmentée en sous-objectifs

Le chapitre suivant détaille la méthodologie présentée à la figure 5.1 pour obtenir les mesures expérimentales du débit solide dans des écoulements quasi-uniformes et quasi-permanents

(SO1), l'extraction d'une liste de données similaires pour un écoulement donné (SO2) et le développement de l'algorithme décisionnel et la régression par processus gaussien (SO3 et SO4).

5.1 Protocole expérimental des mesures de débit solide pour des écoulements uniformes et permanents

Le premier thème abordé est le protocole expérimental et le traitement des données des expérimentations pour la collecte de données de confiance servant à la validation des modèles d'estimations du débit solide. La figure 5.2 présente les étapes principales des expérimentations de transport des sédiments en écoulement quasi-uniforme et quasi-permanent.

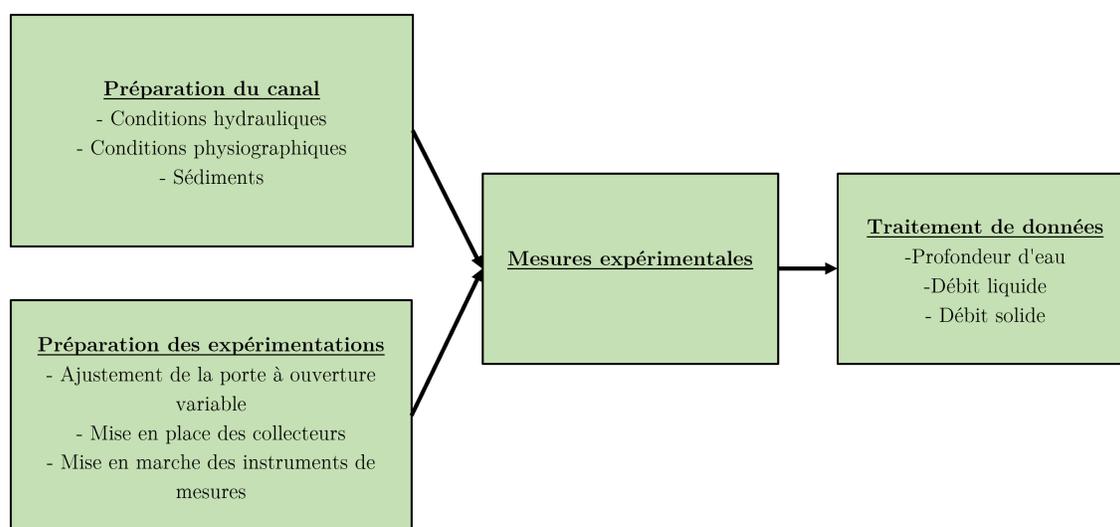


FIGURE 5.2 Étapes du protocole expérimental et du traitement de données

La première étape est scindée en deux manipulations en parallèles : la préparation du canal et la préparation des expérimentations (Fig. 5.2). La préparation du canal consiste à définir les conditions hydrauliques et physiographiques prévues ainsi que les sédiments utilisés. Cette étape permet de planifier le nombre total d'expérimentations, la durée de la période expérimentale ainsi que définir les limites du montage expérimental.

La préparation des expérimentations est l'ensemble des manipulations préliminaires avant la prise de données dans le canal. Cette étape consiste à uniformiser la couche de sédiments, préparer la hauteur d'eau et le débit dans le canal, ainsi que toutes autres manipulations nécessaires pour assurer des conditions expérimentales constantes et reproductibles.

Les mesures expérimentales sont prises lors des manipulations et de la période de post-

collecte. Cette étape est la plus importante pour assurer la répétitivité des mesures, puisqu'elle est en lien direct avec la manipulation des sédiments en mouvement. Lorsque les sédiments sont séchés et pesés, les masses sont mesurées et définies à l'aide d'une moyenne et d'un écart-type. Cette partie permet de relier les conditions hydrauliques et physiographiques du canal au transport des sédiments et ainsi utiliser les données expérimentales dans la validation des algorithmes développés.

5.2 Mesures existantes du transport sédimentaire et homogénéisation des écoulements

Le deuxième thème abordé est la collecte de données dans le domaine du transport des sédiments et l'extraction de liste de données homogène pour différents comportements hydrauliques. La figure 5.3 est un schéma de la conception de listes de données homogènes.

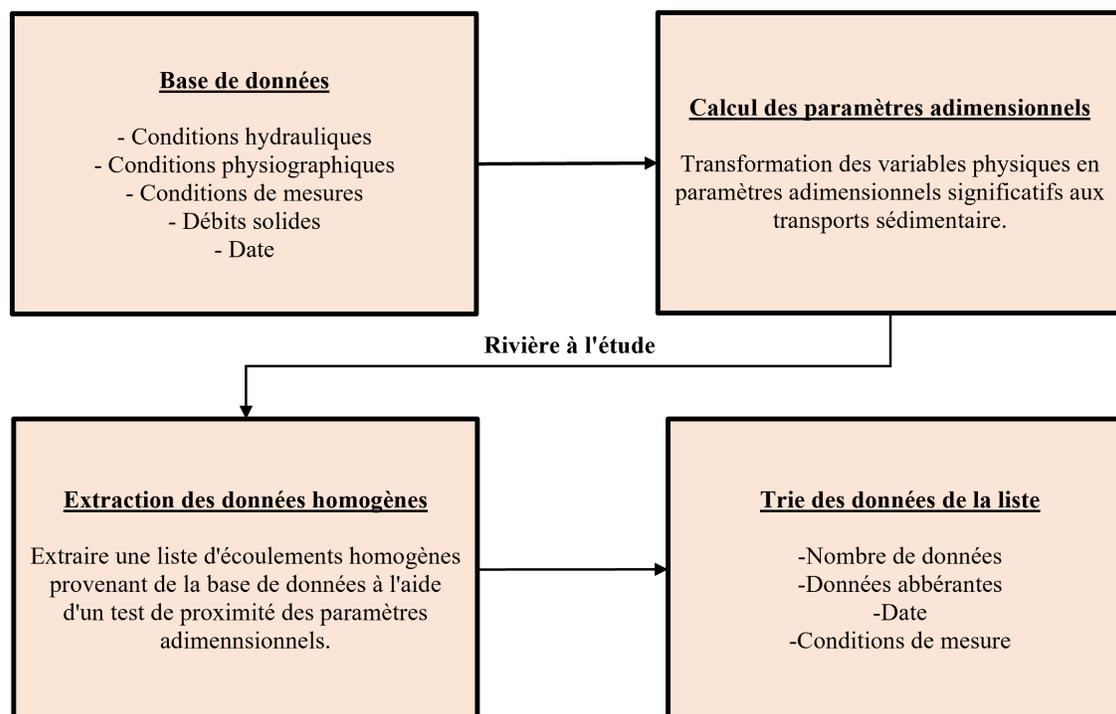


FIGURE 5.3 Étapes pour l'extraction des listes de données homogènes

La figure 5.3 montre que chaque donnée doit avoir un certain nombre de paramètres pour définir les conditions hydrauliques (Ex. débit, vitesse d'écoulement, profondeur d'eau), les conditions physiographiques (Ex. pente longitudinale, diamètre médian), les conditions de mesure (naturel ou expérimental) et la date de collecte de la donnée.

Différentes analyses de sensibilité permettent d'établir les paramètres les plus significatifs pour la caractérisation du transport solide. Les analyses de sensibilité sont effectuées sur les paramètres adimensionnels. Ceci permet d'uniformiser la base de données pour l'ensemble des équations. Une liste de données avec des comportements hydrosédimentaires homogènes d'un écoulement à l'étude est extraite en collectant différentes données dont les paramètres adimensionnels sont similaires.

La liste de données homogène peut contenir certaines données non désirables. Par conséquent, un tri des données est effectué pour déterminer le nombre adéquat de données, retirer les données aberrantes, éliminer les mesures prises avant certaines années et avoir des conditions de mesure similaires (naturelles ou expérimentales).

5.3 Développement d'une régression par processus gaussien et d'un algorithme ensembliste pour estimer le débit solide

Le dernier thème est le développement d'un algorithme ensembliste en utilisant les équations de transport solide existantes et le développement d'une régression par processus gaussien (RPG). Après avoir acquis les données expérimentales et retrouvées dans la littérature, il est possible de faire la calibration des algorithmes pour estimer le débit solide dans un cours d'eau. La figure 5.4 montre le schéma du développement des modèles d'estimations du débit solide.

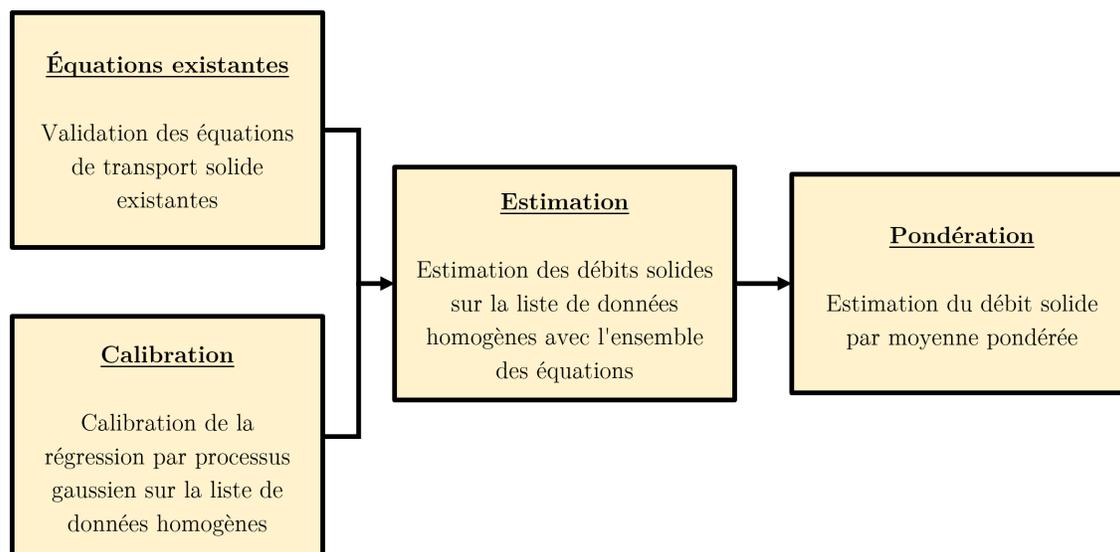


FIGURE 5.4 Schéma des étapes pour le développement de la régression par processus gaussien et l'algorithme ensembliste

Il est essentiel de valider les équations de transport solide existantes à l'aide d'un cas d'application bien documenté et résolu, afin de vérifier l'exactitude de leur programmation. Cette étape garantit que la calibration du modèle mathématique ne compense pas une éventuelle erreur de calcul.

La régression par processus gaussien est calibrée en s'appuyant sur un ensemble de données présentant des caractéristiques similaires à celles de l'écoulement étudié. Comme cette méthode repose sur une longueur de dépendance difficile à calibrer dans un environnement hétéroscédastique, l'utilisation de données homogènes simplifie la calibration et réduit le temps de calcul.

Ensuite, le débit solide est estimé pour chaque donnée de la liste de données homogènes à l'aide de l'ensemble des équations de transport solide. En comparant les débits solides estimés avec les valeurs mesurées, il est possible d'évaluer la précision de ces équations pour le cours d'eau étudié. Les équations sont ensuite classées en fonction de leurs performances respectives sur le comportement hydraulique observé. Ce classement permet d'identifier clairement quelle équation est la plus adaptée pour estimer le débit solide dans le cours d'eau à l'étude.

Pour l'algorithme ensembliste, le poids attribué à chaque équation est déterminé en fonction de la moyenne pondérée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Le débit solide final est ensuite obtenu en effectuant une moyenne pondérée des résultats des différentes équations de transport solide.

CHAPITRE 6 THÉORIE SUR LES STATISTIQUES ET L'AUTO-APPRENTISSAGE

Étant donné la diversité des données disponibles sur le transport des sédiments, il est possible de calibrer des modèles mathématiques pour estimer le débit solide. Cependant, la qualité des données utilisées reste un facteur crucial à évaluer. Le chapitre suivant présente les tests statistiques permettant de vérifier l'homogénéité d'une base de données, ainsi qu'un résumé des méthodes de régression par processus gaussien et des algorithmes ensemblistes, appliqués à l'estimation du transport sédimentaire dans les cours d'eau.

6.1 Tests statistiques

Il existe une multitude de tests statistiques pour analyser les bases de données. Dans cette étude, les tests de Student et de Levene sont utilisés pour évaluer l'homogénéité d'un échantillon de données de débit solide.

6.1.1 Test t des Students

Le test t de Student à deux échantillons permet de comparer les moyennes de deux groupes de données. Basé sur la loi de probabilité de Student, son objectif est de déterminer si les différences observées entre ces groupes sont statistiquement significatives. L'application de ce test est illustrée à l'aide des équations 6.1 à 6.2 [195].

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s_p \sqrt{\frac{2}{n}}} \quad (6.1)$$

$$s_p = \sqrt{\frac{s_{X_1}^2 + s_{X_2}^2}{2}} \quad (6.2)$$

Où :

- t = Paramètre de Student
- \bar{X}_1 et \bar{X}_2 = Moyenne des échantillons 1 et 2
- s_p = Variance combinée
- n = Nombre de données des échantillons
- $s_{X_1}^2$ et $s_{X_2}^2$ = Biais de la variance des échantillons 1 et 2

Après avoir calculé le paramètre t de Student, la p -value peut être déterminée à l'aide de la table de distribution de Student. Cette p -value permet d'évaluer l'hypothèse d'homogénéité des échantillons : si la p -value est supérieure à 0,05, l'hypothèse d'homogénéité est acceptée.

6.1.2 Test de Levene

Le test de Levene permet d'évaluer l'égalité des variances (homoscédasticité) entre plusieurs échantillons, sans supposer la normalité des distributions. Ce test est particulièrement utile pour vérifier si les résidus d'un modèle statistique sont constants à travers les observations. Les équations 6.3 à 6.5 montrent l'application du test de Levene en comparant les variances des groupes de données étudiés.

$$W = \frac{N - k}{k - 1} \frac{\sum_{i=1}^k N_i (Z_{i.} - Z_{..})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - Z_i)^2} \quad (6.3)$$

$$Z_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} Z_{ij} \quad (6.4)$$

$$Z_{..} = 1/N \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} Z_{ij} \quad (6.5)$$

Où :

W = Paramètre de Levene

k = Nombre d'échantillons

N_i = Nombre de données dans l'échantillon i

N = Nombre de données totales

Y_{ij} = La mesure de la donnée j de l'échantillon i

Z_{ij} = Différence d'une mesure j et de la moyenne de l'échantillon i

Ainsi, le paramètre du test de Levene peut être comparé à la distribution de Fisher-Snedecor afin de déterminer si les échantillons présentent une homoscédasticité et suivent une distribution normale. Cela permet de comparer différents échantillons de comportement hydrosédimentaire tout en s'assurant que leur variabilité respecte des caractéristiques similaires.

6.2 Théorie sur la régression par processus gaussien

La régression par processus gaussien (RPG) est une méthode de régression qui modélise la relation entre les variables d'entrée et de sortie sous la forme d'un processus aléatoire. Dans

ce cadre, les valeurs des paramètres de sortie sont considérées comme des variables qui varient d'une estimation à l'autre [196].

En supposant que le phénomène étudié soit continu, le principe fondamental de la régression par processus gaussien (RPG) repose sur l'idée que plus les variables prédictives d'une donnée sont proches de celles d'une valeur mesurée dans la série de données d'entraînement, plus la variable de sortie est susceptible d'être similaire. La figure 6.1 illustre un exemple de régression par processus gaussien, en incluant la zone d'incertitude.

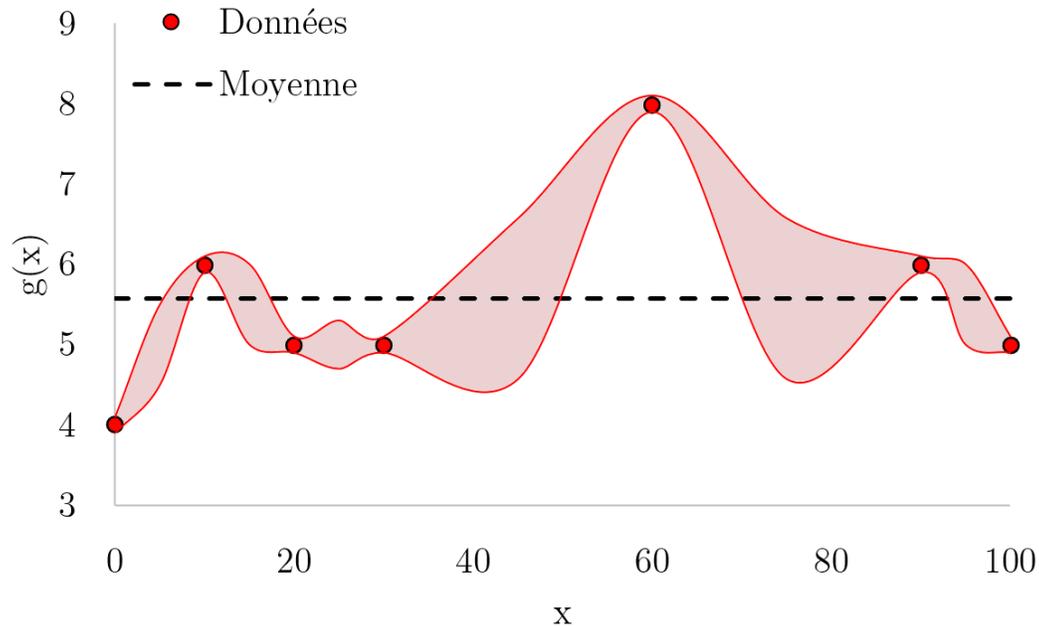


FIGURE 6.1 Exemple d'une régression par processus gaussien en incluant la zone d'incertitude en fonction de la variable prédictive x

La 6.1 met en évidence que plus la régression est proche d'une donnée mesurée, moins l'incertitude associée est importante. Cette observation s'explique par le concept de dépendance de l'information en fonction des mesures. Ainsi, la dépendance entre deux points peut être exprimée par l'équation 6.6.

$$\rho(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_i - x_j)^2}{l^2}\right) \quad (6.6)$$

Où :

- ρ = Dépendance des paramètres x_i et x_j
- x_i et x_j = Covariables prédictives i et j
- l = Longueur de dépendance

Dans cette équation, la longueur de dépendance peut être caractérisée comme l'influence d'une variable prédictive sur le paramètre de sortie. Ainsi, plus la longueur de dépendance est courte, plus le paramètre est significatif. En conséquence, un modèle ayant plusieurs variables significatives nécessite un plus grand nombre de données mesurées pour mieux caractériser le milieu à modéliser.

La figure 6.1 montre aussi une incertitude sur les mesures des données à estimer. En effet, malgré la présence d'une donnée mesurée pour des entrants x fournis, celle-ci n'est pas considérée comme exacte lors de l'estimation. Ceci s'explique par le fait que toutes mesures possèdent une incertitude due à la méthode de mesure utilisée ou à l'instrumentation. Cette incertitude peut être estimée par une loi normale (Eq. 6.7).

$$Y_i = g(x_i) + V \quad (6.7)$$

Où :

Y_i = La valeur mesurée de la donnée i

i = L'identifiant d'une mesure

$g(x_i)$ = La valeur de la régression pour les covariables de la mesure i

x_i = Les covariables de la mesure i

V = Erreur de mesure représentée par $N(\nu; 0; \sigma_\nu^2)$

Dans le domaine du transport des sédiments, il est courant d'avoir une incertitude sur la mesure en raison de la complexité du phénomène [197]. Par exemple, la mesure de la concentration des sédiments est généralement effectuée sur une section de la largeur d'une rivière à l'étude [198]. L'utilisation de la RPG pour le transport sédimentaire permet de prendre en considération cette incertitude lors de l'estimation du débit solide.

Les connaissances à priori d'un système contribuent à améliorer l'estimation de la RPG dans les domaines où le nombre de données est limité. La fonction de la moyenne à priori permet de décrire le phénomène étudié. Par exemple, il est possible de fixer la moyenne de la RPG à la moyenne des données étudiées. La figure 6.1 montre cette hypothèse aux points $x = 45$ et $x = 75$, où la RPG couvre la moyenne des données avec une incertitude plus grande en raison du manque de données.

Il est aussi possible d'inclure cette variation en intégrant une équation pour définir la moyenne. Par exemple, combiner une équation de transport solide existante avec la RPG, de sorte que les domaines avec peu de données sont estimés par une équation de transport solide existante, tandis que les domaines où la concentration est mesurée sont estimés par le facteur de dépendance des covariables [199].

Les fonctions de covariance permettent de définir la relation de dépendance entre un point du domaine et les données mesurées sur l'ensemble du domaine. Pour cela, la fonction de covariance doit respecter le critère de symétrie ($\rho(x_i, x_j) = \rho(x_j, x_i)$) [179]. La loi normale est régulièrement utilisée pour la calibration de la régression par processus gaussien en raison de ce critère. Cependant, il existe différentes fonctions de covariance, telles que la fonction Matern [200]. Puisqu'il est difficile de connaître la fonction de covariance adéquate pour le phénomène du transport sédimentaire, une analyse de sensibilité des fonctions de covariance doit être effectuée.

La calibration des paramètres à optimiser se fait par inférence. Les paramètres à optimiser sont les longueurs de dépendance, la variance de la fonction de covariance et la variance de l'erreur de mesure.

- Longueur de dépendance (l) : Ce paramètre quantifie l'influence d'une variable prédictive sur le voisinage des estimations. Chaque variable prédictive est caractérisée par une longueur de dépendance distincte.
- Variance de la fonction de covariance (σ_G) : Ce paramètre quantifie l'incertitude du système dans un contexte où le nombre de données est limité. Par conséquent, lorsque le nombre de données à proximité est réduit, l'incertitude associée à la régression par processus gaussien augmente.
- Variance de la mesure (σ_V) : Ce paramètre reflète l'incertitude associée aux mesures des données. Ainsi, même si un cours d'eau présente des conditions hydrauliques et physiographiques identiques à celles d'une donnée observée, le débit solide estimé peut varier légèrement.

L'objectif de la calibration est de maximiser la fonction de vraisemblance. Toutefois, celle-ci tend vers zéro lorsque le nombre de données augmente, en raison de la multiplication de plusieurs probabilités inférieures à 1 [201]. Par conséquent, c'est le logarithme de la fonction de vraisemblance qui est maximisé pour obtenir les paramètres de calibration optimaux (Éq. 6.8).

$$\theta^* = \arg \max \log (f(D_y|D_x, \theta)) \quad (6.8)$$

θ^* = Paramètres optimisés

D_y = Concentrations mesurées de l'échantillon d'entraînement

D_x = Caractéristiques hydrauliques et physiographiques de l'échantillon d'entraînement

θ = Paramètres à optimiser

Il convient de souligner que le processus de calibration peut converger vers un maximum

local. Il est donc essentiel d'effectuer la calibration en utilisant différentes valeurs initiales pour les paramètres à optimiser. De plus, il peut être difficile de déterminer si le maximum global a été atteint en raison du nombre de variables prédictives. Par conséquent, une étude comparative des paramètres initiaux permet d'évaluer divers maxima sans nécessairement confirmer que le maximum global a été trouvé [202].

Des logiciels dédiés à la calibration de la régression par processus gaussien peuvent être utilisés. L'un des outils les plus populaires est le "Gaussian Processes for Machine Learning Toolbox" (GPML). Ce logiciel permet d'appliquer des méthodes d'optimisation par inférence pour calibrer les paramètres de la régression par processus gaussien, en tenant compte de plusieurs fonctions de covariance et de moyennes différentes.

6.3 Théorie sur les algorithmes ensemblistes

L'algorithme ensembliste vise à améliorer les performances de plusieurs modèles en les combinant. L'objectif de cette approche est d'exploiter les forces d'un modèle pour compenser les faiblesses des autres. Ainsi, il est possible d'obtenir de meilleurs résultats que ceux des modèles individuels les plus performants. La figure 6.2 illustre un exemple de la performance de trois modèles différents ainsi que la combinaison de ces modèles à l'aide d'un algorithme ensembliste sur une série de dix données.

Données	Modèles			
	1	2	3	A.E
1	✗	✓	✓	✓
2	✓	✓	✗	✓
3	✗	✗	✓	✗
4	✓	✗	✓	✓
5	✓	✓	✗	✓
6	✓	✓	✓	✓
7	✗	✗	✗	✗
8	✗	✓	✓	✓
9	✓	✓	✗	✓
10	✓	✗	✓	✓
Réussite(%)	60%	60%	60%	80%

FIGURE 6.2 Illustration de l'amélioration des modèles individuels via un algorithme ensembliste sur un échantillon de 10 données

La figure 6.2 illustre que le taux de réussite de chaque modèle individuel est de 60%. En combinant les différents modèles et en supposant qu'une estimation soit adéquate lorsque deux des trois modèles sont acceptables pour la donnée étudiée, le taux de réussite des estimations passe de 60% à 80%. Pour garantir une utilisation appropriée de l'algorithme ensembliste, deux caractéristiques doivent être respectées.

1. La diversité des modèles : Les modèles ne peuvent pas tous estimer le même résultat. L'algorithme ensembliste tire parti des forces d'un modèle pour compenser les faiblesses des autres. Par conséquent, si tous les modèles sont identiques ou présentent peu de diversité, les résultats obtenus par l'algorithme ensembliste seront similaires à ceux des modèles individuels.
2. La performance des modèles : Les modèles utilisés dans le cadre de l'algorithme ensembliste doivent afficher un taux de réussite supérieur à 50 %. Si l'ensemble des modèles

présente un taux de réussite inférieur à ce seuil, le taux de réussite de l'algorithme ensembliste tend vers 0%.

Il existe différentes approches pour l'implémentation de l'algorithme :

- **Bagging** : Calibrer différents modèles sur un échantillonnage aléatoire provenant d'une base de données d'entraînement initial. Les estimations des modèles sont ensuite combinées à l'aide d'une moyenne pondérée. Cette approche utilise souvent le principe d'arbre décisionnel et a pour but de réduire la variance du système et le sur-apprentissage. Il est possible de visualiser cette approche comme la combinaison de plusieurs calibrations en parallèle.
- **Boosting** : Entraîner un modèle final par une calibration en séquence de différents modèles individuels. Chaque itération de la calibration en séquence consiste à ajuster le poids des échantillons d'entraînement. Il est possible de visualiser cette approche comme une calibration en série de plusieurs modèles individuels.
- **Stacking** : Combiner les estimations de différents modèles individuels en utilisant un modèle de niveau supérieur. Au lieu de calibrer chaque modèle individuel, il est possible d'utiliser les résultats de chaque modèle comme paramètre d'entrée pour un modèle général. Le stacking a pour but de mettre en évidence les avantages des différents modèles pour les combiner de manière optimale.

Le stacking représente l'une des meilleures options dans le domaine du transport sédimentaire, car de nombreuses équations de transport solide existantes ont été calibrées et validées. Ainsi, cette approche s'avère particulièrement appropriée pour combiner les équations de transport solide, en tirant parti des avantages offerts par les différentes approches physiques pour estimer le débit solide des écoulements.

6.4 Validation croisée

La validation croisée est une méthode statistique utilisée pour évaluer la performance d'un modèle d'estimation. Elle permet de tirer parti de l'ensemble des données pour l'entraînement du modèle tout en évitant la surcalibration. Cette méthode divise les données en sous-ensembles afin de constituer à la fois une base de données d'entraînement et une base de validation. La figure 6.3 illustre un exemple de validation croisée pour évaluer les performances d'un modèle.

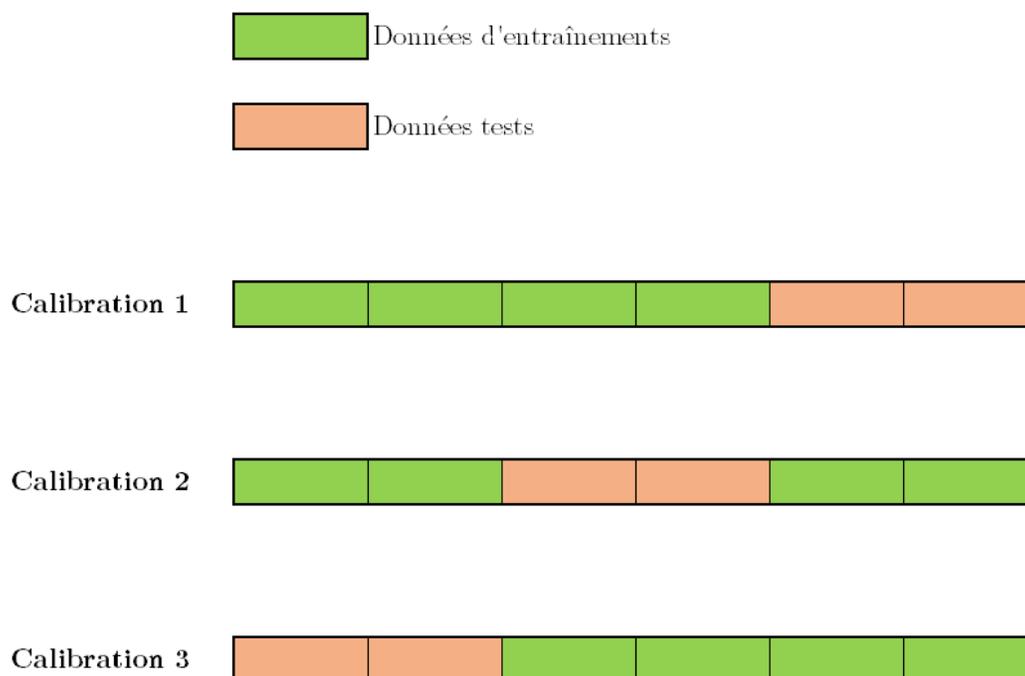


FIGURE 6.3 Exemple de l'utilisation de la validation croisée

Dans l'exemple présenté à la figure 6.3, trois calibrations sont réalisées avec deux tiers des données réservées à l'entraînement et un tiers pour le test du modèle. Il est important de noter que les données utilisées pour les tests ne sont pas incluses dans la série d'entraînement afin d'éviter la surcalibration.

Dans le cadre de ce projet de recherche, la validation croisée Leave-One-Out (LOOCV) est employée pour évaluer les performances des modèles d'estimation du débit solide. Cette approche permet d'utiliser chaque donnée une seule fois comme série de tests, tandis que le reste des données est utilisé pour constituer la base d'entraînement. Bien que cette méthode soit généralement la plus précise, elle nécessite un temps de calcul plus important [203].

CHAPITRE 7 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL DES MESURES DE TRANSPORT SOLIDE

Des mesures expérimentales de transport sédimentaire ont été réalisées dans le cadre de cette recherche. L'objectif des expérimentations est d'obtenir des mesures de transport solide en connaissant pleinement les incertitudes pour comparer les données de débit solide mesurées en laboratoire aux modèles d'estimations.

Plusieurs conditions hydrauliques simplificatrices sont généralement posées lors du développement d'une équation pour estimer le débit solide [204]. Dans ce contexte, les conditions d'écoulement établies sont unidimensionnelles en régime quasi-uniforme et quasi-permanent ($\frac{dh}{dx} \approx 0$ & $\frac{dh}{dt} \approx 0$). Cela permet d'adapter l'étude en laboratoire à des conditions expérimentales facilement contrôlables et reproductibles.

Ce chapitre présente le montage expérimental et la caractérisation des sédiments utilisés. Ensuite, les manipulations expérimentales sont présentées en fonction des trois étapes d'écoulement : avant, pendant et après l'écoulement.

7.1 Montage expérimental

Le canal utilisé pour les expérimentations est de forme rectangulaire avec des parois en verre et un fond en bois de 6 m de long et 0.76 m de large. La pente longitudinale est de 0.4% et la profondeur d'eau maximale de 0.6 m. Des égalisateurs de sédiments d'une épaisseur de 4 cm sont installés sur chaque paroi latérale pour assurer un étalement uniforme des sédiments. La figure 7.1 présente le montage expérimental.

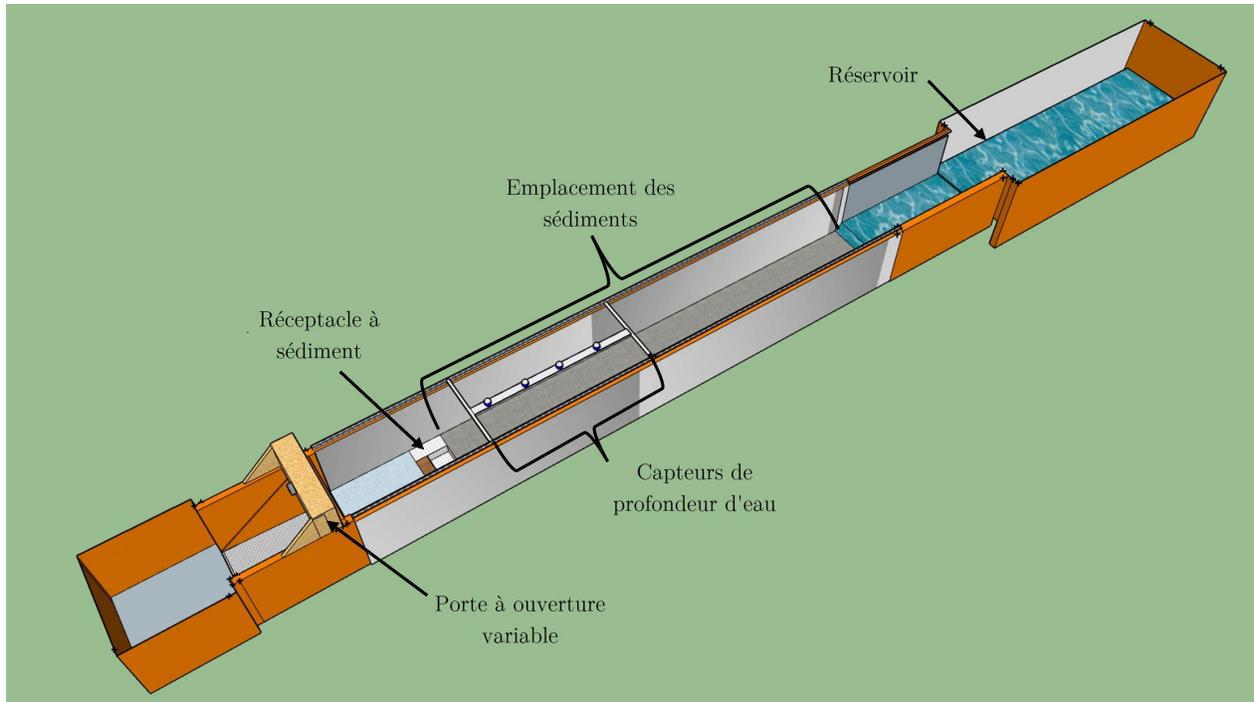


FIGURE 7.1 Montage expérimental

Le système d'alimentation provient d'un château d'eau fournissant le débit au réservoir de 2.35 m^3 situés à l'amont du canal. Une vanne connectant le château d'eau et le réservoir permet de contrôler le débit d'entrée. Le réservoir permet de réduire l'effet des vagues lors des fluctuations du débit dans la conduite d'entrée. Le débit maximal du système d'alimentation est de 83 l/s . Un débitmètre situé sur la conduite du système d'alimentation mesure le débit liquide s'écoulant dans le canal avec une précision de $0,1 \text{ m}^3/h$.

L'extrémité aval du canal dispose d'une porte à ouverture variable permettant le contrôle du niveau d'eau. Un moulinet à cliquet est utilisé pour contrôler manuellement le niveau de la crête de la porte avec des incréments de 2 mm . Ainsi, il est possible d'obtenir différentes profondeurs d'eau et vitesses d'écoulement pour un débit fixe.

Quatre capteurs de distance (Mic-130/Microsonic) installés à l'amont du réceptacle à sédiment distancé de 50 cm d'intervalle mesurent la distance entre la surface de l'eau et les capteurs à chaque seconde avec une précision de $0,1 \text{ mm}$. La disposition et le rythme de mesure des capteurs permettent d'évaluer l'uniformité et la permanence de l'écoulement.

Une cavité destinée à collecter les sédiments est située à 5 mètres en aval de l'entrée du canal. Sept collecteurs superposés simultanément sont placés dans le réceptacle à sédiment permettant de les retirer à chaque période de mesure. Une telle approche rend possible la

collecte continue du transport sédimentaire causée par l'érosion, malgré la présence d'un écoulement.

Trois types de sédiments ont été utilisés durant les expérimentations : un sable fin, un sable grossier et un gravier. Ces trois variétés de sédiments ont été choisies pour investiguer différentes conditions sédimentaires. La figure 7.2 présente les courbes granulométriques des sédiments utilisées dans le montage expérimental.

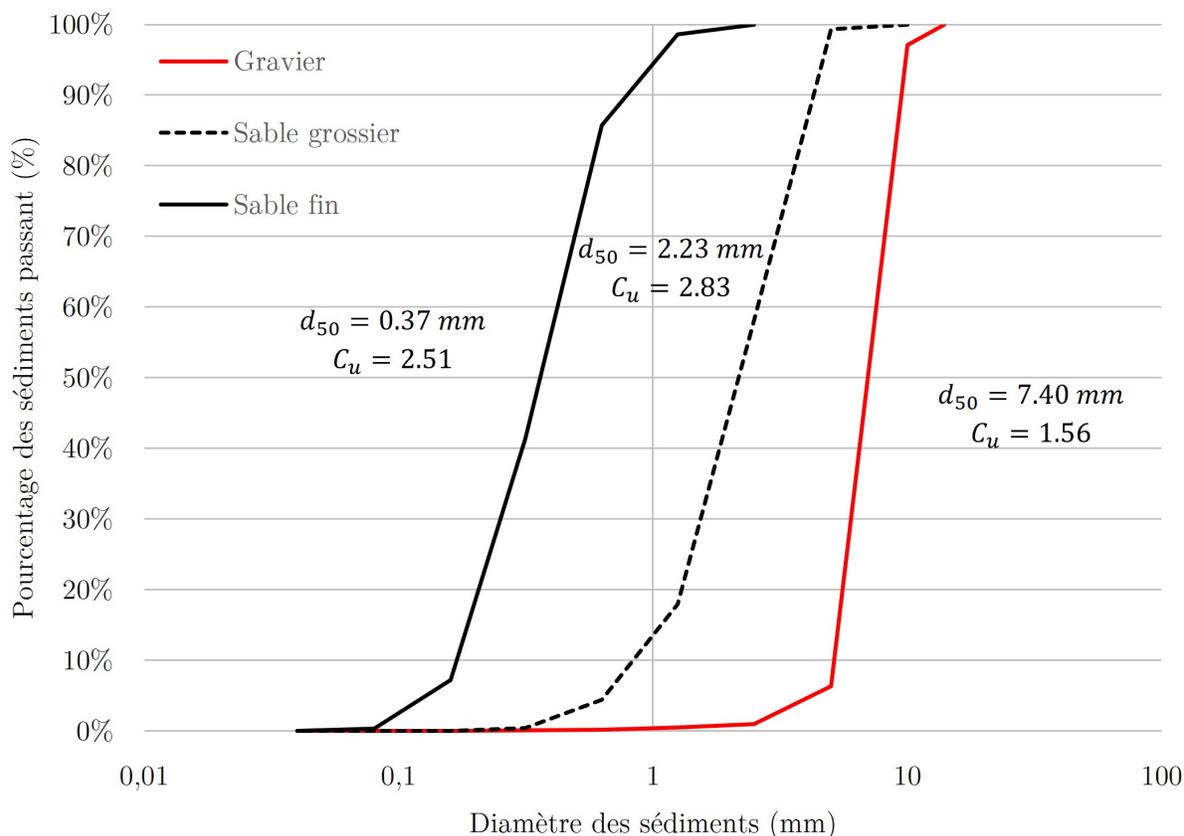


FIGURE 7.2 Courbes granulométriques des matériaux sédimentaires

La figure 7.2 montre que l'ensemble des matériaux sont considérés uniforme avec un coefficient d'uniformité sont inférieurs à 4 [17]. Chaque courbe granulométrique mesurée est la moyenne de 6 à 20 échantillons sédimentaires. Le nombre de données dans un échantillon varie en fonction du nombre d'expérimentations réalisées sur ces types de sédiments. Le coefficient de variation du gravier est de 1.74%, indiquant une faible incertitude quant au diamètre médian du gravier. La variabilité des sables augmente à 12.7% et 16.1% pour le sable grossier et fin respectivement.

7.2 Manipulations expérimentales

Les manipulations expérimentales permettent d'obtenir des mesures reproductibles et documentées. Cette sous-section présente en détail les manipulations expérimentales. La figure 7.3 présente les étapes des manipulations segmentées en trois catégories distinctes, à savoir avant, pendant et après l'écoulement dans le canal.

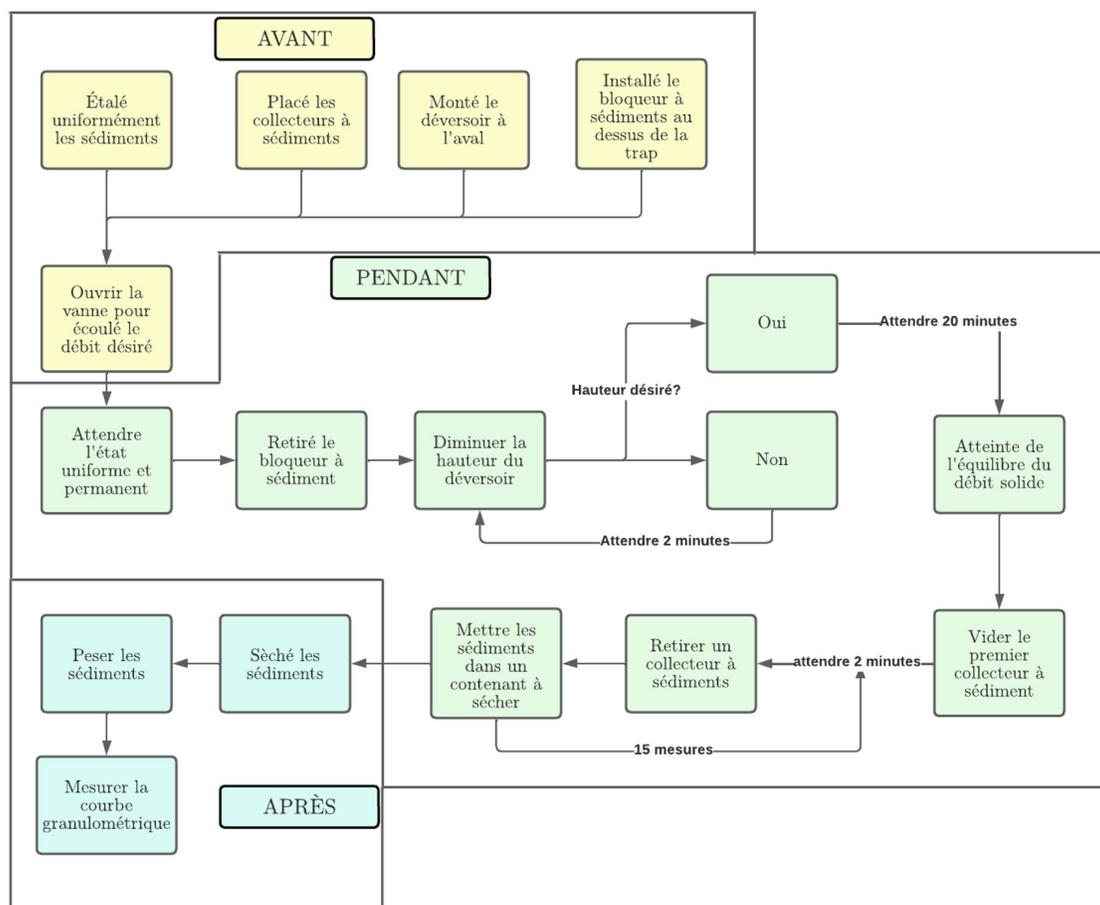


FIGURE 7.3 Étapes des manipulations expérimentales

7.2.1 Manipulations expérimentales avant l'écoulement dans le canal

La première étape consiste à préparer le sol transporté par l'écoulement. À cette fin, un râteau est utilisé pour briser les agrégats causés par l'humidification du sol. Les sédiments sont ajoutés sur le fond du canal entre les égalisateurs installés aux extrémités latérales du

canal. Ensuite, une languette de bois de la largeur du canal est déposée sur les égalisateurs pour étaler les sédiments en une couche uniforme de 4 cm d'épaisseur sur l'ensemble de la section à l'amont des collecteurs. La figure 7.4 présente la disposition du sol au début et à la fin des expérimentations du sable fin.

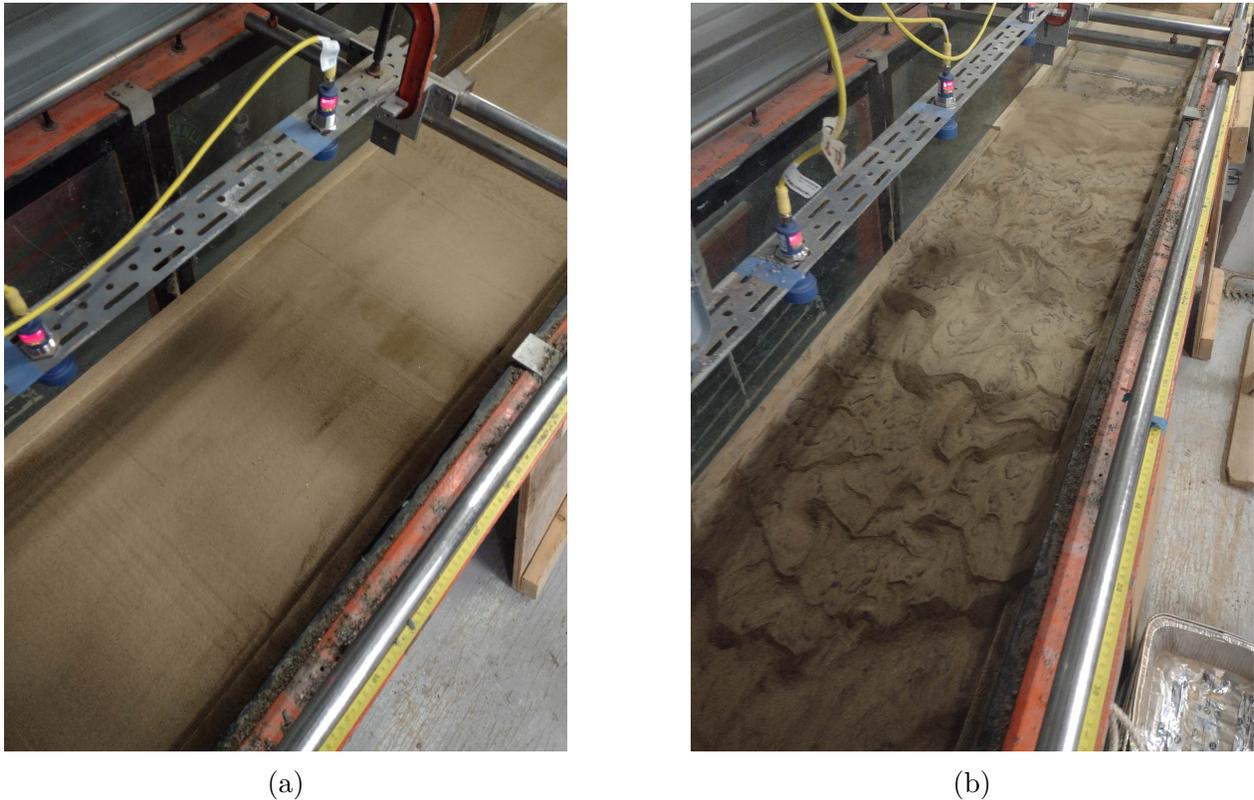


FIGURE 7.4 La disposition du sable fin (a) Avant l'expérimentation (b) Après l'expérimentation

Par la suite, les collecteurs à sédiments sont superposés les uns par-dessus les autres, puis déposés à l'intérieur du réceptacle situé à 5 mètres en aval de l'entrée du canal. Une planche de 0.76 mètre de longueur par 0.70 mètre de largeur est placée au-dessus du réceptacle pour empêcher les sédiments de s'infiltrer dans les collecteurs à sédiments et modifier la morphologie du lit au droit du réceptacle lors du remplissage du canal.

La porte à ouverture variable située à l'aval est remontée à sa hauteur maximale. Cette manœuvre permet d'obtenir une vitesse d'écoulement faible lors du remplissage du canal, assurant l'atteinte d'un régime quasi-uniforme et quasi-permanent sans modifier la morphologie du sol. Ceci permet d'augmenter l'aire mouillée de l'écoulement et, par conséquent, diminuer la vitesse d'écoulement moyenne.

Finalement, le débit s'écoulant dans le canal est contrôlé à l'aide d'une vanne connectée au château d'eau. Le débit d'écoulement est décidé préalablement en fonction de l'ouverture de la vanne et est validé par le débitmètre pour assurer qu'il soit peu variable sur la durée totale des expérimentations.

7.2.2 Manipulations expérimentales pendant l'écoulement dans le canal

Suite à une ouverture partielle de la vanne (deux révolutions), le canal se remplit jusqu'à l'atteinte de la crête de la porte à ouverture variable. Le débit initial s'écoulant dans le canal est maintenu faible pour éviter l'érosion lors du remplissage. Afin de garantir un régime quasi-uniforme et quasi-permanent dans le canal expérimental, une période de 20 minutes est attendue après l'atteinte de la profondeur d'eau prévue. Ces conditions sont vérifiées avec les capteurs de distance. Lorsque l'ensemble des capteurs indiquent une profondeur d'eau similaire pendant une durée de cinq minutes, l'écoulement est considéré quasi-uniforme et quasi-permanent.

Une fois le canal rempli, la planche recouvrant le réceptacle à sédiments est retirée. Il est essentiel d'attendre que la hauteur d'eau dans le canal atteigne son maximum pour que la vitesse d'écoulement soit minimale. Ainsi, les turbulences provoquées par le retrait de la planche sont atténuées, réduisant les perturbations adjacentes au réceptacle.

L'étape suivante consiste à réduire la profondeur au niveau prévu. La crête de la porte à ouverture variable est progressivement diminuée par incréments de 2 cm jusqu'à la mise en mouvement des sédiments. Entre chaque incrémentation, une période d'attente de 2 à 5 minutes est observée pour assurer un régime d'écoulement quasi-permanent.

Par la suite, l'incrément de la variation de la crête est réduite à 0.5 cm pour atteindre les conditions expérimentales recherchées. Ce processus permet de contrôler la profondeur d'eau et garantir des conditions d'écoulement appropriées pour l'expérimentation.

Au début de l'expérimentation, le lit du canal ne présente aucune dune, car la disposition des sédiments est uniformément étalée. Cependant, au cours des expérimentations, il est possible d'observer la formation de dunes (Fig. 7.4). Ainsi, une période d'attente de 20 à 30 minutes est écoulee pour permettre à la disposition des sédiments de s'ajuster avec l'écoulement.

Ensuite, le premier collecteur à sédiment est soigneusement retiré du réceptacle. Cette première collecte de sédiment n'est pas considérée comme une donnée de mesure afin d'éliminer toute incertitude causée par les manipulations préliminaires. Par la suite, chaque collecteur est retiré aux trois minutes. Lors du retrait des collecteurs, ceux-ci sont transportés un mètre à l'aval du canal tout en restant submergés pour éviter toute perturbation hydraulique à la

surface du réceptacle. Cette approche permet de minimiser l'influence de l'interaction entre l'eau et les sédiments lors du retrait des collecteurs à sédiments. Une fois que tous les échantillons de transport solide sont collectés, la vanne connectée au château d'eau est fermée pour arrêter l'écoulement dans le canal.

Ces manipulations permettent de maximiser le nombre d'échantillons de transport solide obtenus au cours d'une seule expérimentation, tout en maintenant l'uniformité et la reproductibilité des mesures malgré les perturbations temporaires causées par la manipulation.

7.2.3 Manipulations expérimentales après l'écoulement dans le canal

Étant donné que les sédiments sont entièrement saturés lorsqu'ils sont récupérés, il est nécessaire de procéder à une période de séchage de 24 heures à 106 °C. Cette manipulation permet d'évaporer l'eau résiduelle et de réaliser une pesée à sec, éliminant la variabilité de la masse due aux différences de saturation des sédiments. Chaque échantillon de mesure est pesé individuellement, et le contenant de mesure est essuyé entre chaque pesée pour éliminer les particules fines pouvant s'y être accrochées.

Les trois premières et dernières mesures d'une expérimentation sont mises de côté en vue de mesurer la courbe granulométrique. L'objectif de prélever des échantillons de mesure distancés dans le temps est d'étudier la variation de la courbe granulométrique en fonction de la durée des expérimentations. Cela permet d'assurer que les matériaux transportés conservent le même profil granulométrique. Par la suite, les sédiments sont déposés dans un tamis vibrant pendant une période de 30 minutes, afin de garantir la répartition des sédiments dans leur compartiment granulométrique approprié.

L'ensemble de ces manipulations permet d'obtenir plus de 12 mesures de débit solide et deux courbes granulométriques par expérimentation. Le nombre élevé de mesures par expérimentation facilite l'analyse statistique des échantillons et permet de vérifier la répétitivité des résultats obtenus. Il est important de noter que certaines expérimentations peuvent comporter moins de mesures en raison d'une érosion plus importante que le canal ne peut supporter. Lorsque la couche sédimentaire s'épuise prématurément, l'expérimentation est interrompue avant d'atteindre les 12 mesures prévues.

7.3 Domaine d'application expérimentale

Les expérimentations sont complétées sur des écoulements quasi-uniformes et quasi-permanents à surface libre dans un canal de forme rectangulaire avec une pente longitudinale de 0,4%. Le tableau 7.1 présente les frontières des comportements hydrauliques et sédimentaires du

montage expérimental.

TABLEAU 7.1 Frontières des conditions hydrauliques et sédimentaires du montage expérimental

Variable	Domaine expérimental
h (cm)	7.94 - 21.5
U ($\frac{m}{s}$)	0.393 - 0.817
Q ($\frac{L}{s}$)	30.4 - 78.9
d_{50} (mm)	0.370 - 7.40
C (PPM)	4.47 - 357.2

D'une part, les conditions hydrauliques présentées au tableau 7.1 sont limitées à un écoulement de petite envergure. Par exemple, la hauteur d'écoulement ne dépasse pas 22 cm. Les données utilisées pour la validation expérimentale sont spécifiques à des écoulements en laboratoire. De plus, la vitesse d'écoulement maximal est sous 1 m/s . D'autre part, les types de sédiments varient du gravier fin jusqu'au sable fin. Cette variabilité des sédiments permet d'étudier des taux d'érosion atteignant une concentration supérieure à 350 PPM. Les types de sédiments tels que l'argile et le silt ont été évités en raison de leur comportement cohésif. Le gravier grossier n'a pas pu être étudié en raison des limitations hydrauliques du montage expérimental.

CHAPITRE 8 MESURES EXISTANTES DU TRANSPORT SOLIDE ET HOMOGÉNÉISATION DES ÉCOULEMENTS

En hydraulique des sédiments, un ensemble de données homogènes est défini par un regroupement de mesures présentant des comportements hydrauliques, physiographiques et sédimentaires similaires. L'utilisation de données homogènes lors de la calibration d'équations améliore les performances et diminue la variabilité des estimations pour le domaine étudié [205]. Toutefois, les mesures du débit solide sont rarement homogènes en raison de la variation des comportements hydrauliques et physiographiques des écoulements. Ce chapitre présente une méthode pour extraire des listes de données au comportement sédimentaire similaire pour un cours d'eau quelconque à partir d'une base de données de mesures hétérogènes en transport sédimentaire. L'objectif de cette approche est d'évaluer la performance des équations de transport solide pour un cours d'eau sans mesure du débit solide. La figure 8.1 présente la démarche de la création de la base de données générale, la transformation des conditions hydrauliques et physiographiques en variables adimensionnelles et l'extraction des ensembles de données homogènes.

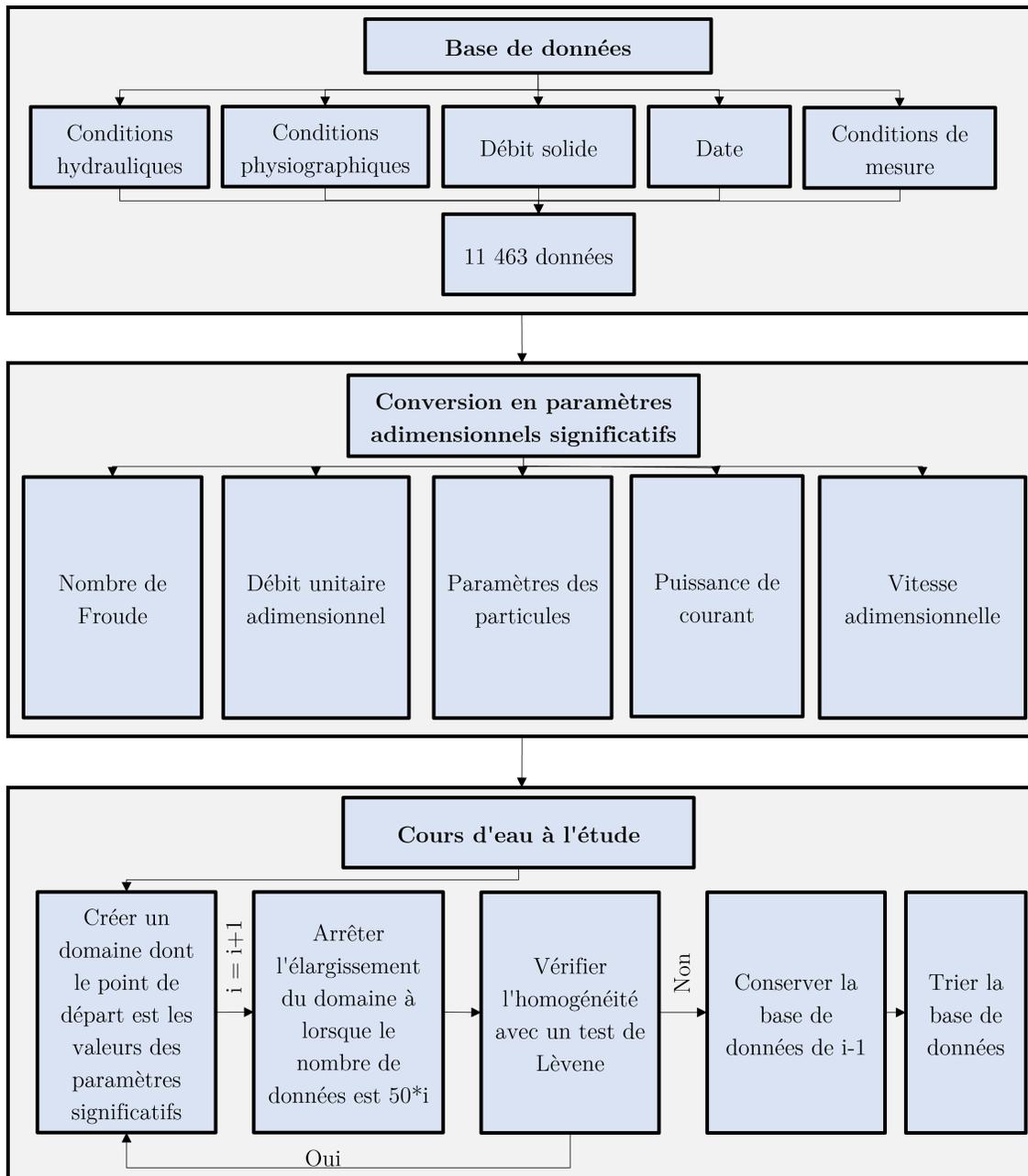


FIGURE 8.1 Schéma du processus d'extraction de liste de données homogènes pour le transport des sédiments

Pour assurer une calibration adéquate d'un algorithme d'estimation du débit solide, il est essentiel de disposer d'un vaste ensemble de données [206]. Par conséquent, une base de données des mesures du débit solide est créée à partir des données publiées dans la littérature. Ces données regroupent les caractéristiques physiographiques et hydrauliques, les conditions de mesure et les dates de mesure.

La base de données est composée de plusieurs expérimentations et mesures terrain collectées sur une plage temporelle de plus d'un siècle. Ainsi, les données présentent des comportements sédimentaires hétérogènes. Par exemple, les conditions hydrauliques des données collectées dans un canal en laboratoire diffèrent de celles mesurées dans un cours d'eau naturel [173]. Cette hétérogénéité peut entraîner des limitations dans la calibration d'un algorithme pour estimer le transport des sédiments [207].

Une transformation des caractéristiques hydrauliques et physiographiques est réalisée afin d'uniformiser les données. Cette transformation implique l'utilisation de variables adimensionnelles pour décrire le comportement du transport sédimentaire. Ainsi, la caractérisation du comportement sédimentaire peut se faire avec un nombre réduit de paramètre et facilité l'analyse.

Le domaine de la dynamique des sédiments englobe plus d'une vingtaine de variables adimensionnelles. Des tests d'analyse de sensibilité sont nécessaires afin de déterminer les paramètres les plus significatifs. Cette approche permet de mettre en évidence cinq paramètres adimensionnels pour décrire significativement le comportement des sédiments en écoulement à surface libre : le nombre de Froude, la puissance de courant unitaire, le débit unitaire adimensionnel, le paramètre de particule et le paramètre de vitesse [20].

La simplification des comportements hydrauliques, physiographiques et sédimentaires en cinq paramètres adimensionnels permet de faciliter la comparaison des performances des équations de transport solide pour une rivière à l'étude et d'identifier les écoulements avec des comportements sédimentaires homogènes.

8.1 Mesures de transport sédimentaires provenant de la littérature

Une base de données permet de regrouper des mesures sur les divers paramètres clés qui influencent le flux sédimentaire [13]. Dans le cadre de ce projet, une base de données constituée de 11 463 mesures de transport sédimentaire est utilisée, répartie sur une période de plus de 100 ans, comprenant 5 987 mesures terrain et 5 476 mesures en laboratoire.

8.1.1 Conditions hydrauliques

Les conditions hydrauliques des écoulements à surface libre réfèrent aux caractéristiques liées à l'écoulement et aux propriétés de l'eau dans un cours d'eau. Ainsi, les paramètres influençant le déplacement de l'eau, tel que la profondeur d'eau et la vitesse d'écoulement, sont inclus dans cette catégorie. Pour qu'une donnée soit considérée dans la base de données, cinq conditions doivent être respectées :

1. Écoulement à surface libre : L'écoulement présente une configuration dans laquelle l'eau s'écoule sans être confinée par une surface supérieure.
2. Écoulement quasi-permanent : Les conditions hydrauliques varient peu dans le temps.
3. Écoulement quasi-uniforme : Les conditions hydrauliques varient peu dans l'espace, particulièrement dans la direction longitudinale de l'écoulement.
4. Le comportement hydraulique de l'écoulement soit bien documenté. Il convient de noter que certaines variables peuvent être estimées en se basant sur des hypothèses simplificatrices, telles que la température et la viscosité cinématique.
5. Les données mesurées ont été révisées par des pairs et publiées dans la littérature, garantissant une certaine fiabilité.

Lorsque ces conditions sont respectées, il faut assurer que les paramètres hydrauliques nécessaires à l'estimation du débit solide soient disponibles. Le tableau 8.1 présente les 12 paramètres hydrauliques utilisés dans la majorité des équations de transport solide existantes. Lors des mesures du transport sédimentaire, il est nécessaire de mesurer un total de quatre paramètres, à savoir le débit liquide, le débit solide ou la concentration volumique des sédiments, la profondeur d'eau et la température. L'hypothèse d'un écoulement unidimensionnel est souvent supposée [18]. Ainsi, il est possible d'utiliser l'équation de continuité unidimensionnelle ($Q = UA$) pour estimer la vitesse d'écoulement.

TABLEAU 8.1 Conditions hydrauliques recueillies dans la littérature pour la conception d'une base de données pour l'estimation du débit solide

Paramètre	Équation	Hypothèse	Domaine
$Q_l(\frac{m^3}{s})$	Mesuré ou $Q_l = U \cdot A$	Écoulement unidimensionnel	0.0005 - 28826
$Q_s(\frac{kg}{s})$	Mesuré ou $Q_s = \frac{Q_l \cdot C \cdot \rho}{1000000}$	Écoulement unidimensionnel	0 - 7104
$C(PPM)$	Mesuré ou $C = \frac{10^6 Q_s}{Q_l \cdot \rho}$	Concentration du débit solide par charriage	0 - 1 356 000
$h(m)$	Mesurée	Hauteur uniforme sur la largeur	0.0079 - 46.33
$A(m^2)$	$A = B \cdot h$	Canal rectangulaire	0.0012 - 18 230
$U(m^2)$	$U = \frac{Q}{A}$	Écoulement unidimensionnel	0.0448 - 4.10
$R_h(m)$	$R_h = \frac{A}{P}$	Fond plat et canal rectangulaire	0.00756 - 27.8
$\tau_0(\frac{N}{m^2})$	$\tau_0 = \gamma \cdot R_h \cdot S_e$	Contrainte uniforme sur le périmètre mouillé	0.0503 - 198.0
$U_*(\frac{m}{s})$	$U_* = g \cdot \rho \cdot S_e$	Écoulement unidimensionnel	0.00709 - 0.447
$T(^{\circ}C)$	Mesurée ou US Climate Data	Température fixe en fonction des mois pour les rivières et 20 °C pour les données en laboratoire	4 - 65.5
$\nu(\frac{m^2}{s})$	$\frac{e^{-3.7188 + (\frac{579.919}{-137.546 + T(K)})}}{10^6}$	Vogel [15]	4.32E-7 - 1.74E-6
$\rho(\frac{kg}{s})$	$\frac{a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5}{a + b T}$	Courbe de régression (Anomalie dilatométrique) [208]	980 - 1000

Température

Il est fréquent que la température ne soit pas mesurée lors des mesures du transport sédimentaire. Dans le cas des expérimentations en laboratoire, la température de l'eau est supposée constante à 20°C. Pour les données terrain, les données provenant de US Climate Data ont été utilisées [209]. Les températures de 107 rivières, réparties aux États-Unis, ont été mesurées mensuellement. Les températures utilisées correspondent à la moyenne des températures

des rivières pour le mois où la mesure a été effectuée. La figure 8.2 présente la variation de la température moyenne des rivières aux États-Unis en fonction des mois.

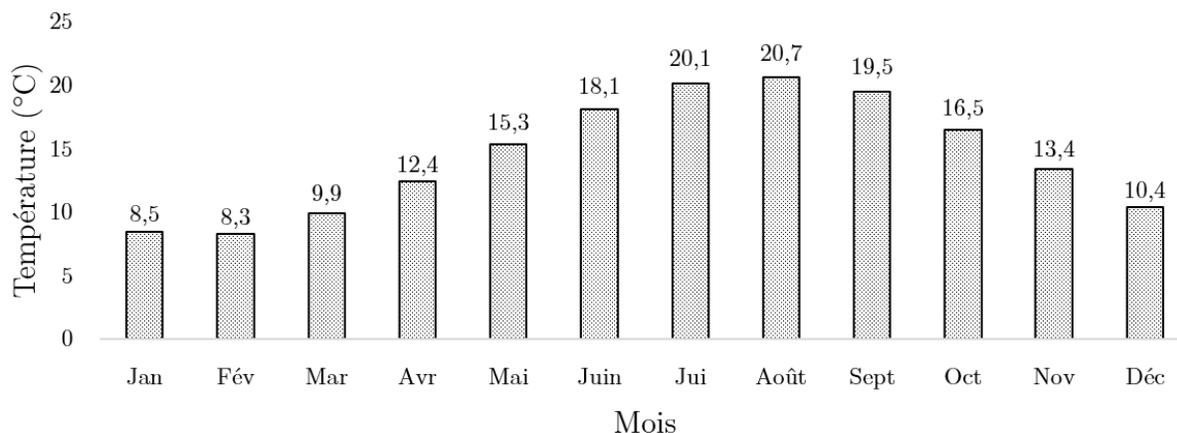


FIGURE 8.2 La variation de la température moyenne des rivières aux États-Unis en fonction des mois

La figure 8.2 montre que la période chaude est entre les mois de mai à octobre. Cette compréhension de la variation cyclique annuelle de la température permet d'obtenir une meilleure estimation des propriétés hydrauliques des mesures terrain utilisées dans la base de données.

Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement appliquée sur le lit de la rivière est variable en fonction de la profondeur d'eau [34]. Toutefois, en raison de l'absence de connaissance de la variation du lit des rivières sur la largeur des canaux, la contrainte de cisaillement est considérée uniforme sur l'ensemble du périmètre mouillé.

Hétérogénéité de la base de données

Plusieurs paramètres hydrauliques présentent une variabilité significative dans leur domaine d'application. Par exemple, le débit liquide peut varier de manière importante, avec un rapport de 10^8 entre le débit minimal et maximal mesuré. Cette différence s'explique en raison des conditions de mesure qui diffèrent entre les sources. Les mesures expérimentales réalisées en laboratoire et les données terrains provenant de systèmes fluviaux plus vastes et étendus contribuent à cette variabilité [173]. Cette variabilité est retrouvée pour différents paramètres hydrauliques tels que la profondeur d'eau, la vitesse d'écoulement, le périmètre mouillé, etc.

La différence entre les valeurs minimales et maximales des conditions hydrauliques permet de

classifier la base de données comme étant hétérogène. Par conséquent, il est difficile d'utiliser simultanément l'ensemble de ces données pour évaluer l'efficacité d'une équation de transport solide. C'est pourquoi il est nécessaire de simplifier cette base de données afin d'étudier le débit solide sur un plus faible nombre de paramètres significatifs.

Les conditions hydrauliques ne sont pas les seules variables utilisées pour estimer le transport sédimentaire. Les conditions physiographiques des cours d'eau jouent également un rôle important dans ce phénomène.

8.1.2 Conditions physiographiques

Les conditions physiographiques d'un système fluvial regroupent l'ensemble des éléments liés à sa bathymétrie, ses matériaux, sa morphologie et sa couverture végétale. Ces paramètres sont intrinsèques au territoire et existent indépendamment de la présence d'eau. Ils interagissent avec le régime d'écoulement, la contrainte de cisaillement et, par conséquent, le débit solide. Peu d'études disposent d'informations physiographiques sur le coefficient d'uniformité des grains ou le type de végétation. Par conséquent, ces paramètres ne sont pas inclus dans la base de données afin de favoriser la compilation d'un plus grand nombre de données.

Le tableau 8.2 présente les paramètres des conditions physiographiques nécessaires à l'estimation du débit solide. Parmi ces paramètres, le diamètre médian des sédiments est le plus important pour l'estimation du débit solide. En effet, il influence directement la force requise pour initier leur mise en mouvement ainsi que leur vitesse de chute. Toutefois, il est difficile de mesurer le diamètre de chaque grain individuellement dans un cours d'eau. Par conséquent, les diamètres médians sont mesurés directement à partir de courbes granulométriques [210]. La masse volumique des sédiments non mesurés est supposée égale à 2.65, car cela correspond à la valeur moyenne des sédiments en rivière [211].

TABLEAU 8.2 Conditions physiographiques et sédimentaires recueillies dans la littérature

Paramètre	Équation	Hypothèse	Domaine
$S_f(\frac{m}{m})$	Mesurée	Pente uniforme sur le tronçon mesuré	2.1E-6 - 0.20
B (m)	Mesurée	Considère la largeur à la surface et un canal très large pour les rivières	0.0700 - 1109
P (m)	$P = B + 2h$	Canal rectangulaire	0.124 - 1142
$d_{50}(mm)$	Mesuré	Courbe granulométrique	0.011 - 204
$\rho_s(\frac{kg}{m^3})$	Mesurée ou 2.65	$\rho_s = 2.65$ si la donnée est absente	1250 - 4220
$d_*(-)$	$d_* = d_{50} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}}$	Shields (1936)	0.256 - 5203
$t_{ocr}(\frac{N}{m^2})$	$t_{ocr} = t_o(\rho_s - \rho)gd_{50}$	Shields (1936)	0.0672 - 182.0
$\omega(\frac{m}{s})$	$\omega = \frac{\nu}{d_{50}} d_*^3 \left[38.1 + 0.93d_*^{\frac{12}{7}} \right]^{-\frac{7}{8}}$	Zhiyao (2008)	9.63E-5 - 2.10

La vitesse de chute des sédiments peut être calculée à l'aide de l'équation de Zhiyao [19]. Prendre note que certaines constantes ont été fixées, telles que les facteurs de forme des sédiments qui sont généralement approximés par une valeur de 0.7 pour des sédiments en rivière [212].

La largeur d'eau mesurée à la surface est supposée équivalente à celle du lit de la rivière et le périmètre mouillé calculé avec l'équation $P = B + 2h$. Ces hypothèses sont généralement respectées dans les conditions expérimentales, car les canaux rectangulaires facilitent le contrôle des conditions expérimentales, la reproductibilité des résultats et la simplicité de la mise en place [213]. Bien que la forme naturelle des rivières ne suive pas une forme parfaitement rectangulaire, il est possible de faire cette approximation puisque les rivières sont souvent considérées comme étant très larges [13].

Il est possible de constater une variabilité importante des paramètres physiographiques des données recueillies. La pente longitudinale varie entre 0.0011% et 20%. Celle-ci influence la vitesse d'écoulement en raison des forces de gravité plus élevées. Par conséquent, elle affecte le nombre de Froude et le régime d'écoulement. Cette variation met en évidence

l'hétérogénéité de la base de données et la difficulté à comparer les performances des équations de transport solide existantes puisque certains écoulements mesurés se retrouvent dans le domaine d'extrapolation de plusieurs équations de transport solide.

8.1.3 Paramètres significatifs adimensionnels du transport sédimentaire

Les paramètres adimensionnels sont des regroupements de variables dimensionnelles dont la combinaison devient indépendante de l'unité de mesure. Étant donné qu'il est difficile de comparer directement des paramètres ayant des unités différentes (Ex. vitesse d'écoulement (m/s) et profondeur d'eau (m)), une transformation en un paramètre adimensionnelle permet d'utiliser un groupe de variable pour mettre en relation ces deux paramètres.

Une vaste sélection de variables adimensionnelles a été développée dans le domaine du transport sédimentaire [27]. Différents paramètres adimensionnels relient directement les conditions hydrauliques aux caractéristiques des grains, telles que la rugosité relative du lit de la rivière. Des tests visant à analyser la sensibilité des paramètres adimensionnels en fonction du transport des sédiments par charriage ont conclu que le nombre de Froude $\left(\frac{q}{\sqrt{ghh}}\right)$, le débit unitaire adimensionnel $\left(\frac{q}{Ud_{50}}\right)$, le paramètre des particules $\left(\frac{\nu U}{g(G_s-1)d_{50}^2}\right)$, la puissance du courant unitaire $\left(\frac{US}{\omega}\right)$ et le paramètre de vitesse $\left(\frac{U^3}{gh\omega}\right)$ sont les paramètres adimensionnels les plus significatifs [20].

- **Nombre de Froude** : Représente le rapport entre la vitesse moyenne de l'écoulement et la vitesse de propagation des ondes de surface. Ce paramètre est utilisé principalement pour déterminer si le régime d'écoulement est fluvial ou torrentiel.
- **Débit unitaire adimensionnel** : Normalise le débit en fonction de la vitesse d'écoulement et du diamètre médian des sédiments du lit de la rivière.
- **Paramètre des particules** : Caractérise la mobilité des particules sédimentaires dans un écoulement.
- **Puissance de courant unitaire** : Caractérise l'énergie du courant dans l'écoulement pour déterminer la capacité du courant à transporter les sédiments.
- **Paramètre de vitesse adimensionnel** : Caractérise l'énergie cinétique de l'écoulement dans le cours d'eau.

En calculant l'ensemble de ces variables pour un écoulement donné, le comportement hydro-sédimentaire d'un cours d'eau peut être caractérisé de manière quantitative. Les cours d'eau présentant des valeurs similaires ont un comportement sédimentaire semblable. Par conséquent, il est possible d'utiliser les données similaires à celles d'un cours d'eau à l'étude pour évaluer la performance des équations de transport solide. Cette approche simplifie l'analyse du

phénomène de transport sédimentaire, permet de réduire le nombre de variables prédictives et créer des domaines d'application comparable pour les équations de transport solide [27]. Cela permet de tirer parti des données homogènes pour améliorer la précision des estimations de transport sédimentaire dans un contexte semblable à celle de la rivière à l'étude. Le tableau 8.3 présente les domaines de mesures des cinq paramètres adimensionnelles significatifs.

TABLEAU 8.3 Le domaine des paramètres adimensionnels significatifs du débit solide par charriage des données collecté dans la littérature

Paramètre	Équation	Domaine
Nombre de Froude	$\frac{q}{\sqrt{ghh}}$	0.00879 - 4.89
Débit unitaire adimensionnel	$\frac{q}{U_* d_{50}}$	0.449 - 3.29E6
Paramètre des particules	$\frac{\nu U_*}{g(S-1)d_{50}^2}$	3.17E-7 - 21.35
Puissance de courant unitaire	$\frac{US_o}{\omega}$	2.77E-5 - 11.25
Paramètre de vitesse adimensionnelle	$\frac{U^3}{gd_{50}\omega}$	4.895E-5 - 3865

Le tableau 8.3 montre que le domaine des cinq paramètres adimensionnels possède une grande variabilité. Toutefois, il est plus facile de déterminer si deux écoulements sont similaires en utilisant uniquement ces cinq paramètres significatifs comparativement aux 24 variables dimensionnelles définissant les conditions hydrauliques, physiographiques et sédimentaires. De plus, les multiples équations de transport solide utilisent différents entrants pour estimer le débit solide, rendant la comparaison des domaines d'application des équations complexes.

8.2 Extraction des listes de données au comportement sédimentaire homogènes

Afin de quantifier le degré de similarité des données, différents tests tels que le test de Levene et le test de Student peuvent être utilisés. Ces tests permettent d'évaluer statistiquement la similitude entre les ensembles de données et de vérifier si les différences observées sont significatives [214].

L'utilisation de données homogènes pour caractériser un écoulement permet de simplifier l'analyse de son comportement et facilite la calibration et l'utilisation des algorithmes d'estimation [186]. De nombreuses formules de transport des sédiments et modèles de régression

ne traitent pas le phénomène d'hétéroscédasticité présent dans un ensemble de données hétérogènes [90]. De plus, il est plus simple d'interpréter le comportement d'un écoulement en travaillant avec un domaine de variables significatives plus restreint.

L'utilisation exclusive de données strictement homogènes peut entraîner une perte de diversité des comportements étudiés ainsi que des informations complémentaires sur le transport sédimentaire [215]. Cela signifie que l'exclusion de certaines données peut conduire à des conclusions limitées et non représentatives d'une population plus large. C'est pourquoi une base de données complète est indispensable. La base de données utilisée dans cette étude comprend 11 463 mesures de transport sédimentaire, couvrant une gamme largement hétérogène de variables mesurées. L'objectif de la formation d'une liste de données homogènes est d'extraire de la base de données générale les données strictement similaires aux conditions d'écoulement d'une rivière à l'étude. Ainsi, la sous-section suivante présente l'approche développée pour extraire les données homogènes d'un écoulement.

8.2.1 Création des listes de données similaires d'un écoulement à l'étude

Différents paramètres adimensionnels significatifs sont calculés pour quantifier le comportement du transport sédimentaire dans une rivière. Après avoir défini les caractéristiques d'une rivière à l'étude, il est possible de recueillir l'ensemble des données mesurées présentant des paramètres similaires. Afin d'assurer l'homogénéité des données collectées, un test de Levene et un test T de Student sont effectués. La figure 8.3 illustre les étapes de l'algorithme d'extraction des listes de données homogènes. Les sous-sections suivantes détaillent la méthodologie pour générer une liste de données homogènes d'une rivière à l'étude.

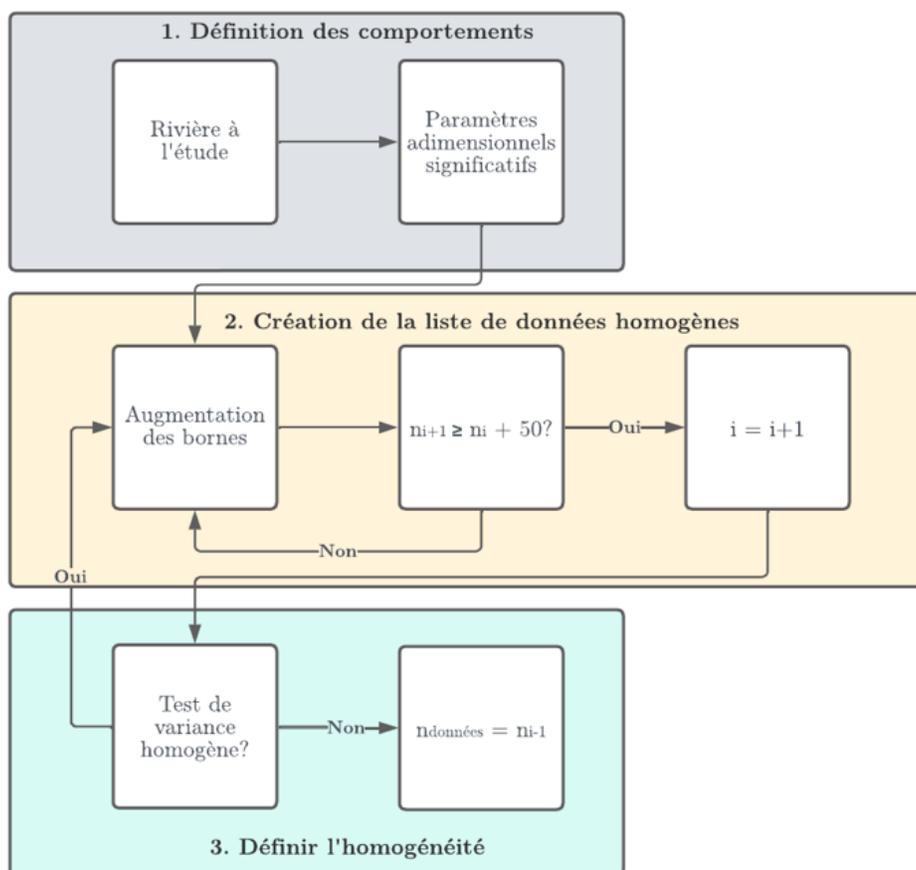


FIGURE 8.3 Étapes de l'algorithme d'extraction des listes de données similaires pour un écoulement à l'étude

Extraction de la liste de données homogènes

Pour extraire des données homogènes de transport sédimentaire spécifiques à une rivière étudiée, il est d'abord nécessaire de calculer les paramètres adimensionnels significatifs. Ensuite, les mesures de la base de données générale dont les valeurs se situent dans une plage de plus ou moins 0,01% des valeurs calculées sont sélectionnées. Cette plage est suffisamment restreinte pour ne pas affecter de manière significative la sélection des données. Un critère d'inclusion d'au moins 50 données est fixé pour garantir une représentation adéquate. Si ce seuil n'est pas atteint, la plage est élargie par incréments de 0,01%. La figure 8.4 illustre un exemple numérique de l'algorithme utilisé pour étendre le domaine des données homogènes, en prenant comme exemple un nombre de Froude de 0,75.

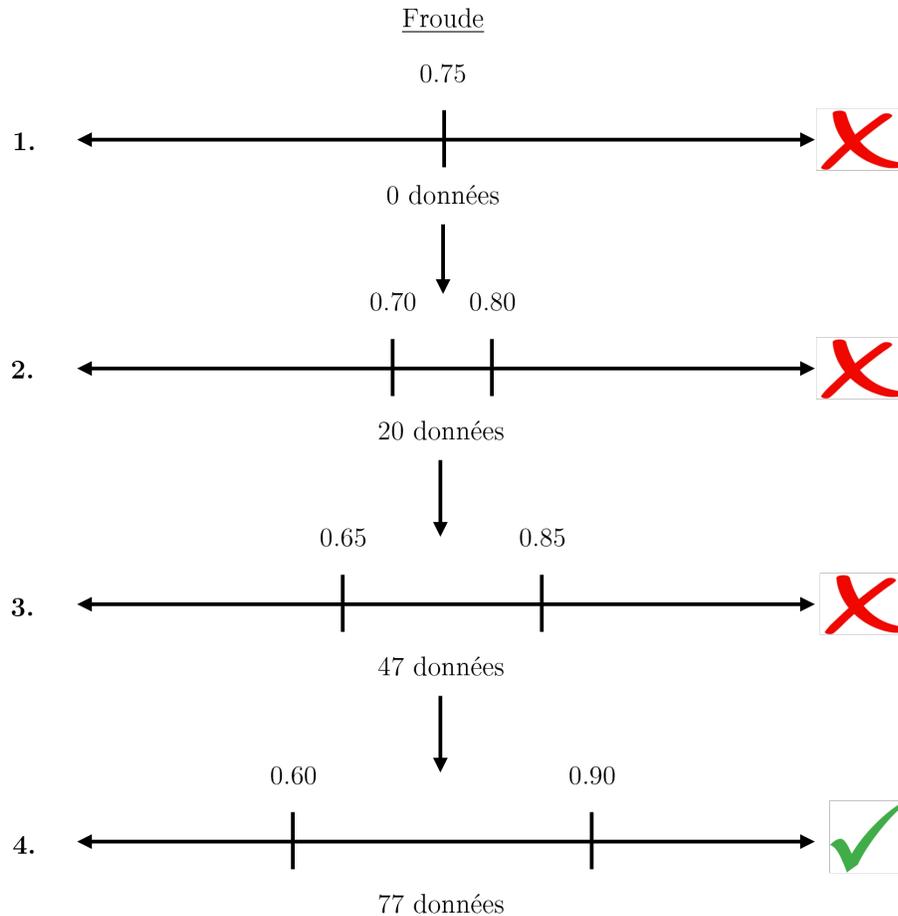


FIGURE 8.4 Exemple numérique de l'élargissement du domaine pour une valeur initiale du nombre de Froude de 0.75 pour l'extraction d'une liste de données similaires à un écoulement à l'étude

L'exemple utilisé à la figure 8.4 considère des bonds de 0.05 à titre d'exemple. Prendre note que l'algorithme utilise une incrémentation de 0.01%. Cette faible augmentation du domaine permet de trouver le domaine minimal contenant le nombre de données désiré. Pour cet exemple, un total de quatre itérations est nécessaire pour obtenir une liste contenant plus de 50 données. Dans le cadre de plusieurs variables, le critère pour inclure une donnée doit être respecté pour l'ensemble des variables adimensionnelles simultanément.

Test de la variance et homogénéité des données

Afin d'établir la similarité des données, une variable de comparaison est nécessaire. Dans le domaine hydrosédimentaire, le paramètre permettant de déterminer cette homogénéité est le transport sédimentaire. Cependant, les débits solides ne peuvent pas être comparés pour

déterminer la similarité du comportement, car ceux-ci sont proportionnels à la largeur du canal. Par conséquent, l'utilisation de la concentration volumique est plus appropriée pour évaluer la similarité du comportement sédimentaire entre deux canaux, en raison de son caractère adimensionnel.

Différentes tailles de listes de données similaires (50, 100, 150, etc.) sont générées en élargissant le domaine des paramètres adimensionnels pour une rivière à l'étude. Ensuite, des tests de Levene sur la variance et de Student sur la moyenne sont effectués pour évaluer l'homogénéité entre chaque liste générée. Le critère d'admissibilité pour considérer une variance et une moyenne homogène est $P_{value} \geq 0.05$ pour les deux tests.

Les tests d'homogénéité sont réalisés à la fois sur la liste de données complète et sur les nouvelles données ajoutées. La figure 8.5 présente un exemple de la méthode utilisée pour déterminer l'homogénéité des listes de données.

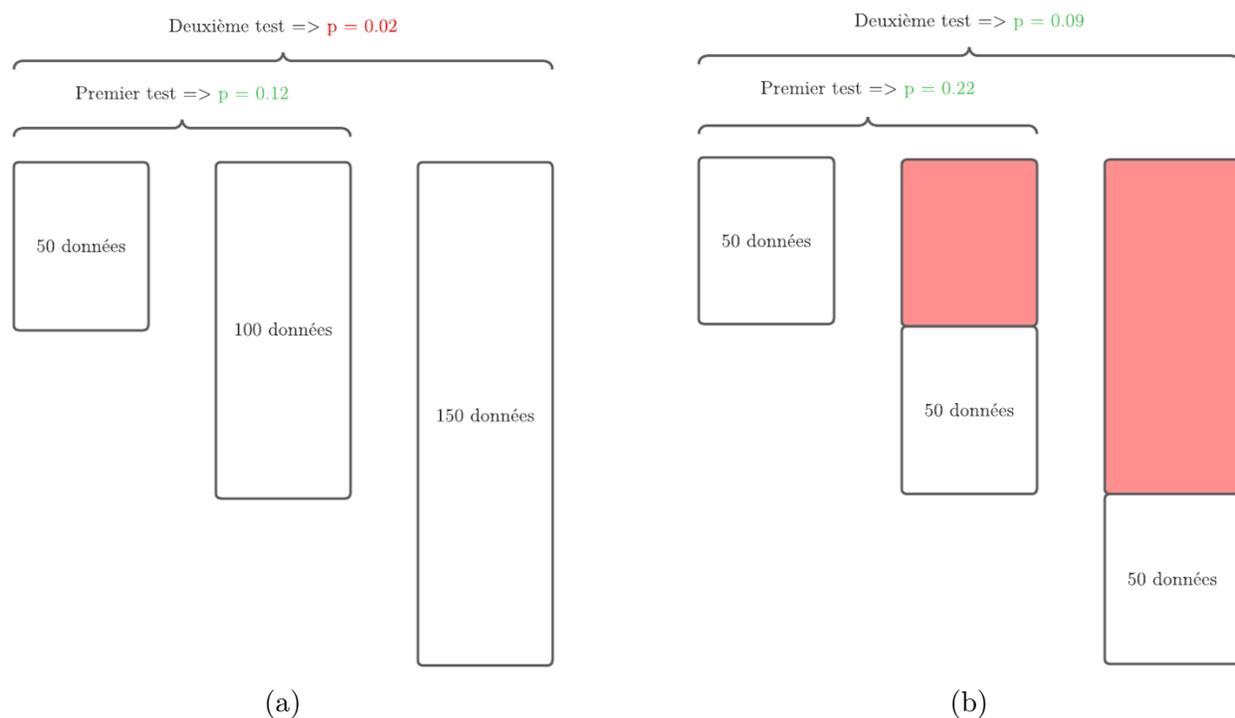


FIGURE 8.5 Exemple de l'application du test d'homogénéité de la moyenne et la variance pour différente taille de liste de données **a)** en considérant l'ensemble des données **b)** en considérant chaque groupe de nouvelles données ajoutées

La figure 8.5 montre un exemple dans lequel trois incréments de 50 données sont ajoutés. Il est observé que les listes comprenant 50 données et 100 données sont considérées comme étant homogènes. Cependant, l'ajout des 50 dernières données ne satisfait pas le critère

d'homogénéité établi. Ainsi, un total de 100 données doit être considéré pour estimer le débit solide dans ce cas précis. Finalement, il est nécessaire de trier les données dans le but de favoriser la similarité entre les données de la liste et celles de la rivière à l'étude.

8.2.2 Tri des données

Une fois la liste de données homogènes construite et leur homogénéité confirmée, il est possible de procéder à une étape supplémentaire visant à exclure certaines données indésirables. Il est important de prendre en considération les limites potentielles à imposer à la liste de données similaires afin d'assurer la qualité des données. Ces limites sont fonction des dates de mesures, des conditions de mesures et des données aberrantes.

Date de la mesure

Il existe plus de 100 ans de mesures collectées dans le domaine de l'hydraulique des sédiments. Cependant, il a été démontré que les instruments de mesure et les montages expérimentaux récents sont plus précis [216]. Le tableau 8.4 présente le nombre de données pour des périodes de 20 ans à partir de l'année 1880.

TABLEAU 8.4 Le nombre de données de mesure du transport sédimentaire en fonction des périodes de 20 ans

Années	Nombre de données
1880 - 1900	716
1900 - 1920	1076
1920 - 1940	1659
1940 - 1960	1233
1960 - 1980	3239
1980 - 2000	3414
2000 - 2020	126
Total	11 463

La majorité des données (6653) ont été collectées entre 1960 et 2000. L'une des raisons de cette augmentation du nombre de mesures après les années 1960 est l'intensification de la recherche sur les équations de transport solide. Puisque la période de collecte des données s'étend sur plus de 100 ans, il est possible de restreindre le domaine des dates afin de garantir que les mesures ont été prises dans un environnement récent. Toutefois, il est important de trouver un équilibre entre le nombre et la qualité des données utilisées.

Conditions de mesure

Les conditions de mesure dépendent principalement de l'environnement dans lequel elles ont été effectuées, tel qu'un montage expérimental ou un environnement naturel. La différence majeure entre ces deux types de mesures réside dans le contrôle des incertitudes. La base de données hydrosédimentaire recense un total de 5987 mesures terrains et 5476 mesures expérimentales.

Les mesures expérimentales sont généralement plus précises en raison du contrôle des paramètres. Cependant, cette précision se fait au détriment de la représentation de la variabilité aléatoire du comportement sédimentaire observé dans les rivières naturelles [173]. Par conséquent, si la rivière à l'étude est connue pour présenter une physiographie hétérogène, il peut être pertinent d'exclure les données expérimentales de la liste de données homogènes.

Données aberrantes

Malgré l'extraction d'une liste de données au comportement sédimentaire similaire, il est possible de retrouver des données aberrantes. Pour traiter ces données, il est préférable d'utiliser la médiane, car celle-ci n'est pas influencée par la présence d'une donnée fortement aberrante, contrairement à la moyenne [217]. Toutes les concentrations de la liste de données homogènes dépassant trois fois l'écart absolu médian sont exclues de la liste de données homogène (Éq. 8.1).

$$Données_{exclues} = \left[median \pm 3 \left(\frac{-1}{-0.4769\sqrt{2}} \right) (median|X - median(X)|) \right] \quad (8.1)$$

Afin de garantir une meilleure homogénéité, il est possible de réduire l'intervalle entre la médiane et l'écart absolu médian. Cependant, cette approche peut entraîner l'exclusion d'un grand nombre de données de la liste homogène, entraînant une perte d'informations sur le comportement de la rivière à l'étude.

CHAPITRE 9 ESTIMATION DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS AVEC LA RÉGRESSION PAR PROCESSUS GAUSSIEN ET L'ALGORITHME ENSEMBLISTE

Diverses méthodes existent pour développer des équations dans le but de quantifier le transport sédimentaire [8]. L'une des approches les plus couramment utilisées consiste à construire un modèle déterministe basé sur une régression linéaire fondée sur des principes physiques [94]. Toutefois, des approches stochastiques sont également employées pour fournir un éventail de possibilités en tenant compte des incertitudes du système [179]. L'objectif est de développer un outil de calcul utilisant la régression par processus gaussien et un algorithme ensembliste pour estimer le transport sédimentaire d'un écoulement.

D'une part, la régression par processus gaussien (RPG) représente une méthode stochastique permettant de modéliser les relations complexes entre différentes variables dans un environnement donné [186]. Dans le contexte du transport sédimentaire, cette approche permet d'établir des liens entre les comportements hydrauliques et physiographiques d'un cours d'eau et son comportement sédimentaire. La RPG utilise la distribution gaussienne pour modéliser le comportement des variables sortantes d'un système [218]. En raison de ses estimations probabilistes, la RPG permet de déterminer le débit solide et d'évaluer l'incertitude associée à cette quantité.

D'autre part, l'algorithme ensembliste a pour objectif d'améliorer les estimations des modèles en combinant les estimations de plusieurs modèles individuels. Son concept fondamental repose sur l'idée que la fusion de différents modèles existants permet d'obtenir des résultats plus précis et robustes que ceux obtenus par les modèles individuels pris séparément [219,220]. Ainsi, plus un domaine de recherche possède une diversité de modèles riches, plus l'algorithme ensembliste a le potentiel d'améliorer les estimations.

Dans le cadre du transport des sédiments, on recense plus d'une centaine d'équations de transport solide, favorisant les performances de cet algorithme [8]. La figure 9.1 présente l'approche utilisée pour l'application de la régression par processus gaussien et l'implémentation de l'algorithme ensembliste.

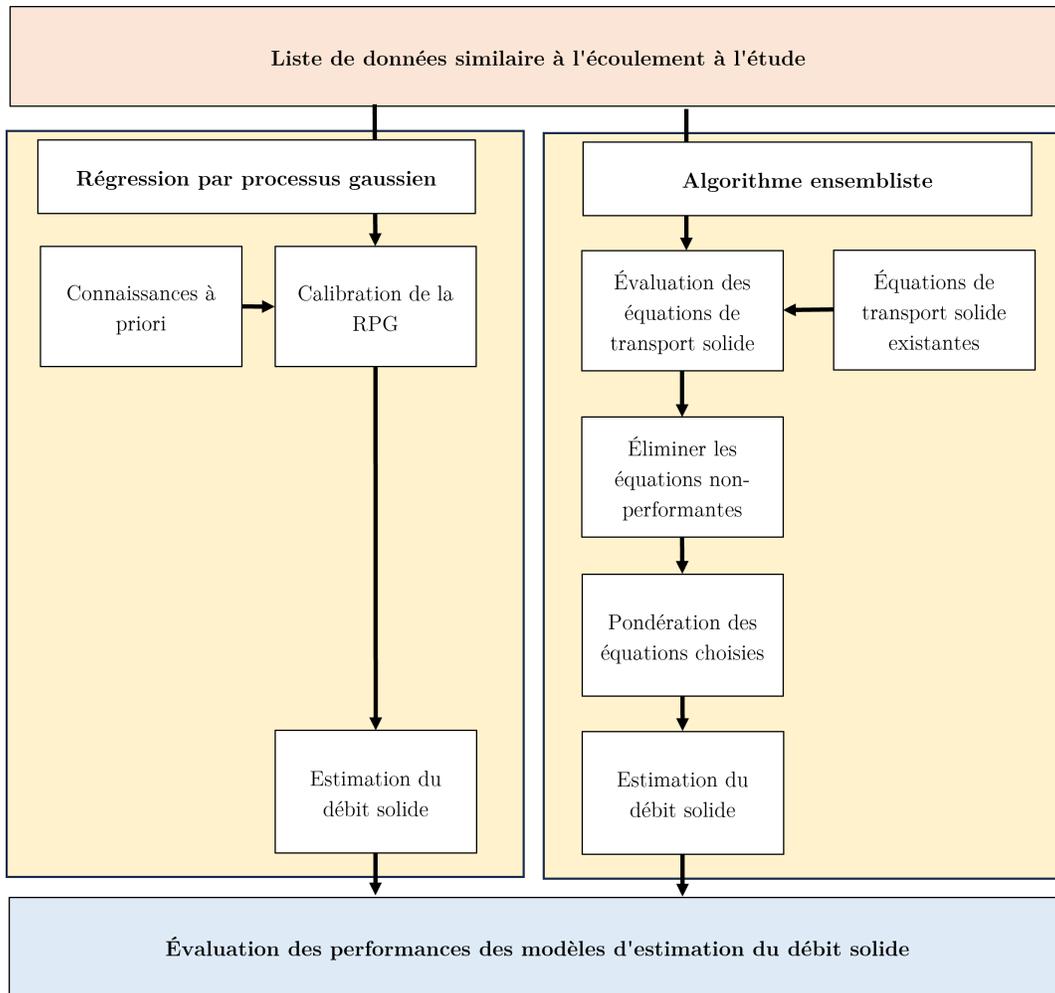


FIGURE 9.1 Méthodologie pour la régression par processus gaussien et l'implémentation de l'algorithme ensembliste

Telle que présentée dans la figure 9.1, l'implémentation de ces algorithmes peut être segmentée en quatre sections distinctes. La première étape consiste à développer un ensemble homogène de données pour un écoulement étudié, tel que présenté au chapitre 8. À l'aide de cet ensemble de données homogènes et des connaissances à priori des interactions entre les variables prédictives et le flux sédimentaire, il est possible de calibrer la régression par processus gaussien. En parallèle, il est possible d'évaluer la performance des équations de transport solide existantes en fonction des estimations obtenues pour des données similaires à celles de la rivière à l'étude. Cette évaluation des performances, basée sur la racine de la somme des résidus au carré moyen (RMSE) et des tests d'homogénéité des estimations, permet d'identifier les équations appropriées à combiner avec l'algorithme ensembliste pour estimer le débit solide de la rivière à l'étude.

9.1 Régression par processus gaussien

La régression par processus gaussien (RPG) est une méthode stochastique permettant de générer une plage d'estimations probabilistiques. Cette approche est particulièrement adaptée au calcul du débit solide, car elle intègre les incertitudes inhérentes au phénomène dans ses prédictions. La section suivante détaille son application dans le domaine du transport sédimentaire ainsi que le processus de calibration associé.

9.1.1 Caractérisation de la RPG en transport sédimentaire

En transport sédimentaire, la RPG repose sur la corrélation entre les paramètres hydrauliques et physiographiques pour estimer le comportement des sédiments. Cette méthode intègre une composante stochastique pour prédire les variables de sortie. Il est donc essentiel de définir les composantes clés du modèle RPG avant d'entamer la calibration. Les éléments à paramétrer incluent : la fonction a priori, la fonction de covariance, la longueur de dépendance, l'incertitude liée au système, l'incertitude des mesures, ainsi que le nombre d'itérations nécessaires à l'optimisation des paramètres.

Fonction à priori

La fonction a priori permet de formuler les hypothèses initiales du modèle. Elle fournit une estimation du débit solide dans les zones où les données sont peu nombreuses. Dans le domaine du transport sédimentaire, la fonction a priori peut être basée sur une concentration fixe, variable, ou sur une équation de transport solide existante. Étant donné la variabilité des performances des différentes équations de transport solide, la moyenne des concentrations issues de la liste de données homogènes est choisie comme fonction a priori pour assurer une meilleure représentativité des conditions.

Fonction de covariance

La fonction de covariance décrit la relation entre différentes valeurs d'une même variable explicative, mettant ainsi en évidence l'importance des paramètres d'entrée pour le modèle. Cette fonction doit être statistiquement symétrique afin de représenter correctement le comportement du système. Trois fonctions de covariance ont été sélectionnées pour estimer le débit solide : la fonction gaussienne, la fonction de Matern et la fonction rationnelle quadratique. Ces fonctions sont retenues pour leur symétrie et leur comportement distinct, permettant ainsi de mieux évaluer l'impact de la fonction de covariance sur l'estimation du débit solide.

Longueur de dépendance

La longueur de dépendance exprime l'influence des covariables sur l'estimation du modèle. Ainsi, des variables avec une longueur de dépendance plus faible exercent une influence plus significative sur l'estimation. Cinq longueurs de dépendance, correspondant à chaque variable adimensionnelle significative, sont calibrées pour l'estimation du débit solide. Il est cependant difficile de déterminer si l'optimisation des paramètres aboutit à un maximum local ou global. Les différents points de départ pour les longueurs de dépendance sont fixés à 5%, 10%, et 25% du domaine des paramètres adimensionnels de la liste de données homogènes.

Incertitude sur le comportement du système

L'incertitude sur le comportement du système décrit la plage d'estimations les plus probables pour des entrées données. Ce paramètre permet de quantifier l'incertitude d'une estimation dans des zones où la densité de données est faible. Comme pour la longueur de dépendance, les points de départ choisis pour l'incertitude sont fixés à 5%, 10%, et 25% du domaine de la concentration dans la liste de données homogènes.

Incertitude sur la mesure

Les mesures du flux sédimentaire comportent des incertitudes liées aux méthodes de collecte. Celles-ci peuvent provenir de collecteurs de sédiments pour le transport par charriage ou d'échantillons d'eau pour le transport en suspension. Dans le cadre de la régression par processus gaussien, ces incertitudes sont modélisées à l'aide d'une loi normale. Les points de départ utilisés pour ces incertitudes sont fixés à 0,05%, 0,1% et 0,5% du domaine de concentration de la liste de données homogènes.

Nombre d'itérations pour l'optimisation des paramètres.

Le nombre d'itérations lors de l'optimisation des paramètres de calibration influence directement la précision et le temps de calcul de la régression. Il est donc crucial de trouver un équilibre entre la minimisation du nombre d'itérations et le maintien d'une précision optimale. Les valeurs étudiées pour le nombre d'itérations sont 10, 100 et 1000, afin de déterminer l'impact de chacune sur la performance du modèle.

9.1.2 Analyse de sensibilité de la RPG

Les différents points de départ prévus permettent de faire une analyse de sensibilité sur les conditions initiales de la calibration. Le tableau 9.1 montre les points de départ initiaux pour chaque variable lors de la calibration. Il est possible qu'une longueur de dépendance de 10% soit mieux adapté pour la loi normale et 5% pour la loi Matern. Toutefois, chaque analyse de sensibilité est complétée en variant un seul paramètre à la fois.

TABLEAU 9.1 Les différents paramètres utilisés pour les analyses de sensibilités reliés à la calibration de la régression par processus gaussien

Paramètres	Variations
Fonction de covariance	Normal
	Matern
	Quadratique rationnelle
$l(x_i)$	5%
	10%
	25%
σ_G (Concentration)	5%
	10%
	25%
σ_V (Concentration)	0.05%
	0.1%
	0.5%
Nombre d'itérations	10
	50
	500

9.1.3 Calibration de la RPG

Après déterminer les paramètres initiaux, il est possible d'utiliser l'outil GPML Toolbox de MATLAB pour calibrer la RPG en fonction des variations choisies [218]. Le GPML Toolbox

permet de facilement calibrer une régression par processus gaussien en utilisant des inférences bayésiennes pour estimer les paramètres optimaux de la régression. De plus, il permet d'utiliser la régression par processus gaussien calibré pour faire l'estimation du débit solide. Cet outil permet également l'implémentation de différentes fonctions de covariance telles que la distribution Normale, la covariance de Matern et la quadratique rationnelle pour faciliter l'évaluation des analyses de sensibilité des paramètres sur les performances de la régression.

La calibration doit être répétée pour chaque rivière ou cours d'eau à l'étude, car elle utilise la liste de données homogènes propre à celles-ci. Ainsi, le temps de calcul de la calibration est un facteur important lors de l'implémentation de la méthode. C'est pourquoi utiliser un outil de qualité avec documentations, exemples et un support de la communauté est pertinent dans le cadre de l'implémentation d'une régression par processus gaussien.

9.2 Algorithme ensembliste

Cette approche permet de combiner multiple équation de transport solide existante pour que les forces d'une équation corrigent les faiblesses d'une autre. Ainsi, il est nécessaire de déterminer quelles équations peuvent être utilisées avec l'algorithme ensembliste. De plus, différents tests assurent que la diversité du modèle n'est pas polluée par des équations de mauvaise performance pour le domaine étudié. Pour ce faire, les équations de transport solide les plus performantes pour une rivière à l'étude sont déterminées en utilisant les listes de données similaires de cet écoulement. Cette sous-section présente les équations de transport solide utilisées et l'approche pour déterminer la combinaison des équations de transport solide.

9.2.1 Implémentation des équations de transport solide existantes.

L'objectif d'utiliser plusieurs équations de transport solide pour l'algorithme ensembliste est d'augmenter la diversité des modèles utilisés pour inclure un plus grand domaine d'application de l'algorithme. La performance du modèle ensembliste peut favoriser les différentes approches, telles que la contrainte de cisaillement, l'approche probabiliste, la minimisation de l'énergie, etc [18]. Toutefois, il doit être pris en considération que la qualité des équations a un impact direct sur la performance de l'algorithme [221]. De ce fait, les équations de transport solide choisies doivent avoir des résultats d'estimations vérifiés par des investigations d'équation de transport solide.

Des cas de validation détaillés sont faits pour qu'une équation soit choisie dans l'algorithme ensembliste. Ce critère permet d'assurer que l'implémentation des équations de transport

solide soit faite de façon adéquate et qu'il n'y ait pas d'erreurs numériques liées à une erreur de programmation. Le tableau 9.2 présente les différentes équations utilisées pour l'algorithme ensembliste.

TABLEAU 9.2 – Liste d'équations de transport solide existantes utilisées pour l'algorithme ensembliste

Auteurs	Équation
Ackers et White réviser (1990)	$X = \frac{G_{gr} d_{50} (\gamma_s / \gamma) \left(\frac{V}{U_*} \right)^{-n}}{D}$
Al-Rahman (2003)	$X = 55.1 \left(\frac{U}{U_{to}} \right) + 10164.1 \left(\frac{R_h}{B} \right) + 144.7 \left(\frac{\nu}{\omega d_{50}} \right) - 449.3$
Arrifin (2004)	$X = 0.00001156 \left(\frac{R_h}{h} \right)^{0.716} \left(\frac{U_{to}}{\omega} \right)^{-0.975} \left(\frac{U_{to}}{U} \right)^{0.507} \left(\frac{U^2}{gh} \right)^{0.524}$
Bagnold (1956)	$X = \frac{a U_{to}^3 S}{(S-1) U h g} \left(1 - \frac{t_{o*} (g d_{50} (S-1))}{U_{to}^2} \right)$
Bagnold (1966))	$q_b = \frac{\tau V e_b}{\tan(\alpha)} \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma}$
Bagnold (1980))	$q_b = i_{b*} \left(\frac{\omega_{w0}}{\omega_{w0*}} \right)^{3/2} \left(\frac{h}{h_*} \right)^{-2/3} \left(\frac{d_{50}}{d_{50*}} \right)^{-1/2}$
Copeland et Laursen (1989)	$X = 0.01 \rho g \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{cr}} \right) F$
Dubois (1879)	$q_b = \frac{0.173}{d_{50}^{3/4}} \tau (\tau - \tau_{cr})$
Einstein (1950)	$i_{BW} q_{bw} = \phi_* i_{bw} \rho_s g \left(\frac{\rho}{(\rho_s - \rho) g d_{50}^3} \right)^{-1/2}$
Engelund et Hansen (1967)	$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}}$
Fazle-Karim (1998)	$q_s = 0.00139 \left(\frac{U}{(g(S-1)d_{50})^{1/2}} \right)^{2.97} \left(\frac{U_*}{\omega} \right)^{1.47} (g(S-1)d_{50})^{1/2}$

TABLEAU 9.2 – Liste d'équations de transport solide existantes utilisées pour l'algorithme ensembliste (suite)

Auteurs	Équation
Graf (1968)	$X = 10.39S(S - 1)^{-2.02} \frac{d_{50}^{-1.02}}{UhU_*^{-5.04}}$
Laursen (1958)	$X=0.01 \left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{7/6} \left(\frac{U^2}{58Y_c d_{50} g(S-1)} \left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{1/3} - 1\right) F$
Meyer-Peter (1934)	$q_b = \left(\left(\frac{q^{2/3} S}{d_{50}} - 17\right) \frac{d}{0.4}\right)^{3/2}$
Meyer-Peter et Müller (1948)	$q_b = \left(\frac{\gamma \left(\frac{K_s}{K_r}\right)^{3/2} R_h S - 0.047(\gamma_s - \gamma)d}{0.25\rho^{1/3}}\right)^{3/2}$
Rottner (1959)	$q_b = \rho S ((S - 1)gh^3)^{1/2} \left(\frac{U}{((S-1)gh)^{1/2}} \left(0.667 \left(\frac{D}{h}\right)^{2/3} + 0.14\right) - 0.778 \left(\frac{d_{50}}{h}\right) 2/3\right)^3$
Schoklitsch (1934)	$q_b = 2500S^{3/2}(q - q_c)$
Shen et Hung (1972)	$\log C = -107404.45938164 + 324214.74734085Y - 326309.58908739Y^2 + 109503.87232539Y^3$
Shields (1934)	$q_b = 10 \frac{\tau - \tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)d'} \frac{q\gamma S}{\gamma_s}$
Smart (1984)	$X = 4.2S_0 \left(\frac{U}{(ghS_0)^{1/2}}\right) \left(\frac{hS_0}{d_{50}(S-1)}\right)^{1/2} \left(\frac{hS_0}{d_{50}(S-1)} - \tau_*\right)$
Yang (1973)	$\log(C) = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{\omega} + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{\omega}\right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega}\right)$
Yang (1984)	$\log(C) = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 4.816 \log \frac{U_*}{\omega} + \left(2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.282 \log \frac{U_*}{\omega}\right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega}\right)$
Yang (1995)	$\log(C) = 5.165 - 0.153 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.297 \log \frac{U_*}{\omega} + \left(1.780 - 0.360 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.480 \log \frac{U_*}{\omega}\right) \log \frac{VS}{\omega}$

Le tableau 9.2 montre qu'il y a un total de 23 équations choisies pour l'algorithme ensembliste. Cette diversité permet de couvrir un plus grand domaine de conditions hydrauliques et physiographiques lors de l'estimation du débit solide. Puisque les variables prédictives utilisées pour définir l'homogénéité de la liste de données d'entraînement sont adimensionnelles, la concentration est utilisée pour définir le transport des sédiments (Eq. 9.1).

$$C = \frac{10^6 Q_s}{Q \rho} \quad (9.1)$$

Où :

C = Concentration (PPM)

Q_s = Débit solide (kg/s)

Q = Débit liquide (m^3/s)

ρ = Masse volumique de l'eau (kg/m^3)

9.2.2 Sélection des équations de transport solide pour l'algorithme ensembliste

Il est important de déterminer les équations de transport solide adéquates à implémenter dans l'algorithme ensembliste pour éviter l'influence d'estimations fortement erronées. La méthode pour sélectionner les équations de transport solide à utiliser pour un écoulement à l'étude est de comparer les mesures du débit solide de la liste de données homogènes aux estimations du débit solide des équations de transport solide. Pour ce faire, un test de la variance de Levene est utilisé entre les estimations et les mesures. Un critère du p_{value} est fixé pour déterminer quelles équations sont adéquates. Une analyse de sensibilité est faite pour déterminer quelle valeur du p_{value} augmente la performance de l'algorithme d'ensembliste. Le tableau 9.3 présente les différentes valeurs de l'analyse de sensibilité du critère du p_{value} pour investiguer l'homogénéité des estimations des équations de transport solide existantes.

TABLEAU 9.3 Les différentes valeurs du critère du p_{value} utilisées pour l'analyse de sensibilité dans l'optique d'investiguer l'homogénéité des estimations des équations de transport solide existantes

Critère du P_{value}
$>10^{-100}$
$>10^{-10}$
$>10^{-5}$
>0.01
>0.05

La valeur maximale utilisée pour définir si une estimation est similaire aux données mesurées est $p_{value} \geq 0.05$. Cette valeur est souvent utilisée pour accepter ou rejeter une hypothèse. Toutefois, dans le cadre de l'algorithme ensembliste, il est important d'avoir une diversité des modèles pour améliorer les résultats des prédictions. C'est pourquoi le critère décroît jusqu'à un $p_{value} \geq 10^{-100}$. Cependant, il est important de s'assurer que les équations qui passent ce critère ne polluent pas l'estimation du modèle à l'aide de différente approche pour évaluer les équations aberrantes.

Pondération des équations sélectionnées

Avec les équations de transport solide choisies pour estimer le débit solide d'une rivière à l'étude, il est nécessaire de déterminer la pondération de chaque équation pour l'utilisation de l'algorithme ensembliste. Puisque certaines équations choisies sont meilleures pour les cas étudiés, une moyenne non pondérée peut augmenter l'erreur d'estimation. Puisque les équations ont été testées sur une liste de données homogène, la moyenne de la racine de la somme des résidus au carré (RMSE) est un critère adéquat pour évaluer la performance d'une équation. La figure 9.2 présente les étapes de calcul pour la pondération des équations existantes lors de l'utilisation de l'algorithme ensembliste.

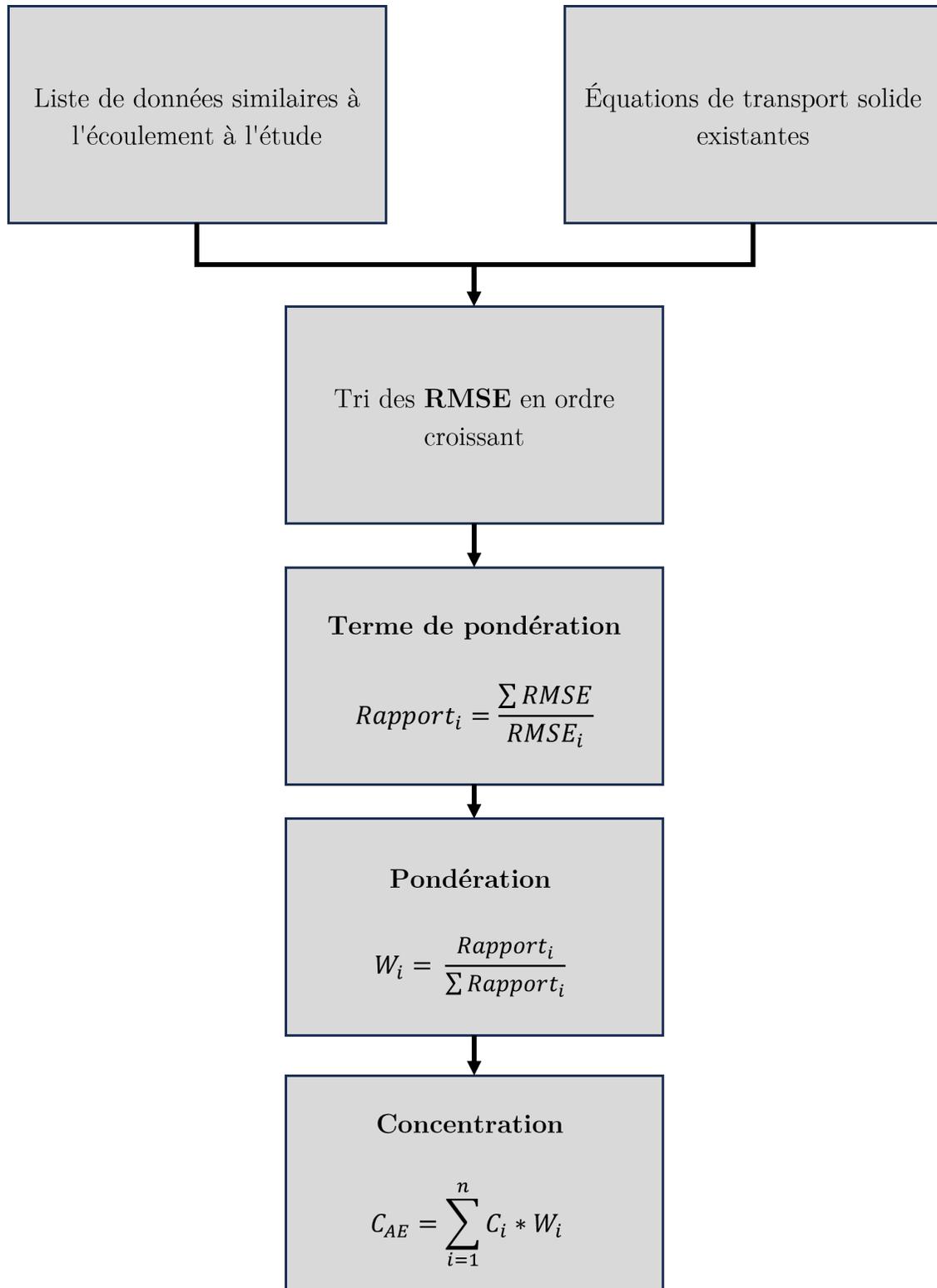


FIGURE 9.2 Processus de pondération des équations de transport solide existantes pour l'utilisation de l'algorithme ensembliste

Où :

- $RMSE_i$ = RMSE pour l'équation i
- $Rapport_i$ = Terme de calcul pour calculer la pondération
- W_i = Pondération de l'équation i
- C_{AE} = Concentration calculée par l'algorithme ensembliste
- C_i = Concentration de l'équation i

La première étape est de classer en ordre croissant les RMSEs des équations choisies. Prendre note que les RMSEs peuvent être nulles dans les scénarios sans mise en mouvement des sédiments puisque les concentrations de la liste de données similaires et estimées sont 0 PPM. De plus, il faut considérer que les RMSE sont au dénominateur (Fig. 9.2). De ce fait, si la valeur est nulle, une valeur de 0.1 est considérée pour éviter une erreur numérique. Contrairement à une moyenne pondérée traditionnelle, plus le RMSE est élevé, moins performante l'équation est considérée. L'étape suivante est de créer le vecteur des RMSEs en ordre croissant et la somme des RMSE des équations choisies préalablement (Eq. 9.2 et Eq. 9.3).

$$\mathbf{RMSE} = [RMSE_1 \ RMSE_2 \ \dots \ RMSE_n] \quad (9.2)$$

$$Facteur_{division} = \sum_{i=1}^n RMSE_i \quad (9.3)$$

Il faut utiliser l'inverse des RMSEs pour calculer le poids de chacune des équations. Cette pondération des équations est déterminée par les équations 9.4 et 9.5.

$$Rapport_{Pondération_i} = \frac{Facteur_{division}}{RMSE} \quad (9.4)$$

$$Pondération_i = \frac{Rapport_{Pondération_i}}{\sum_{i=1}^n Rapport_{Pondération_i}} \quad (9.5)$$

Malgré l'utilisation d'une liste de données homogènes pour la sélection des équations de transport solide pour une rivière à l'étude, certaines équations peuvent être dans un domaine d'extrapolation et estimer une valeur fortement erronée. Ainsi, un test pour déterminer si les estimations des équations sont aberrantes est réalisé (Eq. 8.1). Ces équations sont ensuite écartées et la pondération des équations est révisée (Eq. 9.6).

$$Pondération_{Corrigé} = \frac{Pondération_i}{\sum Pondération_{post-discarte}} \quad (9.6)$$

Lorsque l'ensemble des équations sont choisies et leur pondération définie, il est possible d'estimer le débit solide de la rivière à l'étude à l'aide de l'équation 9.7.

$$C_{AE} = \sum_{i=1}^n C_i \cdot Ponderation_{Corrigé_i} \quad (9.7)$$

9.2.3 Critères pour l'évaluation des performances des équations de transport solide existantes et des algorithmes développés

Racine de l'erreur quadratique moyenne

La racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est une mesure couramment utilisée pour évaluer la performance des modèles de prédiction dans les problèmes de régression. Ce critère permet de comparer l'efficacité de différents modèles avec une RMSE plus faible indiquant une meilleure performance. L'équation 9.8 illustre le calcul du RMSE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9.8)$$

Où :

n = Le nombre de données

y_i = La mesure pour la donnée i

\hat{y}_i = L'estimation pour la donnée i

La RMSE, en s'appuyant sur les erreurs d'estimation au carré, accorde un poids plus important aux écarts importants, rendant ainsi l'indicateur particulièrement sensible aux valeurs aberrantes. Dans des cas de prédictions très variables, comme la concentration de sédiments, qui peut fluctuer entre 0 et 1 000 000 PPM, les erreurs sur les faibles valeurs peuvent être négligées ou diluées. C'est pourquoi un autre critère de performance est employé en complément, afin de compenser cette limitation.

Moyenne des rangs

Le critère de la moyenne des rangs repose sur le classement de chaque modèle prédictif pour évaluer leur performance. De ce fait, il n'est pas influencé par les grandes erreurs d'estimation, ce qui en fait un complément efficace à la RMSE. Le tableau 9.4 illustre un exemple de calcul de la moyenne des classements en comparant cinq modèles hypothétiques différents.

TABLEAU 9.4 Exemple du calcul de la moyenne des rangs pour cinq modèles hypothétiques

Données	Rang des Modèles				
	M1	M2	M3	M4	M5
1	1	5	4	2	3
2	2	5	3	1	4
3	1	4	3	5	2
4	1	5	4	3	2
5	3	2	1	5	4
Moyenne	1,6	4,2	3	3,2	3

Le tableau 9.4 illustre que l'utilisation de cinq modèles différents implique que chaque donnée se voit attribuer un rang de 1 à 5, où 1 représente le meilleur modèle et 5 le moins performant pour cette donnée. Dans l'exemple présenté, le modèle 1 obtient le meilleur résultat avec une moyenne des rangs de 1,6. Il est attendu qu'aucun modèle ne soit classé premier pour toutes les données en raison des erreurs de mesure, de l'incertitude et des limites de la calibration du modèle. De plus, il convient de noter que plus le nombre de modèles comparés est élevé, plus la moyenne des rangs tend à être élevée. Cette approche est utilisée dans plusieurs domaines pour évaluer les performances de différents modèles d'estimations [222, 223].

CHAPITRE 10 RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus pour le montage expérimental, la qualité de la génération de données similaires associées à un écoulement d'eau, les performances d'estimation du débit solide fournies par le modèle de régression par processus gaussien et l'efficacité de l'algorithme ensembliste.

10.1 Analyse de l'incertitude des expérimentations

Lors d'expérimentations, les instruments de mesure et les protocoles expérimentaux présentent, de manière inhérente, une incertitude qui se reflète lors de la prise de données [197]. Les incertitudes des paramètres mesurés sont estimées par des analyses statistiques sur le débit liquide, la profondeur d'eau et le débit solide. Cette approche permet d'évaluer la fiabilité des résultats et de quantifier la variabilité des valeurs mesurées, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des incertitudes associées aux données expérimentales [224].

10.1.1 Incertitudes sur les mesures du débit liquide

Identifier les incertitudes sur le débit liquide est indispensable pour évaluer la répétitivité des expérimentations. Supposant aucune fuite notable dans le canal, il est possible de poser que le débit est uniforme sur l'ensemble du canal. Par conséquent, la variation analysée pour identifier les paramètres non contrôlés du débit liquide se concentre sur ses fluctuations temporelles. Lors des expérimentations, la vanne, initialement fermée, est ensuite ouverte selon le pourcentage d'ouverture désiré.

L'élévation de l'eau dans le château d'eau fait varier l'énergie de pression. Cette énergie est directement reliée au débit d'écoulement dans le canal [225]. Il est important d'évaluer l'incertitude générée par l'influence de la variation de l'élévation de l'eau dans le château d'eau. Pour ce faire, deux types de variation temporelle sont étudiés pour assurer la permanence de l'écoulement.

La première approche consiste à examiner les variations du débit à court terme. En fixant une marque sur la vanne, il est possible d'observer tout mouvement de celle-ci en fonction du temps. Il convient de noter qu'aucun mouvement n'a été observé au niveau de la vanne durant l'ensemble des expérimentations. Par conséquent, la principale source d'incertitude concernant la variation du débit à court terme dans le canal est attribuée à la fluctuation du niveau d'eau à l'intérieur du château d'eau. Le débit liquide est mesuré à l'aide d'un

débitmètre, avec un pas de temps de cinq secondes, sur une durée totale de deux minutes. Cela permet d'établir la moyenne du débit et d'exprimer son incertitude à l'aide de l'écart-type.

La deuxième incertitude liée au débit réside dans sa variation à long terme. Étant donné que le débit est influencé par l'élévation du niveau d'eau dans le château d'eau, il est possible que ce niveau fluctue durant la durée totale d'une expérimentation. Ainsi, le débit liquide est mesuré au début et à la fin de chaque expérimentation. Cela permet d'effectuer un test de Student entre les échantillons du débit initial et final afin de déterminer si les deux débits proviennent de la même population et, par conséquent, s'il y a eu une variation du débit dans le temps. La figure 10.1 illustre l'écart-type du débit instantané en fonction du débit d'écoulement moyen sur une période de mesure de deux minutes.

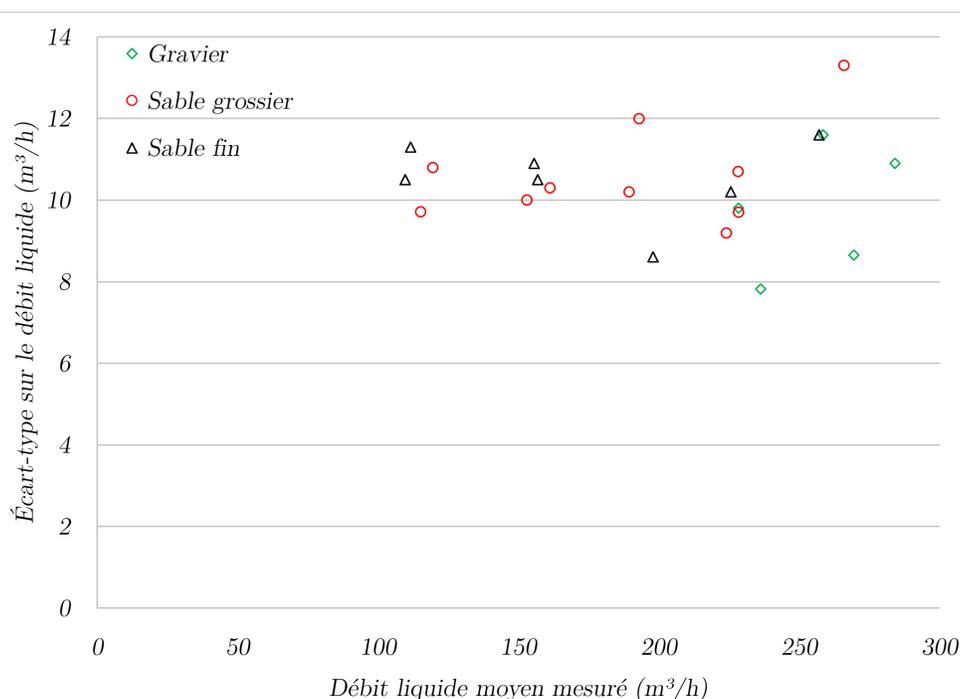
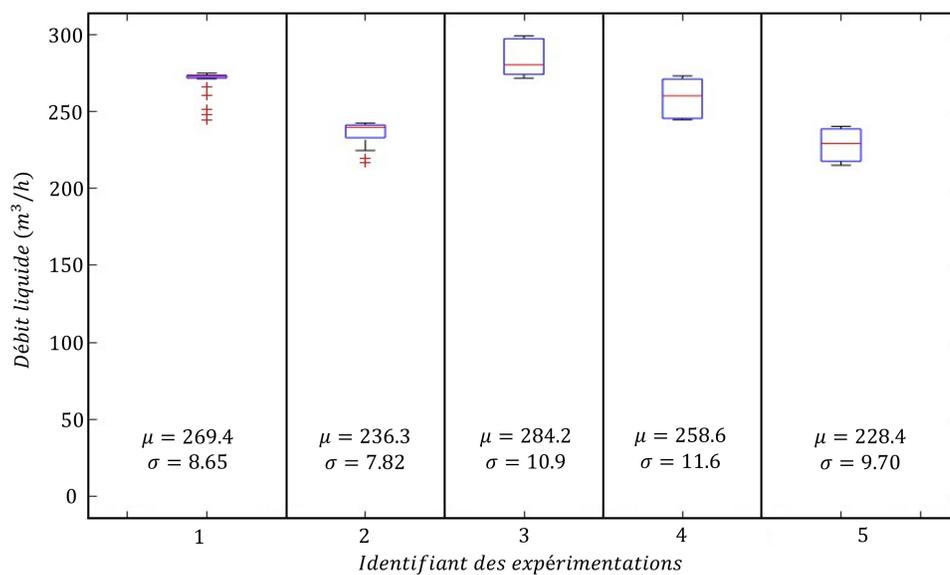
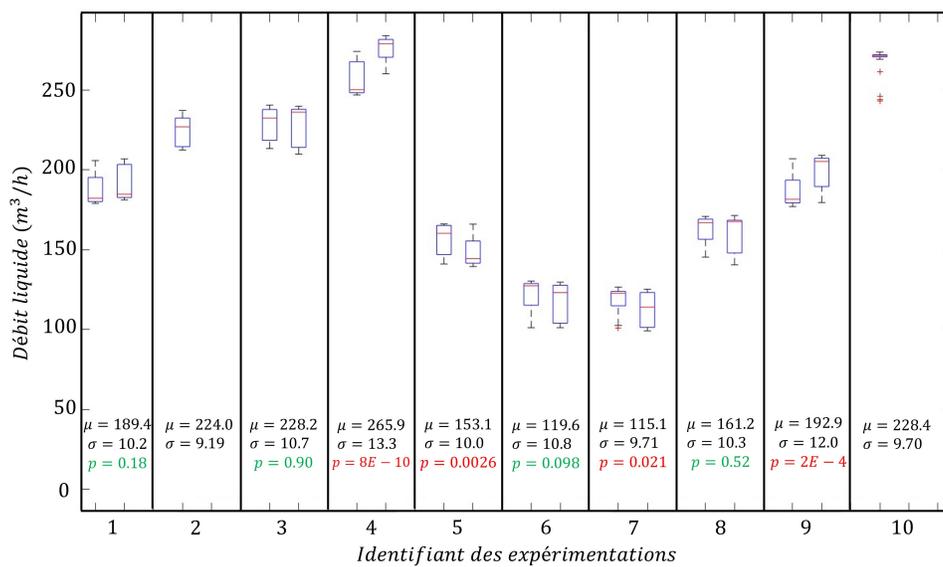


FIGURE 10.1 Variation du débit instantané en fonction du débit d'écoulement moyen

Il est possible d'observer que l'intensité des fluctuations du débit sur une période de mesure de deux minutes est indépendante du débit, avec une approximation de $10m^3/h$. Ainsi, le coefficient de variation du débit instantané varie de 4% à 10 % et est inversement proportionnel au débit d'écoulement moyen. En ce qui concerne la variation du débit à long terme, la figure 10.2 illustre cette variation en comparant le débit initial (à gauche) au débit final (à droite) pour chaque expérimentation.

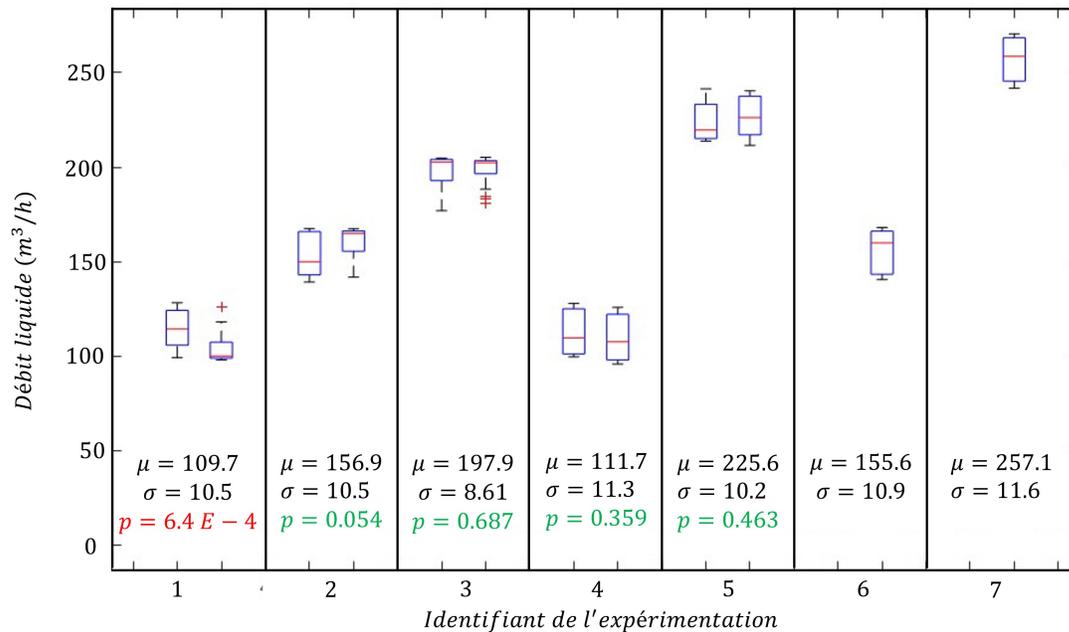


(a) Gravier



(b) Sable grossier

FIGURE 10.2 La fluctuation du débit liquide mesuré au début et à la fin de chaque expérimentation pour une période de deux minutes pour un sol en **a)** Gravier **b)** Sable grossier **c)** Sable fin



(c) Sable fin

FIGURE 10.2 La fluctuation du débit liquide mesuré au début et à la fin de chaque expérimentation pour une période de deux minutes pour un sol en **a)** Gravier **b)** Sable grossier **c)** Sable fin (suite)

Où :

μ = Débit d'écoulement moyen (m³/h)

σ = Variation du débit instantanée (m³/h)

p = p_{value} entre le débit initial et le débit final

Les expérimentations illustrées dans la figure 10.2a concernent le lit en gravier. Étant donné la brève durée de ces expérimentations, seule la variation instantanée du débit est examinée.

La figure 10.2b présente les dix expérimentations réalisées sur le lit recouvert de sable grossier. Contrairement au lit en gravier, la stabilité du débit au cours des expérimentations est étudiée, car leur durée atteint environ 90 minutes. Quatre expérimentations présentent un $p_{value} < 0.05$ lors du test de Student, ce qui indique une variation potentielle du débit au cours des essais. Il convient de noter que deux expérimentations ne comportent qu'une seule mesure en raison de difficultés expérimentales.

En ce qui concerne la figure 10.2c, sept expérimentations ont été réalisées sur un lit recouvert de sable fin. Quatre des cinq expérimentations ont mesuré le débit liquide au début et à la

fin, avec des $p_{value} > 0.05$ selon le test de Student. Les expérimentations 6 et 7 ne contiennent pas deux mesures de débit en raison de difficultés expérimentales.

L'état de quasi-permanence est atteint dans la majorité des expérimentations. Toutefois, une investigation sur la tendance du débit solide peut être faite pour quantifier l'influence de la variation des débits pour les expérimentations dont le $p_{value} < 0.05$.

10.1.2 Incertitudes sur les mesures de l'élévation du sol

La profondeur d'eau dans le canal est contrôlée par une porte à ouverture variable située à l'aval. Étant donné que l'écoulement est supposé quasi-uniforme, il est essentiel d'évaluer la variation de la profondeur d'eau en fonction de l'espace afin de confirmer le respect de cette hypothèse. Les capteurs de hauteur mesurent la distance entre la surface de l'eau et les capteurs. Ainsi, l'équation 10.1 est utilisée pour calculer la profondeur d'eau.

$$h = y_{sol} - y_{eau} \quad (10.1)$$

Où :

h = La profondeur d'eau (m)

y_{sol} = La distance verticale entre le sol du canal et les capteurs (m)

y_{eau} = La distance verticale entre la surface de l'eau et les capteurs (m)

En ce qui concerne l'élévation du sol, celle-ci varie dans le temps. Initialement, les sédiments sont répartis uniformément sur l'ensemble du canal. Cependant, en raison du transport sédimentaire durant l'écoulement, il est possible d'observer la formation de dunes dans le canal. De plus, l'érosion réduit l'épaisseur de la couche de sédiments au fil du temps. La figure 10.3 illustre la disposition des capteurs de pression ainsi que l'influence des dunes sur la lecture du niveau du sol. Les capteurs ne peuvent pas détecter le niveau du sol lorsque l'eau s'écoule dans le canal. Par conséquent, l'évolution instantanée de la disposition des sédiments demeure inconnue.

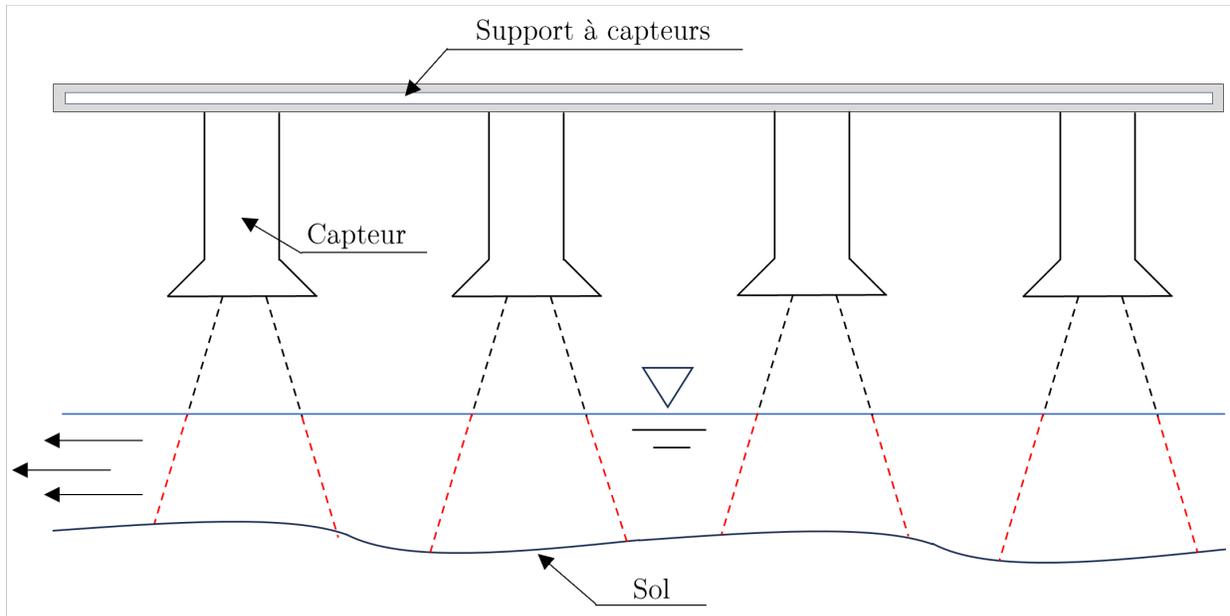


FIGURE 10.3 La disposition des capteurs de distance et l'influence des dunes sur la lecture du niveau du sol

Les incertitudes concernant l'élévation du sol sont examinées à l'aide de deux approches. La première consiste à identifier l'erreur de mesure instrumentale. Pour ce faire, les capteurs de distance enregistrent la distance du sol chaque seconde pendant une période d'une minute. Par la suite, il est possible de calculer la distance moyenne ainsi que sa variabilité.

La deuxième approche consiste à évaluer la variation du niveau du sol en fonction du temps, définie par la différence entre l'élévation du sol mesurée avant et après l'expérimentation. L'équation 10.2 présente le calcul permettant d'estimer la variation de l'élévation du sol lors d'une expérimentation.

$$\Delta y_{sol} = y_{sol_{initial}} - y_{sol_{final}} \quad (10.2)$$

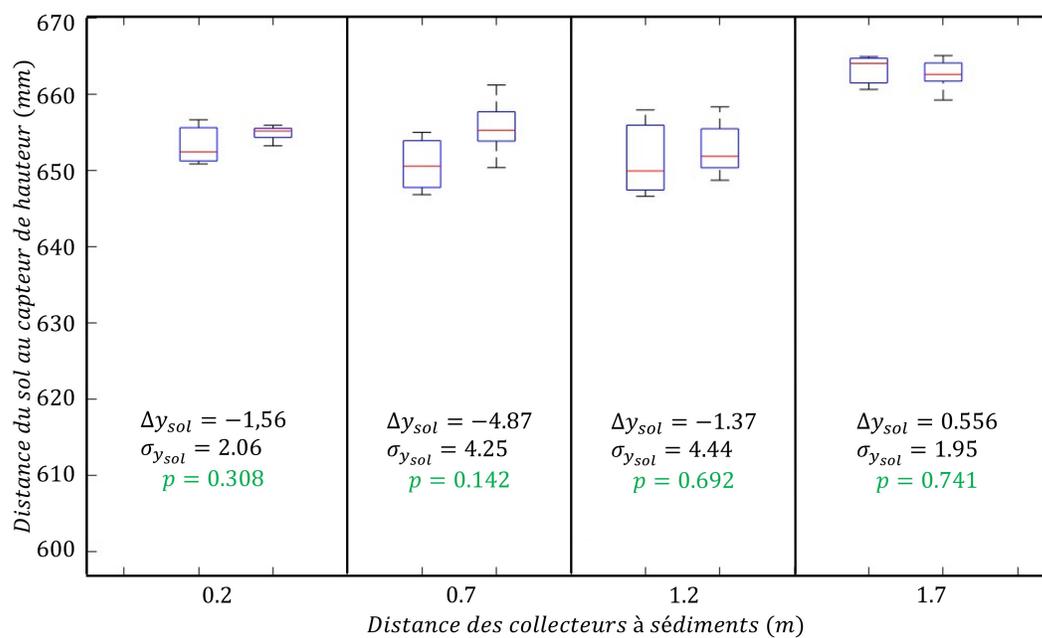
Où :

Δy_{sol} = Variation du niveau du sol pour expérimentation (m)

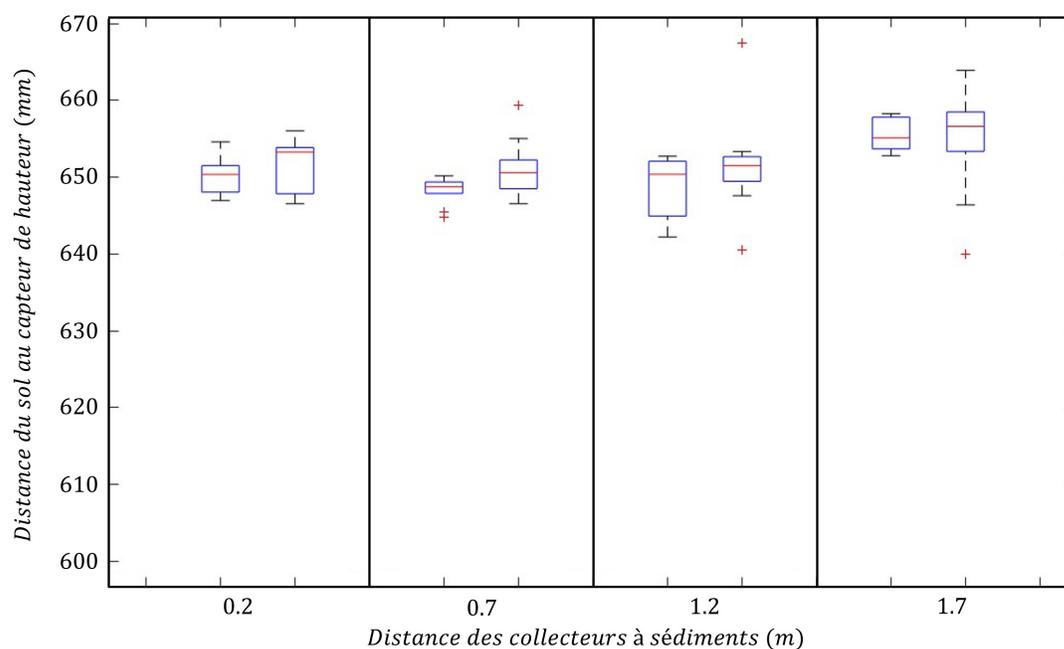
$y_{sol_{initial}}$ = Niveau du sol initial (m)

$y_{sol_{final}}$ = Niveau du sol final (m)

Les figures 10.4a à 10.4c illustrent la variation du niveau du lit du canal entre le début (à gauche) et la fin (à droite) des expérimentations pour chaque type de sédiment.



(a) Gravier



(b) Sable grossier

FIGURE 10.4 La fluctuation de l'élévation du sol mesurée au début et à la fin de chaque expérimentation pour une période de une minute pour un sol en **a)** Gravier **b)** Sable grossier **c)** Sable fin

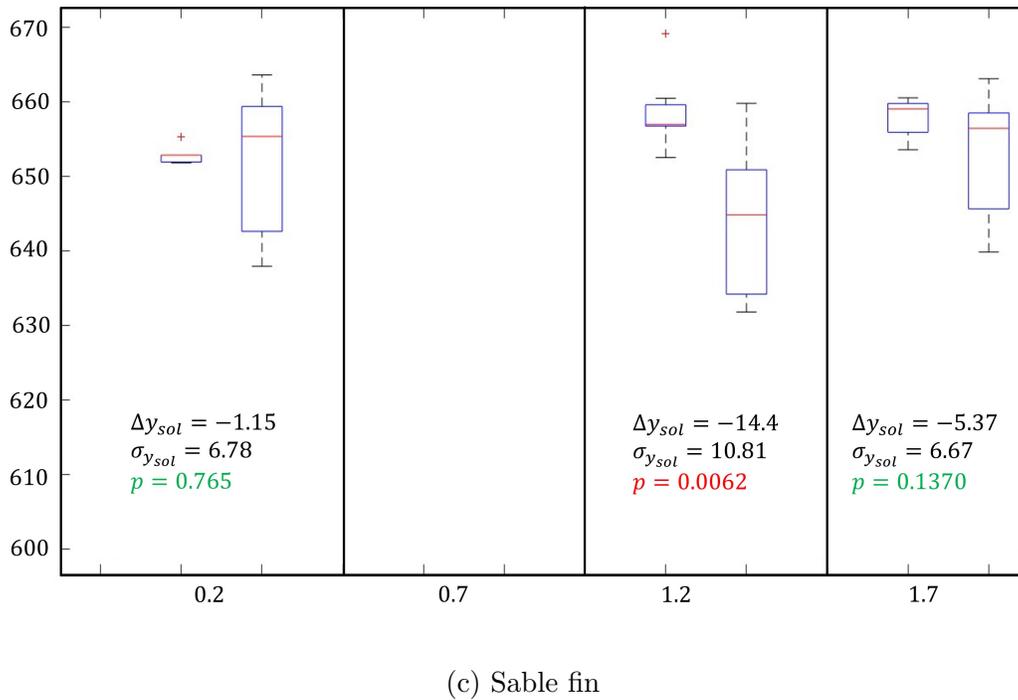


FIGURE 10.4 La fluctuation de l'élévation du sol mesurée au début et à la fin de chaque expérimentation pour une période de une minute pour un sol en **a)** Gravier **b)** Sable grossier **c)** Sable fin (suite)

Où :

$\sigma_{y_{sol}}$ = L'écart-type sur la variation du niveau du sol (m)

p = p_{value} des échantillons de la variation du niveau du sol

La figure 10.4a montre que l'ensemble des tests de Student présentent des $p_{value} > 0.05$, signifiant que les élévations du sol mesurées avant et après les expérimentations sont similaires. De plus, la différence moyenne maximale des élévations mesurée est de $\Delta\mu_2 = 4.87mm$, soit similaire au diamètre médian du gravier. Ainsi, il est possible de conclure que l'élévation du sol est stable du début à la fin d'expérimentations.

La figure 10.2b montre que l'ensemble des tests comparatifs d'élévation présentent un $P_{value} > 0.05$, confirmant que l'élévation du sol varie faiblement entre le début et la fin des expérimentations. De plus, la différence moyenne maximale de la variation du sol est de $\Delta\mu_3 = 2.73mm$, appuyant le fait que l'élévation du sol varie faiblement pour les expérimentations sur le sable grossier.

La figure 10.2c illustre l'absence de mesure à 0,7 m des collecteurs à sédiments en raison d'un bris matériel. Cependant, les lectures des trois autres capteurs permettent de constater une augmentation significative de la variation de l'élévation du sol après les expérimentations. Cette observation s'explique par la formation de dunes, causée par le transport des sédiments, comme le montre la figure 7.4. La différence moyenne maximale de $\Delta\mu_3 = 14.4mm$ est plus de trois fois le diamètre médian. En ce qui concerne les mesures du sable fin, il convient de noter une variation significative de l'élévation du sol entre le début et la fin des expérimentations.

10.1.3 Incertitudes sur les mesures de la profondeur d'eau

En ce qui concerne l'uniformité de l'écoulement, les quatre capteurs de distance sont situés à des intervalles de 50 centimètres le long de l'axe longitudinal de l'écoulement. Ainsi, la profondeur d'eau est mesurée en fonction de l'espace afin d'évaluer si l'hypothèse d'une profondeur d'eau quasi-uniforme est respectée. Une faible variation de la profondeur d'eau en fonction de la distance peut être observée, en raison de la porte à ouverture variable qui impose une condition aval. De plus, les mesures de profondeur d'eau permettent également de quantifier l'influence du réceptacle à sédiments sur la profondeur d'eau. La figure 10.5 illustre les différences entre les mesures des capteurs et la profondeur moyenne pour les différents types de sols.

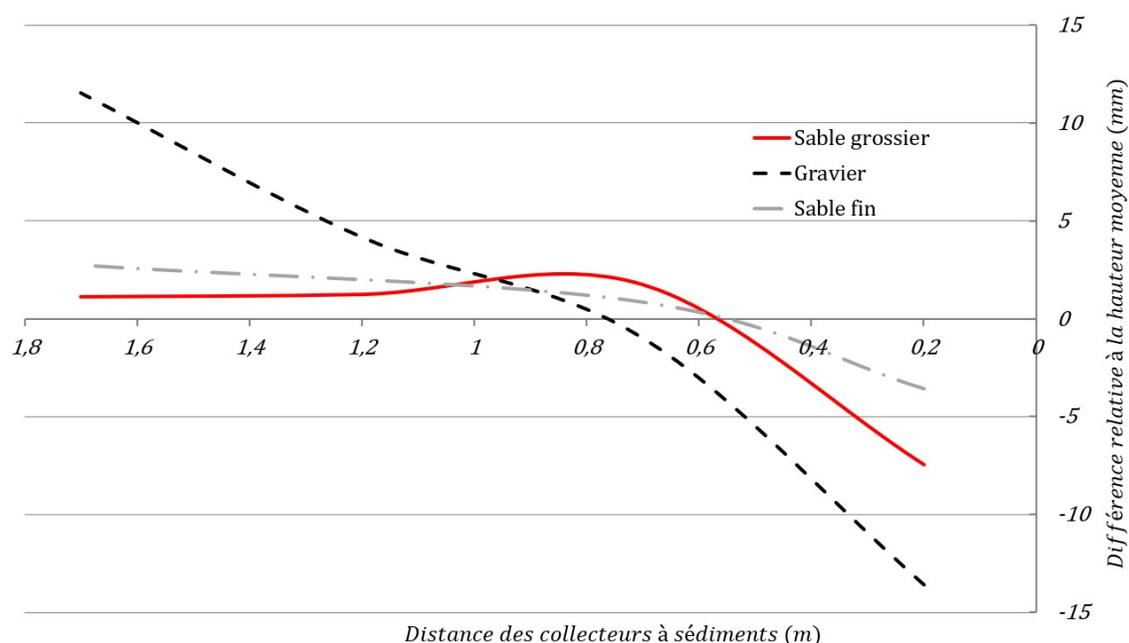


FIGURE 10.5 Différence de la hauteur d'eau par rapport à la moyenne en fonction de l'axe longitudinal du canal expérimental pour les différents types de sédiments

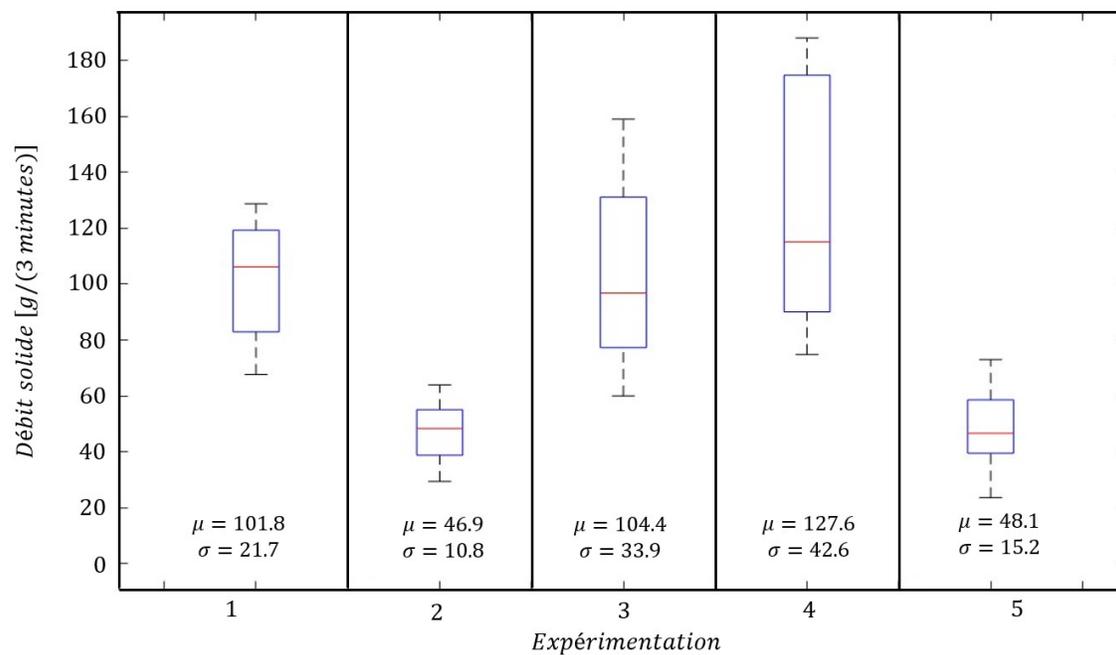
Le sable fin présente le profil de profondeur d'eau le plus stable parmi les trois types de sédiments. Cela s'explique par une profondeur d'eau plus élevée lors des expérimentations, ce qui le rend moins sensible à la dénivellation causée par le collecteur à sédiments. En revanche, on observe une variation d'environ 2,5 cm de la profondeur d'eau lors des expérimentations sur le gravier, justifiée par l'influence significative de la dénivellation au niveau des collecteurs. Ainsi, l'écoulement sur le sable fin et le sable grossier peut être considéré comme quasi-uniforme, avec une variation de 5 mm à 8 mm sur une distance de 1,70 m.

10.1.4 Incertitude sur les mesures du débit solide

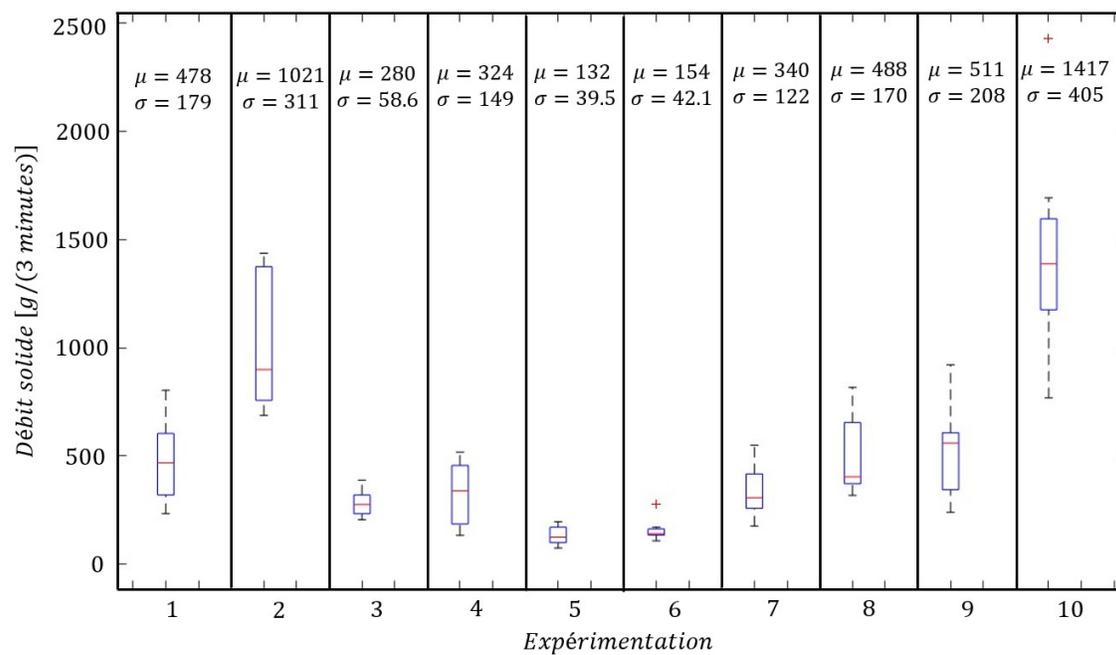
Le débit solide est la mesure la plus cruciale des expérimentations, car il est directement utilisé pour comparer les performances des modèles d'estimation. Il est essentiel de définir l'incertitude associée au débit solide afin de garantir la validité des modèles. Pour cela, un total de 12 mesures de débit solide est collecté pour chaque expérimentation, à intervalles de trois minutes, en retirant les contenants à sédiments. Cette durée de trois minutes a été choisie pour garantir la collecte d'un nombre suffisant de données, permettant ainsi d'évaluer la variabilité du débit solide sans épuiser la couche de sédiment étalée.

Les équations de transport solide sont calibrées sur des débits solides moyens plutôt qu'instantanés, et le débit solide utilisé correspond à la moyenne des mesures collectées lors d'une expérimentation [226]. Cependant, avec une période de mesure de trois minutes, il est raisonnable de considérer que les valeurs obtenues lors des expérimentations peuvent être assimilées à des débits solides instantanés. Par conséquent, une variation notable du débit solide est attendue.

L'une des causes de la variation du débit solide instantané est la modification de la morphologie de la couche de sédiments étalée sur le lit du canal, comme illustré à la figure 7.4b. Cette modification est continue durant l'écoulement et influence directement le débit solide instantané. Étant donné que chaque ensemble de 12 mesures couvre une plage temporelle totale de 36 minutes, il est possible d'identifier le débit solide moyen et d'inclure la variation du débit solide instantané en tant qu'incertitude. Les figures 10.6a à 10.6c présentent les diagrammes en boîte de l'ensemble des mesures collectées. Il est à noter que les échantillons de mesures sont composés d'un total de 10 à 12 mesures expérimentales.



(a) Gravier



(b) Sable grossier

FIGURE 10.6 La fluctuation du débit solide mesurée pour une période de trois minutes pour un sol en a) Gravier b) Sable grossier c) Sable fin

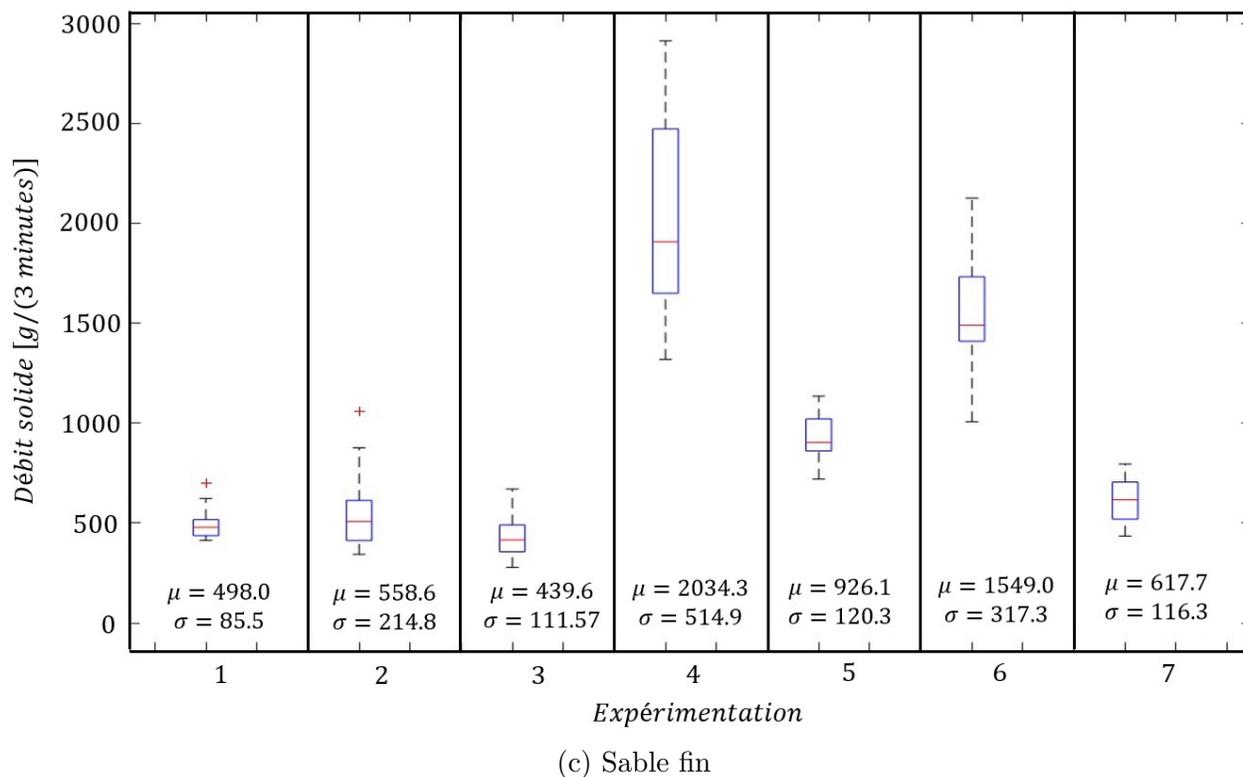


FIGURE 10.6 La fluctuation du débit solide mesurée pour une période de trois minutes pour un sol en a) Gravier b) Sable grossier c) Sable fin (suite)

Où :

μ = Le débit solide moyen (g/3 minutes)

σ = L'écart-type du débit solide moyen (g/3 minutes)

300 m^3/h La figure 10.6a illustre les cinq débits solides moyens mesurés lors des expérimentations effectuées sur le gravier. Les débits solides observés sont faibles en raison des limitations du canal, qui peut écouler un maximum de 300 m^3/h . Une faible hauteur d'eau était nécessaire pour initier le mouvement des sédiments. De plus, cette profondeur d'eau influence l'uniformité de l'écoulement, comme le montre la figure 10.5. En conséquence, seulement cinq expérimentations ont été réalisées sur le gravier. Les coefficients de variation du débit solide pour le gravier se situent entre 21.3% et 33.4%.

La figure 10.6b présente les dix expérimentations réalisées sur le sable grossier. Il est important de noter que le sable grossier est moins uniforme, ce qui entraîne une variabilité accrue des mesures de débit solide. Les coefficients de variation varient de 24,5% à 46,0 %. Les

coefficients de variation les plus élevés sont observés lorsque le débit solide moyen est le plus faible.

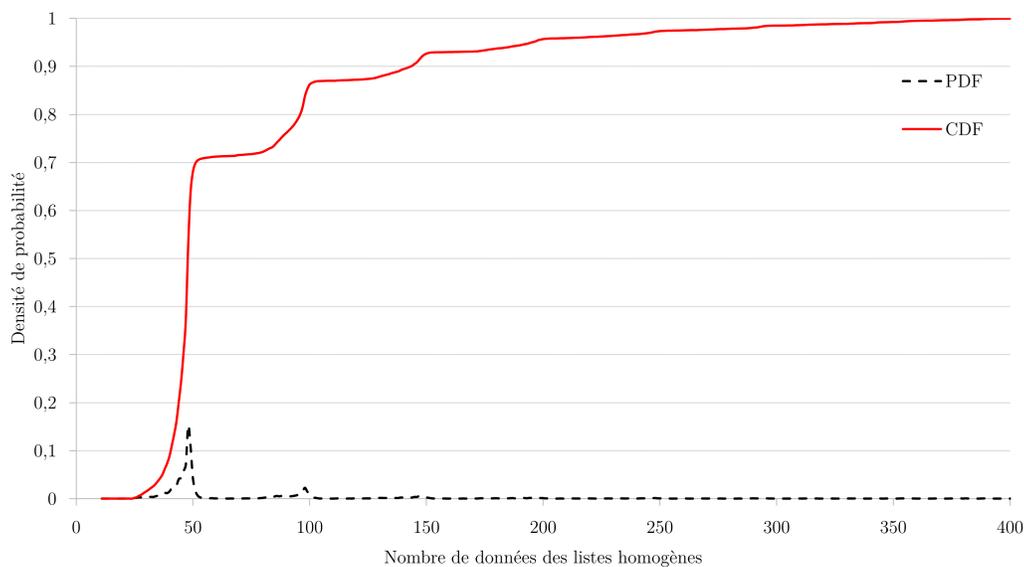
La figure 10.6c illustre les sept expérimentations effectuées sur le sable fin. L'écart-type des données augmente avec le débit solide moyen mesuré. Cependant, les coefficients de variation varient de 13% à 38%. Cette variabilité diminue lorsque la discrétisation temporelle des collectes de mesures est augmentée. Les mesures effectuées toutes les trois minutes approchent le débit solide à court terme.

10.2 Résultats de la création des listes de données homogènes

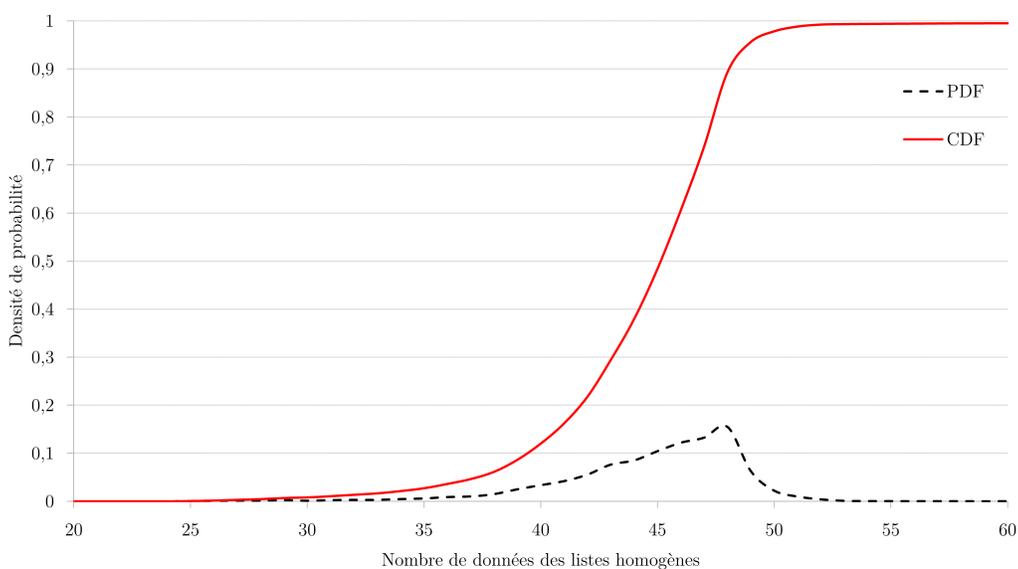
L'objectif de la création de listes de données homogènes pour une rivière à l'étude est d'évaluer l'efficacité des différentes équations de transport solide. Ces listes permettent à l'ingénieur de choisir l'équation la plus appropriée en fonction de la performance des modèles développés. Pour cela, deux aspects clés sont analysés : le nombre de données incluses dans les listes et la représentativité de ces données en ce qui concerne le comportement sédimentaire. Ces paramètres sont essentiels pour s'assurer que les regroupements de données homogènes capturent fidèlement les conditions hydrauliques, les propriétés physiographiques, et les caractéristiques sédimentaires du système étudié.

10.2.1 Nombre de données

Le nombre de données des listes est fonction de leur homogénéité et du tri de données. En raison de plusieurs données collectées provenant d'expérimentations, il est récurrent que leur comportement hydraulique et physiographique soient similaires. L'objectif de cette sous-section est de déterminer l'influence de l'incrément de 50 données sur la liste de données similaire ainsi qu'évaluer la répartition du nombre de données incluses dans les listes. Les figures 10.7a et 10.7b présentent la fonction de densité de probabilité (PDF) et la fonction de densité cumulée (CDF) du nombre de données composant les listes homogènes. Ces données sont issues des 11 463 mesures de transport sédimentaire recueillies dans la littérature, comparant les résultats avec et sans élargissement du nombre de données sélectionnées.



(a) Avec élargissement



(b) Sans élargissement

FIGURE 10.7 La fonction de densité de probabilité et la fonction de densité cumulée du nombre de données composant les listes de données homogènes (a) avec élargissement (b) sans élargissement

La figure 10.7a montre que 70% des listes possèdent moins de 50 données. Un effet de palier est présent en raison de l'incrémentation de 50 données fixées pour chaque liste de données homogènes.

La figure 10.7b montre que plus de 95% des listes de données homogènes possèdent approximativement 50 données. Puisque le débit solide à estimer est pour un domaine d'application précis, soit la rivière à l'étude, cette quantité de données est suffisante pour évaluer la performance des équations.

Étant donné la difficulté de quantifier les incertitudes de mesure dans les expérimentations issues de la littérature, il est essentiel de valider le modèle avec les expérimentations réalisées dans le cadre de ce projet de recherche. Ainsi, la figure 10.8 présente la densité des données ainsi que la distribution cumulée du nombre de données dans les listes homogènes, en fonction des données expérimentales collectées au cours de cette recherche.

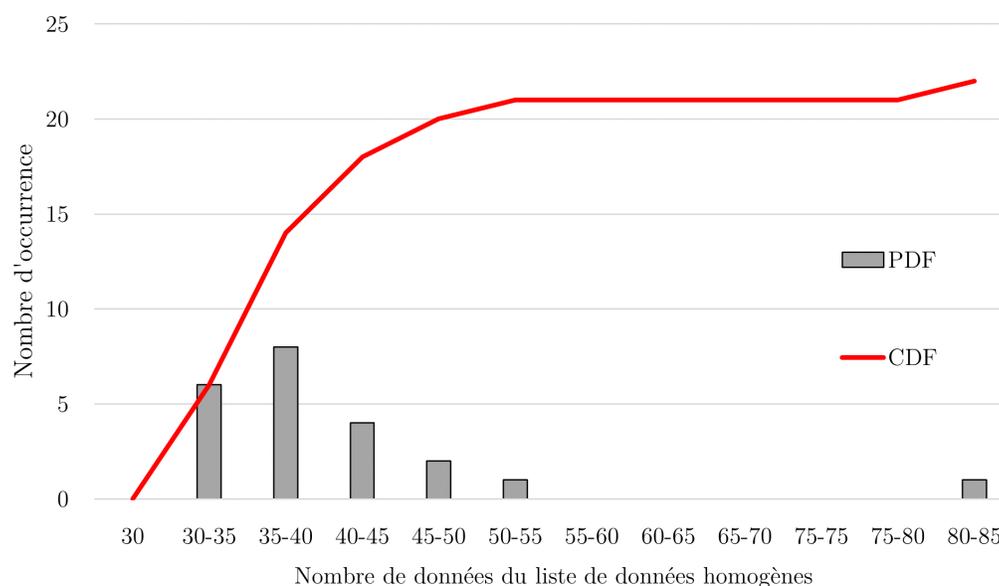


FIGURE 10.8 La densité des données et la densité cumulée du nombre de données composant les listes de données homogènes en fonction des données du protocole expérimental

La figure 10.8 montre que la taille des listes homogènes issues des 22 expérimentations varie entre 30 et 85 données. Les listes comportant moins de 50 données résultent du retrait des données en conditions naturelles afin de n'utiliser que les données expérimentales, garantissant ainsi la similarité des écoulements. De plus, étant donné la diversité des types de sédiments et des vitesses d'écoulement, certaines données expérimentales se situent dans des domaines d'écoulement moins étudiés, comme celui du gravier à haute vitesse. Compte tenu de la quantité de données utilisées pour évaluer la performance des modèles appliqués à la rivière étudiée, la représentativité des données est également examinée.

10.2.2 Similarité des données

La similarité des listes de données homogènes peut être évaluée en comparant la concentration moyenne des données extraites à celle mesurée dans le cours d'eau étudié. Cette approche permet d'estimer la performance du modèle à identifier des comportements sédimentaires similaires. La figure 10.9 présente le nombre de mesures de la concentration des sédiments dans les rivières, regroupées selon leurs plages d'incertitude, en fonction de l'écart-type.

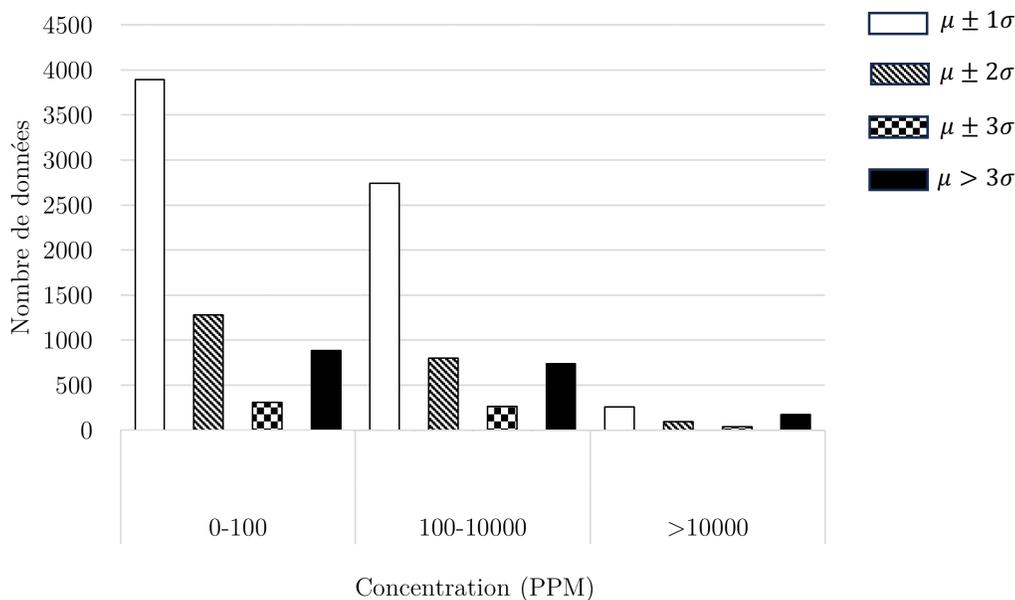


FIGURE 10.9 Nombre de mesures de la concentration sédimentaire des rivières qui se retrouve dans les plages d'incertitudes des listes de données similaires en fonction de la concentration en PPM

La figure 10.9 illustre le nombre de données incluses dans le domaine des listes de données similaires. On constate que 65% des concentrations des listes de données homogènes, générées pour des rivières avec un flux sédimentaire inférieur à 100 PPM, représentent correctement le phénomène en se situant dans l'intervalle d'un écart-type par rapport à la valeur mesurée. Ces résultats restent cohérents pour les mesures avec des concentrations comprises entre 100 et 10 000 PPM. Cependant, dans les cas où la concentration dépasse 10 000 PPM, une réduction significative du nombre de mesures disponibles est observée, entraînant une incertitude croissante pour les listes générées dans ces conditions. Une méthode pour améliorer la représentativité des listes de données similaires pour des concentrations élevées consiste à enrichir la base de données avec des mesures provenant de la littérature, spécifiquement pour des flux à haute concentration.

Une méthode pour évaluer les performances de l'algorithme d'extraction des listes de données homogènes consiste à analyser les variables prédictives adimensionnelles utilisées. Cette analyse permet de déterminer si certaines variables ont une influence plus significative sur l'erreur relative lors du processus d'extraction des données. La figure 10.10 présente la fonction de densité cumulée de l'erreur relative entre les variables adimensionnelles de la rivière à l'étude et les valeurs maximales issues des listes de données homogènes.

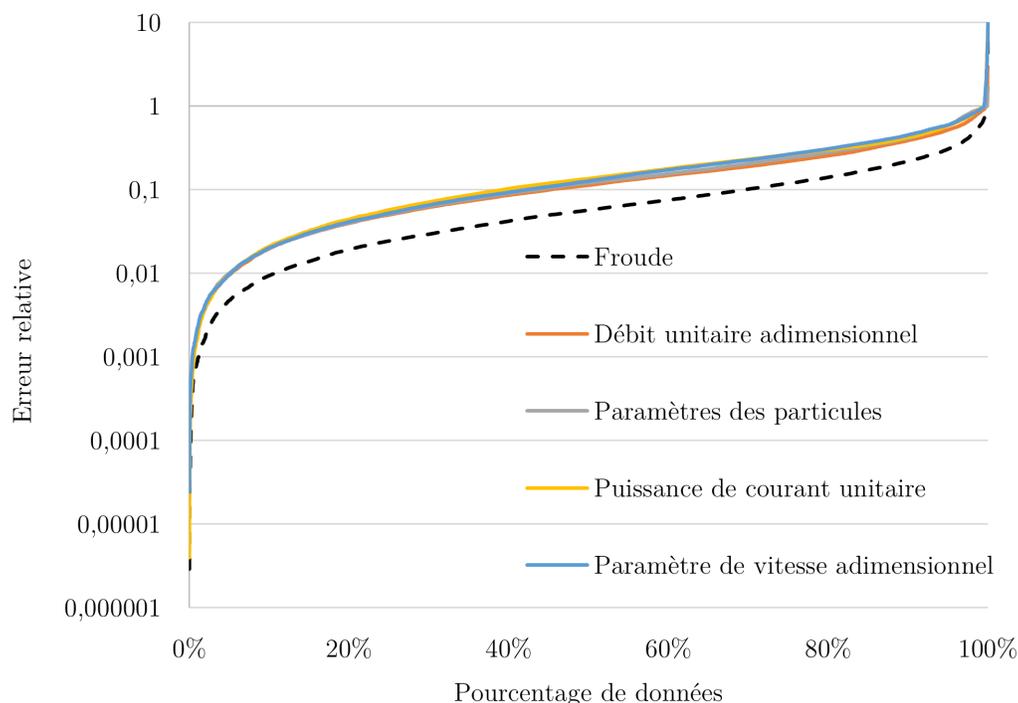
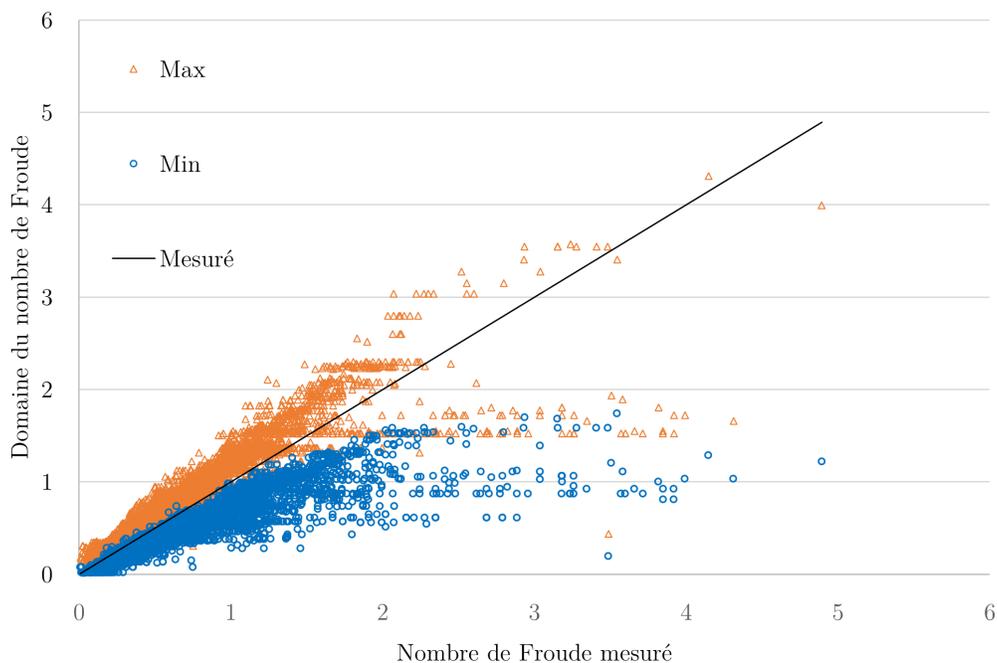


FIGURE 10.10 Fonction de densité cumulée des différences relatives des variables adimensionnelles mesurées et de la proportion du domaine de la liste des données similaires

La figure 10.10 montre que l'ensemble des variables adimensionnelles utilisées suivent une tendance similaire. Près de la moitié des ensembles homogènes ont une différence relative inférieure à 10%. Les valeurs maximales peuvent être causées par un manque de données dans certains types d'écoulement, causant un élargissement des domaines des listes homogènes. Cependant, plus de 98% des données extraites possèdent une différence relative maximale de 100%.

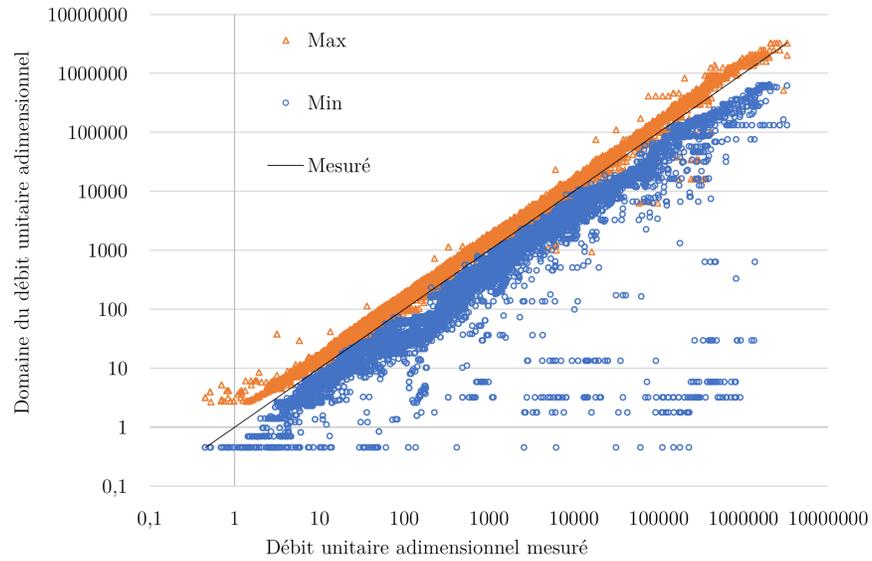
Chaque domaine des variables utilisées a été examiné pour l'ensemble des valeurs présentes des données provenant de la littérature dans l'optique de déterminer leur variation. Les figures 10.11a à 10.11f illustrent les résultats de ces comparaisons, en montrant pour chaque variable adimensionnelle, les valeurs maximales et minimales observées dans les listes de données

homogènes. Il est donc possible d'évaluer la dispersion des données et la stabilité des variables adimensionnelles utilisées dans les analyses, fournissant ainsi une meilleure compréhension de la représentativité des données.

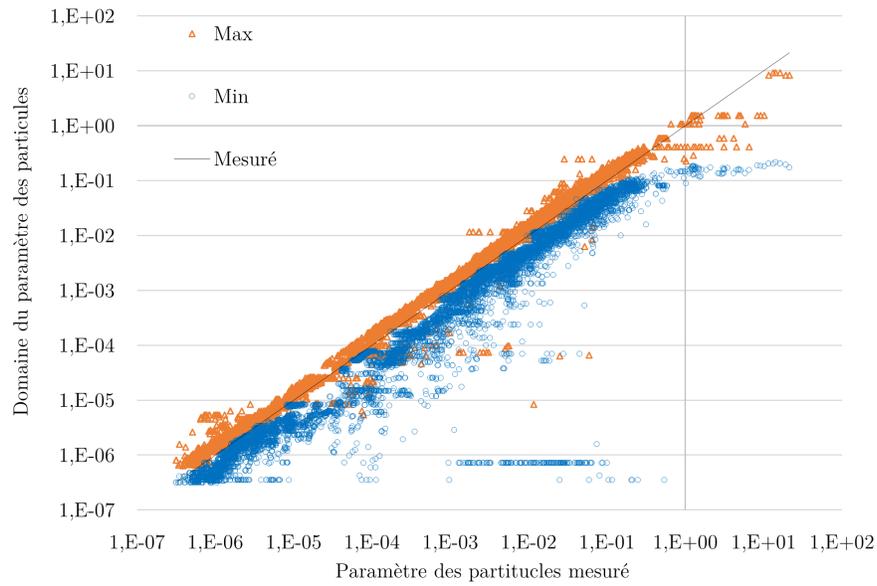


(a)

FIGURE 10.11 Comparaison des limites minimales et maximales des listes de données homogènes en fonction des valeurs mesurées pour **a)** le nombre de Froude **b)** le débit unitaire adimensionnel **c)** paramètre des particules **d)** la puissance de courant unitaire **e)** le paramètre de vitesse adimensionnel **e)** la concentration

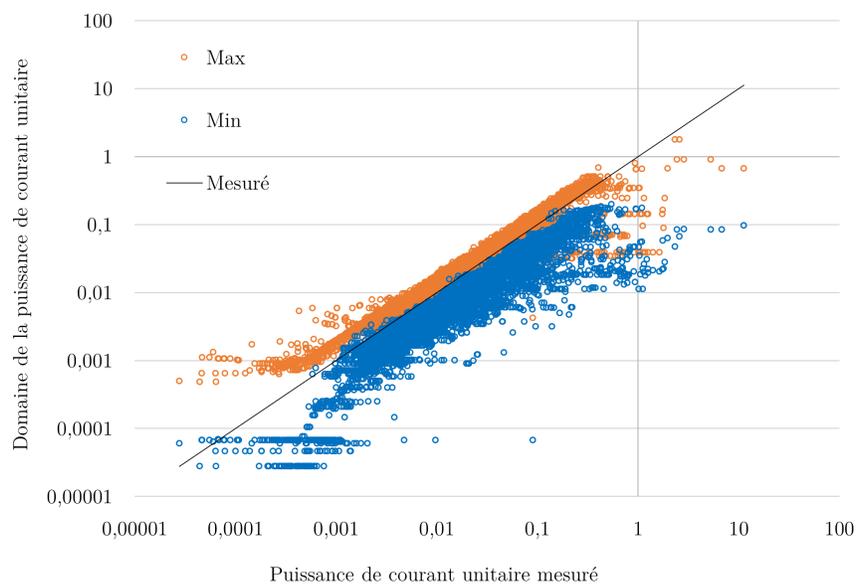


(b)

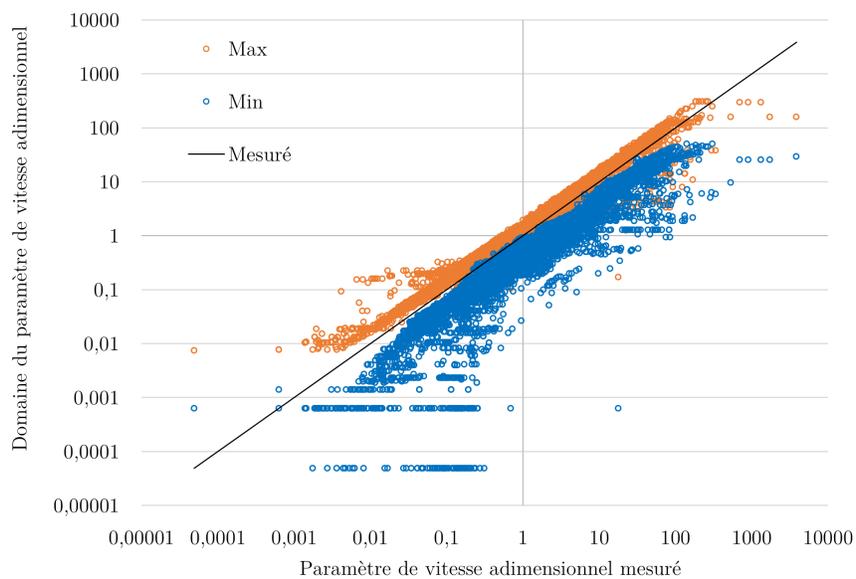


(c)

FIGURE 10.11 Comparaison des limites minimales et maximales des listes de données homogènes en fonction des valeurs mesurées pour **a)** le nombre de Froude **b)** le débit unitaire adimensionnel **c)** paramètre des particules **d)** la puissance de courant unitaire **e)** le paramètre de vitesse adimensionnel **e)** la concentration (suite)

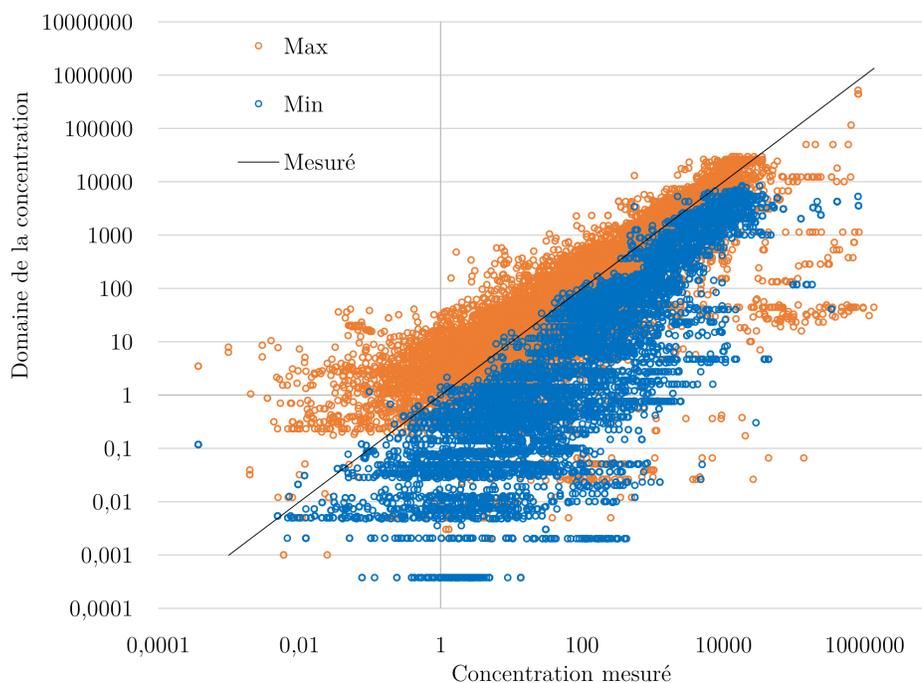


(d)



(e)

FIGURE 10.11 Comparaison des limites minimales et maximales des listes de données homogènes en fonction des valeurs mesurées pour **a)** le nombre de Froude **b)** le débit unitaire adimensionnel **c)** paramètre des particules **d)** la puissance de courant unitaire **e)** le paramètre de vitesse adimensionnel **e)** la concentration (suite)



(f)

FIGURE 10.11 Comparaison des limites minimales et maximales des listes de données homogènes en fonction des valeurs mesurées pour **a)** le nombre de Froude **b)** le débit unitaire adimensionnel **c)** paramètre des particules **d)** la puissance de courant unitaire **e)** le paramètre de vitesse adimensionnel **e)** la concentration (suite)

Les domaines des variables adimensionnelles dans les listes de données homogènes suivent en grande partie les tendances des valeurs mesurées. Un comportement attendu est observé pour le paramètre des particules, la puissance de courant unitaire ainsi que le paramètre de vitesse adimensionnel. Toutefois, une augmentation des limites du nombre de Froude en fonction des valeurs mesurées est observée, attribuable à un manque de données pour les écoulements au nombre de Froude élevé. Concernant le débit unitaire adimensionnel, la tendance des limites supérieures suit correctement les valeurs mesurées dans les rivières étudiées. Cependant, certaines données des limites inférieures sont nettement plus faibles que les valeurs mesurées, car l'élargissement du domaine des valeurs extraites est proportionnel à la valeur mesurée. Pour l'ensemble des variables adimensionnelles, il est possible d'observer que certaines limites supérieures sont inférieures aux valeurs mesurées. Cela se produit lorsque certaines données ne respectent pas les critères de sélection établis. Néanmoins, pour l'ensemble des variables, la tendance des domaines des listes de données homogènes reste conforme aux attentes.

En conclusion, le nombre de données extraites est suffisamment élevé pour évaluer les performances des équations de transport solide. La majorité des listes de données homogènes représentent adéquatement le comportement d'un cours d'eau étudié lorsque la concentration est inférieure à 10 000 PPM. De plus, la moitié des listes de données homogènes possède des comportements hydrauliques et physiographiques avec une différence relative de 10% des cours d'eau étudiés. Finalement, les domaines des variables adimensionnelles des listes de données homogènes suivent une tendance représentative de celles mesurées dans le cours d'eau à l'étude. Toutefois, les comportements hydrauliques avec peu de données similaires génèrent des listes moins représentatives en raison du manque de données.

10.3 Évaluation des performances des algorithmes

Pour évaluer la performance des algorithmes d'estimation des équations de transport solide, il est nécessaire d'utiliser des critères numériques. Tout d'abord, une analyse de sensibilité de la calibration des équations est effectuée. Ensuite, deux critères sont utilisés pour évaluer la performance des algorithmes :

- Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) : Cela mesure l'écart entre les valeurs estimées par les algorithmes et les valeurs réelles. Un RMSE plus bas indique une meilleure performance de l'algorithme.
- La moyenne des rangs : Cette méthode évalue la précision des équations en se basant sur les rangs des données.

Ces critères sont appliqués à la fois sur des données provenant de la littérature et sur les mesures expérimentales.

10.3.1 Analyse de sensibilité de la régression par processus gaussien

L'objectif de l'analyse de sensibilité de la régression par processus gaussien est d'identifier les points de départ les plus efficaces pour la calibration des paramètres. Étant donné la complexité du système, la calibration de la régression par processus gaussien peut varier selon les points de départ, car l'optimisation peut conduire à un maximum local. Cinq paramètres de calibration sont examinés pour évaluer les différents points de départ dans le processus de calibration de la régression par processus gaussien :

- La fonction de covariance
- La longueur de dépendance (l)

- L'incertitude sur le système (σ_g)
- L'incertitude sur la mesure (σ_v)
- Le nombre d'itérations pour l'optimisation des paramètres

Les figures 10.12a et 10.12b présentent les RSME et la moyenne des rangs pour les différents points de départ.

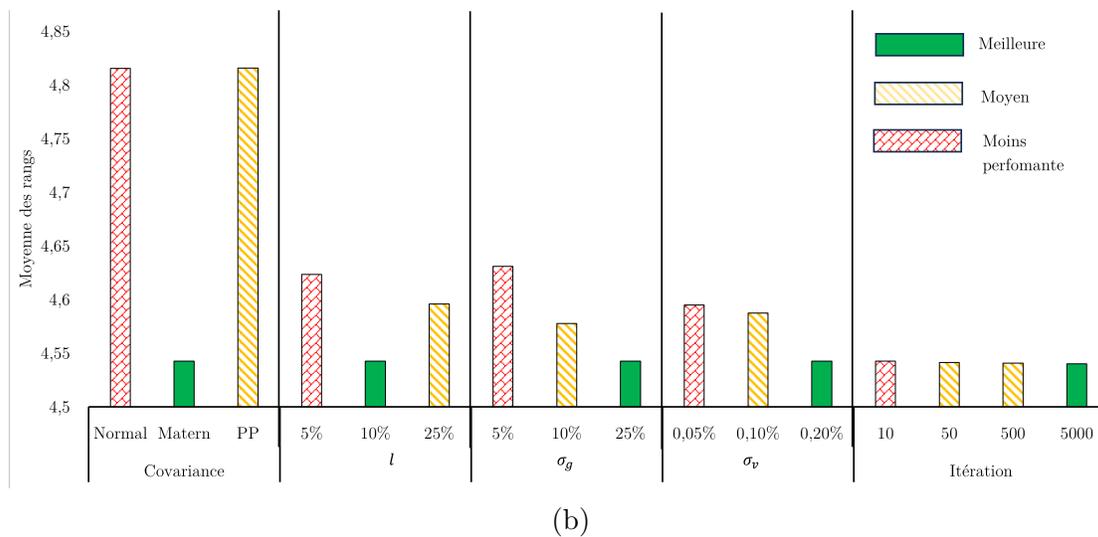
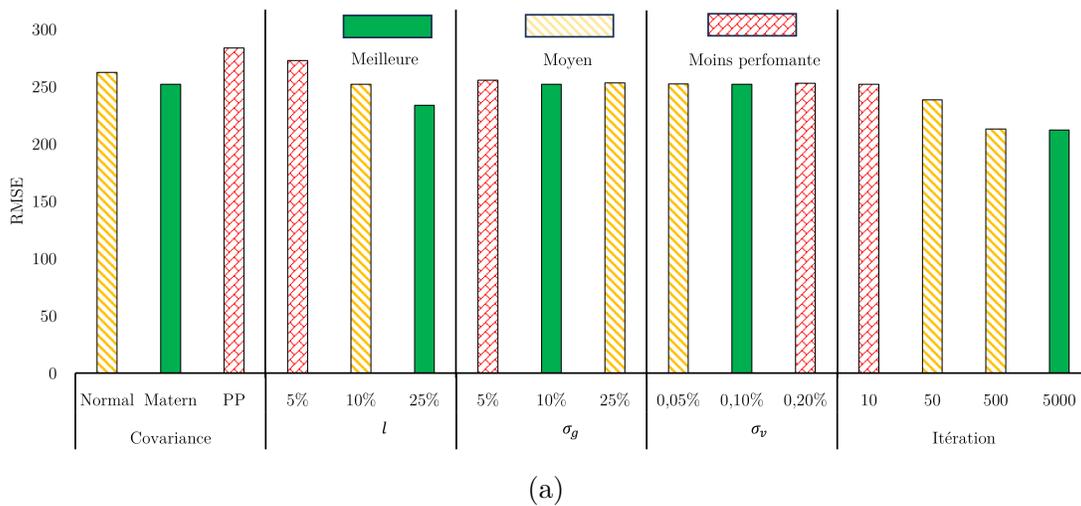


FIGURE 10.12 Analyse de sensibilité des points de départ des paramètres de calibration de la RPG en fonction de a) RSME b) moyenne des rangs

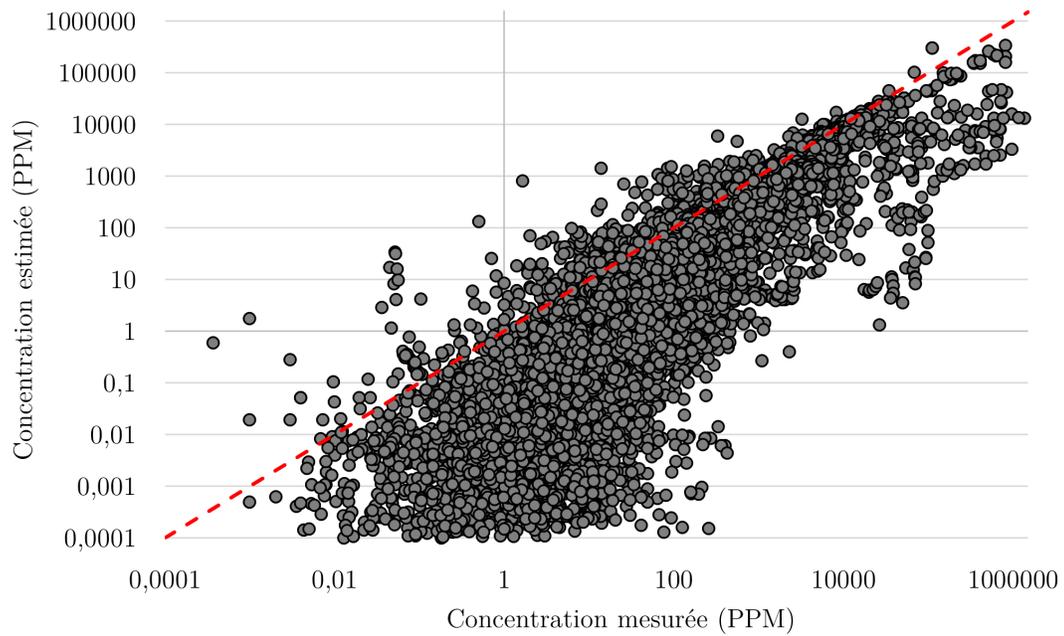
Les calibrations les plus performantes se caractérisent par les valeurs les plus faibles de RMSE et de la moyenne des rangs. Pour la fonction de covariance et le nombre d'itérations, les critères de RMSE et de la moyenne des rangs aboutissent aux mêmes points de départ optimaux, à savoir la fonction Matern et 5000 itérations. Les incertitudes sur le système et les mesures sont très similaires en ce qui concerne le RMSE. Cependant, la moyenne des rangs s'avère nettement meilleure lorsque celles-ci sont respectivement de 25% et 0,2%. Enfin, les résultats de calibration des longueurs de dépendance initiales diffèrent selon les deux critères. Étant donné que le RMSE est généralement influencé par la valeur présentant l'erreur maximale, il est préférable d'utiliser la moyenne des rangs pour évaluer la performance d'un algorithme sur une base de données provenant de la littérature et présentant des comportements hétérogènes. Par conséquent, les points de départ pour les longueurs de dépendance sont fixés à 10%.

10.3.2 Validation de la performance des modèles

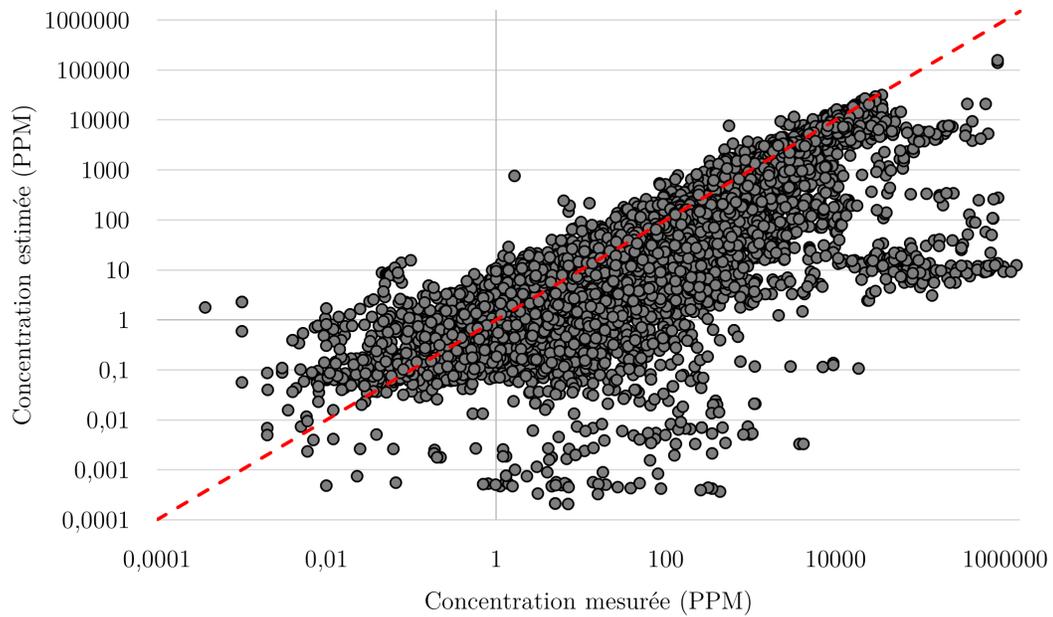
La validation des modèles est effectuée en évaluant l'erreur d'estimation du débit solide à partir des données issues de la littérature et des expérimentations réalisées dans le cadre de cette recherche. Dans un premier temps, les estimations sont comparées aux mesures. Ensuite, les critères du RMSE et de la moyenne des rangs sont utilisés pour évaluer les performances des modèles par rapport aux équations de transport solide existantes. Enfin, la moyenne des rangs en fonction de la concentration mesurée est analysée pour déterminer les limites d'application des modèles.

Comparaison des concentrations mesurées et estimées

La première évaluation des performances des algorithmes consiste à comparer les débits solides mesurés et estimés. Cette approche permet d'évaluer visuellement le comportement des estimations produites par les algorithmes. Les figures 10.13a et 10.13b montrent les concentrations (PPM) estimées en fonction des concentrations mesurées pour l'algorithme ensembliste et la régression par processus gaussien.



(a)



(b)

FIGURE 10.13 La concentration (PPM) estimée en fonction de la concentration mesurée pour **a)** l'algorithme ensembliste **b)** la régression par processus gaussien

La figure 10.13a met en évidence que l'algorithme ensembliste a tendance à sous-estimer le débit solide. De plus, les différences observées lorsque la concentration mesurée est supérieure à 10 000 PPM sont plus importantes. Cela s'explique par la représentativité des listes de données homogènes présentées à la figure 10.9. Il est également possible que la sous-estimation de l'algorithme ensembliste reflète la tendance des équations de transport solide existantes à sous-estimer les débits solides.

Concernant la figure 10.13b, celle-ci montre un comportement plus équilibré entre la surestimation et la sous-estimation. Étant donné que cette régression est calibrée sur les listes de données homogènes, elle est directement liée à la performance de l'algorithme d'extraction des données. L'ordre de grandeur des surestimations diminue avec l'augmentation de la concentration. Cependant, pour les débits solides supérieurs à 10 000 PPM, des sous-estimations importantes sont observées.

10.3.3 Évaluation des performances avec le critère de la racine de l'erreur quadratique moyenne

La RMSE permet de quantifier l'écart moyen entre les valeurs estimées et mesurées. Cependant, cette approche pénalise davantage les erreurs de grande magnitude. Il est donc essentiel de considérer que le domaine des 11 463 données utilisées inclut des zones d'extrapolation pour les différents modèles. L'objectif de cette sous-section est de comparer le comportement du modèle en extrapolation par rapport aux équations de transport solide existantes.

Évaluation du RMSE sur la base de données provenant de la littérature

Les données provenant de la littérature incluent des RMSE issues de mesures expérimentales et de mesures en rivières, ce qui entraîne une grande variabilité dans le comportement sédimentaire. La figure 10.14 présente les RMSE des équations de transport solide existantes, ainsi que celles des algorithmes d'estimation développés dans le cadre de cette recherche, pour la base de données issue de la littérature.

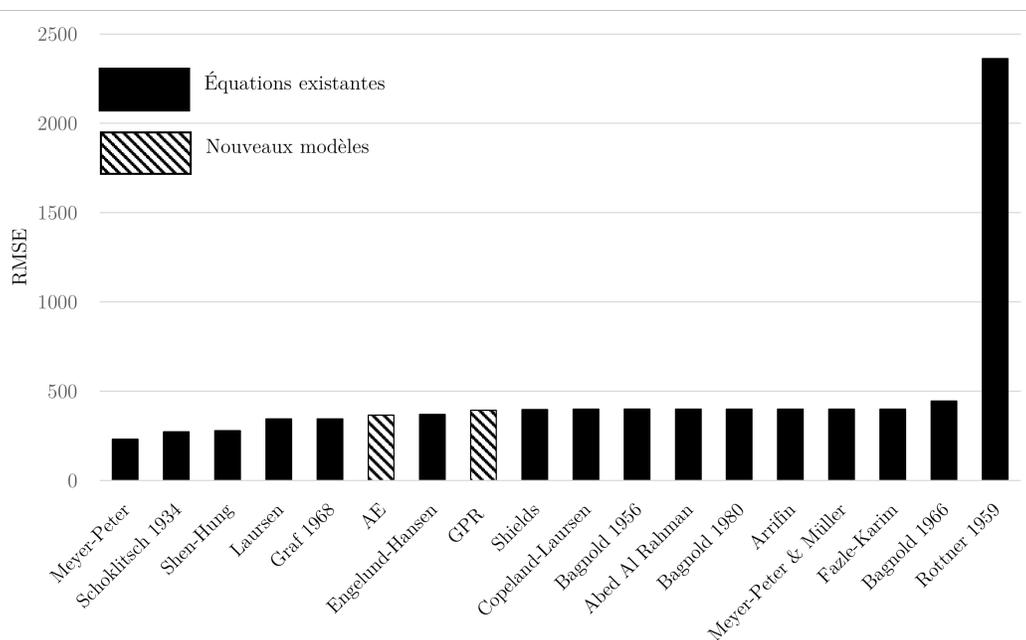
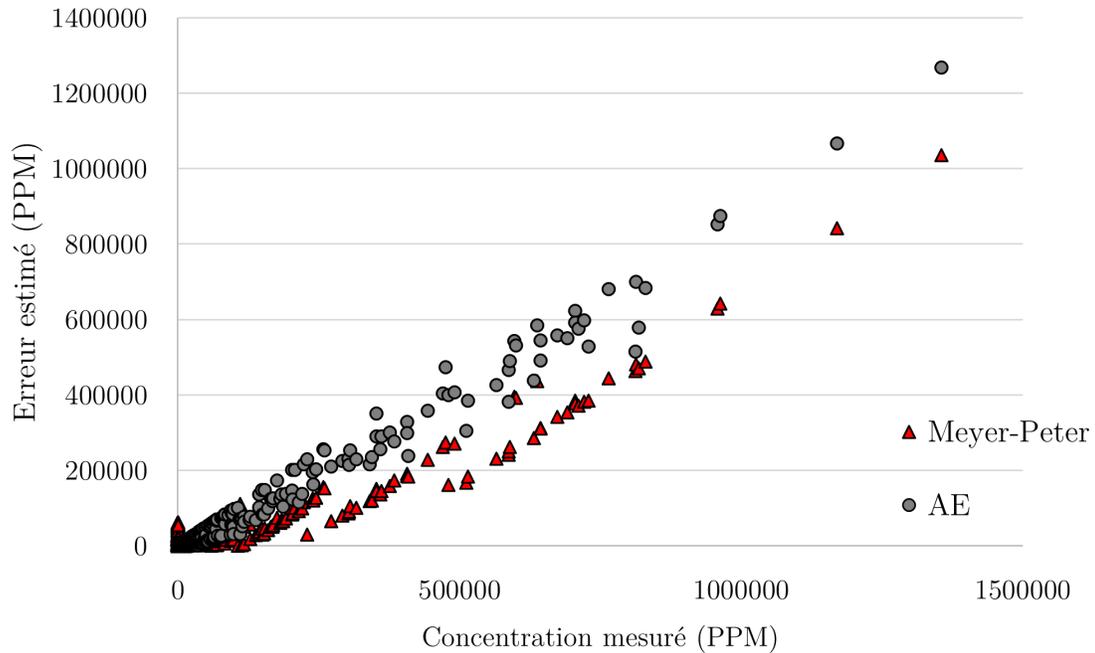
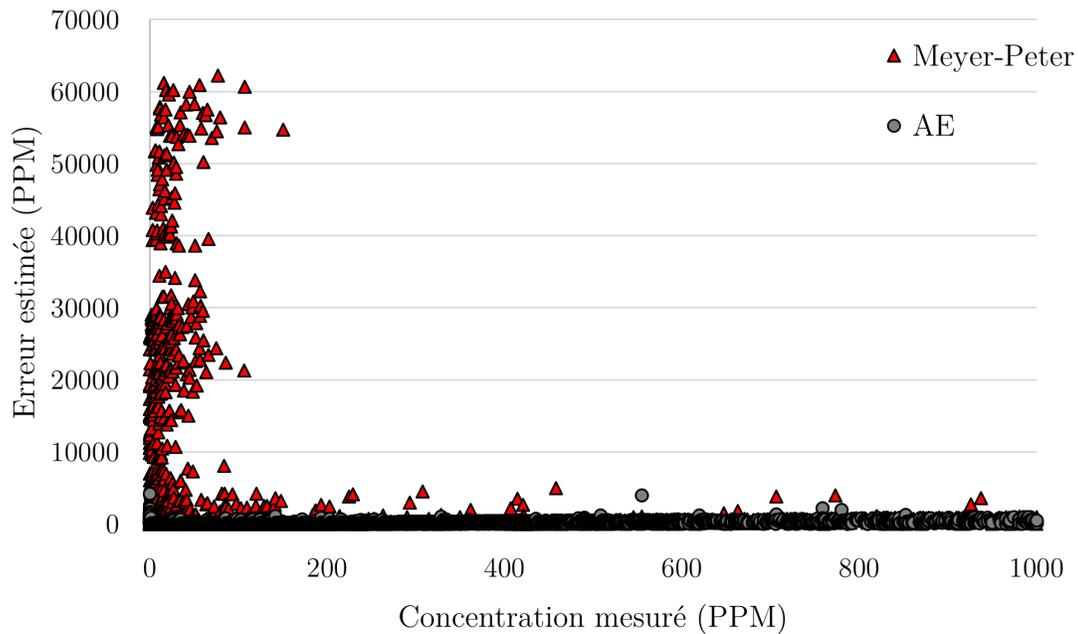


FIGURE 10.14 RMSE des équations de transport solide existantes, de l’algorithme ensembliste et de la régression par processus gaussien pour la base de données de transport sédimentaire provenant de la littérature

La plupart des équations de transport solide semblent présenter un RMSE similaire, avoisinant les 400 PPM. Cette différence significative entre la réalité et les estimations est attribuée à la diversité des comportements sédimentaires recensés dans la littérature. Les performances de la régression par processus gaussien sont légèrement supérieures à celles de l’algorithme ensembliste. Cependant, les erreurs d’estimation à concentration élevée sont nettement plus importantes que celles à concentration faible. Ainsi, la RMSE est fortement influencée par les estimations à débit solide élevé. Étant donné que l’équation de Meyer-Peter obtient les meilleurs résultats en termes de RMSE, il est pertinent de comparer les performances des modèles avec cette équation sur différentes plages de concentration. Les figures 10.15a et 10.15b illustrent l’erreur d’estimation de l’algorithme ensembliste et de l’équation de Meyer-Peter pour des concentrations mesurées allant jusqu’à 1 000 000 PPM et 1 000 PPM.



(a)



(b)

FIGURE 10.15 L'erreur absolue des estimations du débit solide en fonction de la concentration mesurée pour l'algorithme ensembliste et l'équation de Meyer-Peter pour **a)** le domaine total de la concentration **b)** les concentrations inférieures à 1000 PPM

La figure 10.15a montre que, pour les concentrations élevées, l'équation de Meyer-Peter fournit de meilleures estimations du transport sédimentaire. Par conséquent, on peut s'attendre à une meilleure RMSE par rapport à celle de l'algorithme ensembliste. En revanche, la figure 10.15b illustre que, pour les faibles concentrations, l'équation de Meyer-Peter a tendance à surestimer les débits solides. De plus, l'erreur d'estimation de l'algorithme ensembliste, pour des concentrations inférieures à 1 000 PPM, est significativement plus faible. Ainsi, le critère RMSE met en évidence les performances des algorithmes pour les concentrations élevées, au détriment de leurs performances pour les concentrations plus faibles. Néanmoins, il est possible d'appliquer le critère RMSE sur des échantillons plus petits, comme les mesures expérimentales, afin d'évaluer la performance des équations.

Évaluation du RMSE sur les mesures expérimentales

Les mesures expérimentales permettent de valider les algorithmes d'estimation du débit solide développés à partir de données fiables et d'une compréhension des incertitudes. Pour mieux cerner le domaine d'applicabilité de ces algorithmes, il est pertinent d'évaluer leurs performances pour chaque type de sol séparément. Les figures 10.16a à 10.16c illustrent les RMSE des équations de transport solide existantes, de la régression par processus gaussien et de l'algorithme ensembliste pour les expérimentations réalisées sur le gravier, le sable grossier et le sable fin.

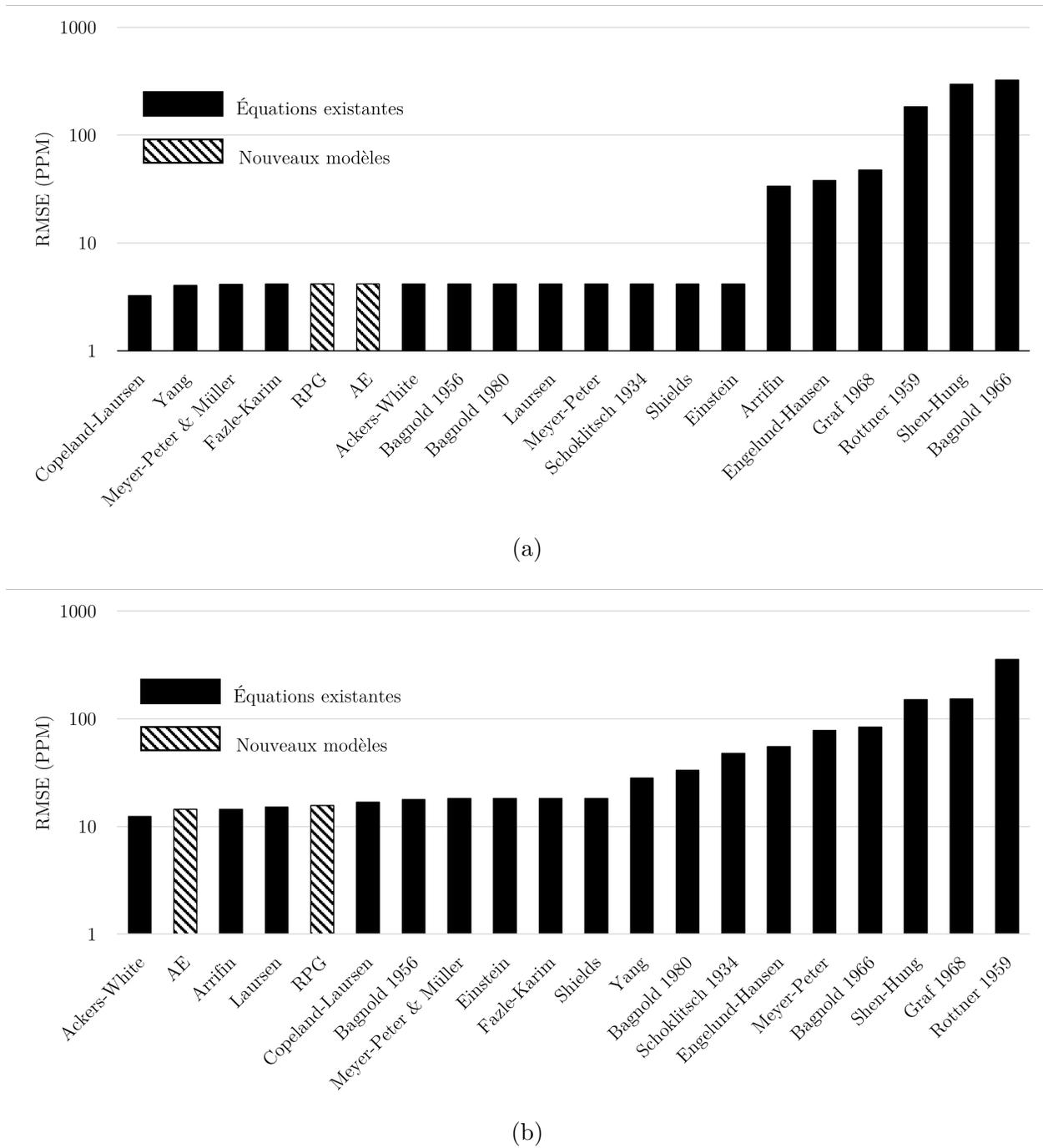
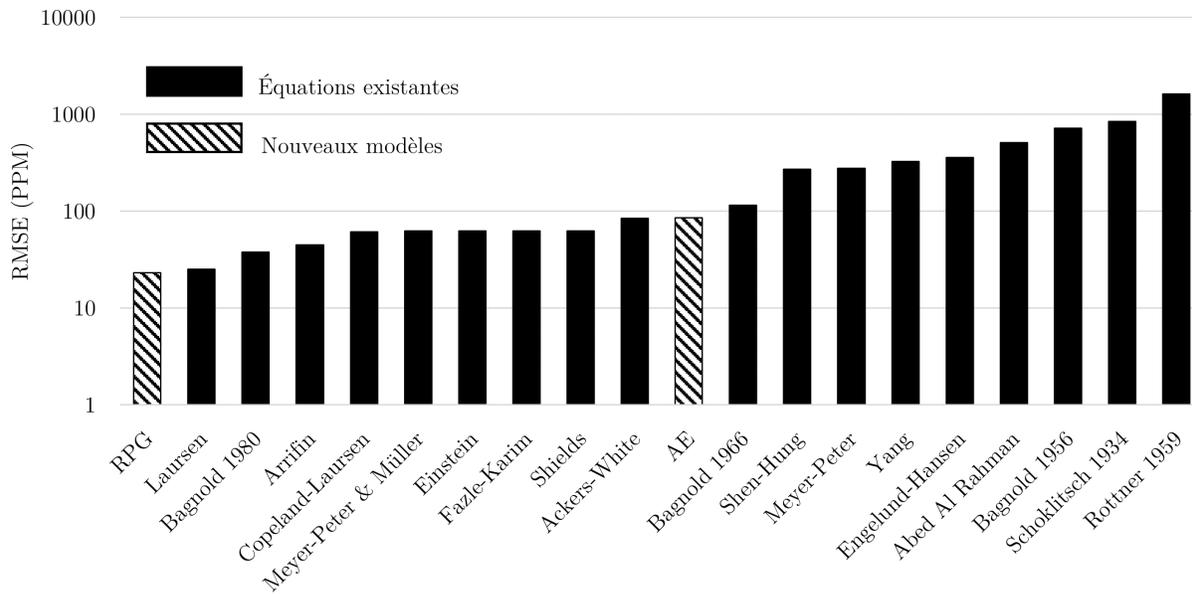


FIGURE 10.16 Le RMSE des équations de transport solide existantes, de la régression par processus gaussien et de l'algorithme ensembliste pour les expérimentations en laboratoire en fonction du a) Gravier b) Sable grossier c) Sable fin



(c)

FIGURE 10.16 Le RMSE des équations de transport solide existantes, de la régression par processus gaussien et de l’algorithme ensembliste pour les expérimentations en laboratoire en fonction du **a)** Gravier **b)** Sable grossier **c)** Sable fin (suite)

Pour les trois types de sols, la régression par processus gaussien figure parmi les cinq meilleures équations. De plus, elle affiche le meilleur RMSE pour le sable fin, ce qui indique que la RPG s’adapte efficacement aux différents types de sédiments présents dans le canal. En ce qui concerne l’algorithme ensembliste, ses résultats sont acceptables par rapport aux autres équations de transport solide pour le gravier et le sable grossier. Cependant, il se classe à la 11^{ème} position pour le sable fin. Malgré cette position, son RMSE est comparable à celui de l’équation de Copeland-Laursen, qui se classe cinquième et semble être la plus stable pour les trois types de sédiments.

10.3.4 Évaluation des performances avec le critère la moyenne des rangs

Étant donné que le critère de performance du RMSE met en évidence les erreurs d’estimation pour les concentrations élevées au détriment de celles à faibles concentrations, la méthode de la moyenne des rangs est adoptée. Cette approche consiste à calculer la moyenne des classements de chaque équation, permettant ainsi une pondération équivalente des données lors de l’évaluation de leur performance. Les performances des équations de transport solide et des algorithmes sont évaluées en utilisant ce critère, en se basant sur les bases de données

provenant de la littérature et sur les mesures expérimentales.

Évaluation de la moyenne de rang sur la base de données provenant de la littérature

L'utilisation du critère de la moyenne des rangs sur la base de données provenant de la littérature, qui est composée de comportements hétérogènes, permet de mettre en évidence les équations de transport solide applicables à un domaine plus général. La figure 10.17 illustre la moyenne des rangs pour les équations de transport solide existantes, l'algorithme ensembliste et la régression par processus gaussien. Il est important de noter que l'évaluation des performances par la moyenne des rangs des deux algorithmes a été réalisée séparément afin d'éviter qu'ils n'influencent mutuellement leurs classements.

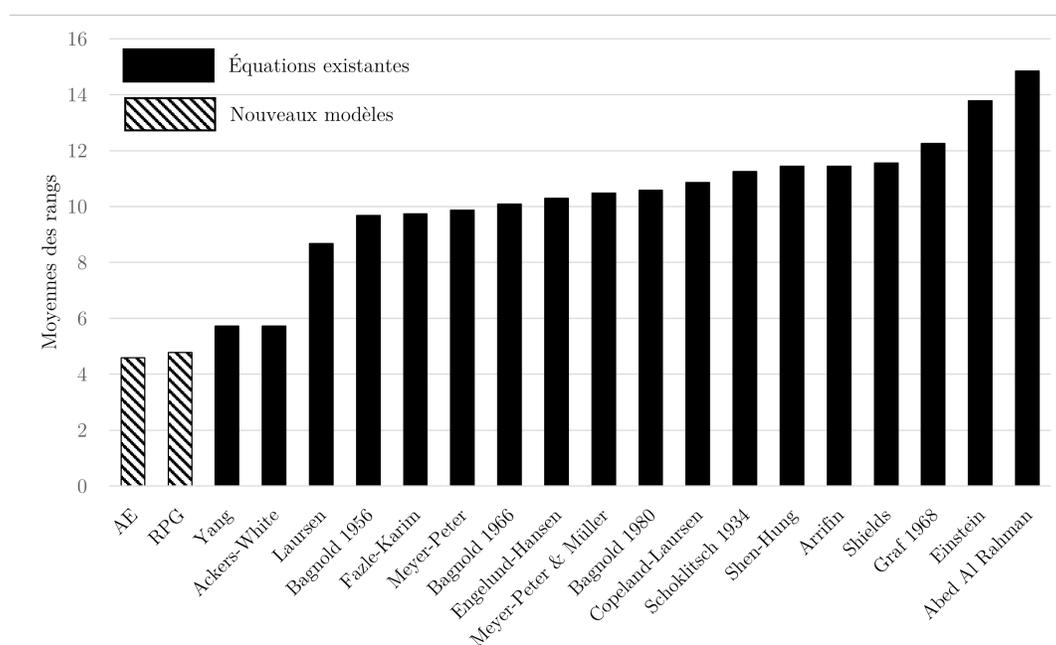
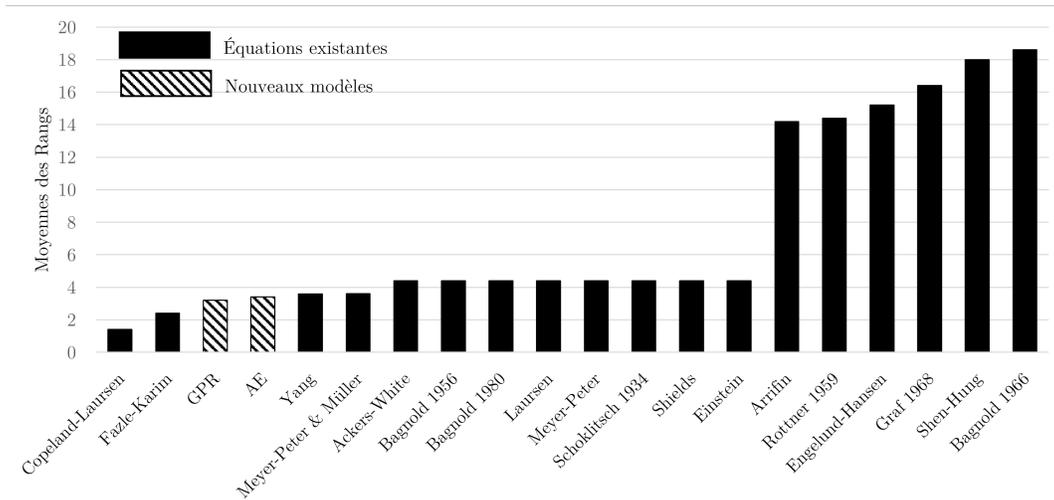


FIGURE 10.17 La moyenne des rangs des équations de transport solide existantes et des modèles développés pour la base de données de transport sédimentaire provenant de la littérature

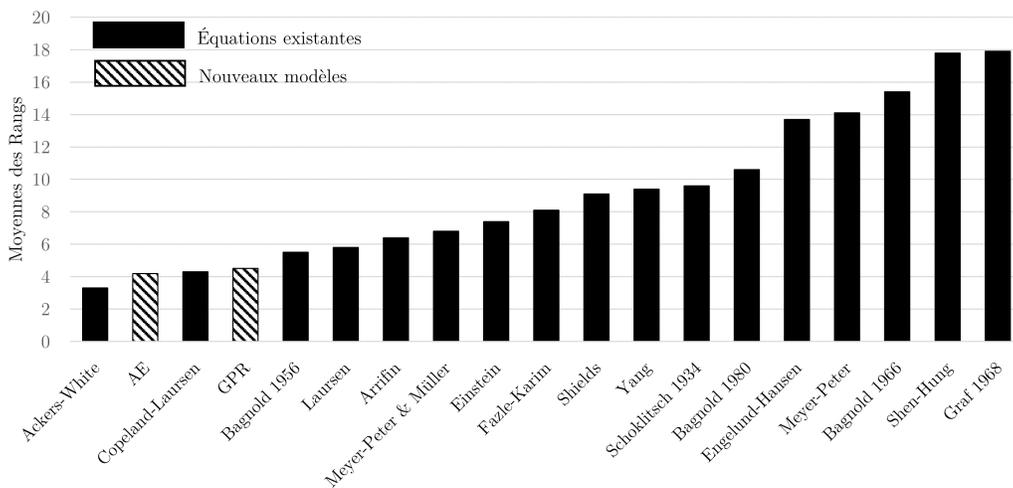
Pour les deux modèles, ceux-ci obtiennent les meilleures moyennes des rangs avec 4,59 pour l'algorithme ensembliste et 4,77 pour la régression par processus gaussien. De plus, il est important de noter que les équations de Yang ainsi que celle d'Ackers et White révisées sont plus performantes que les autres équations selon le critère de la moyenne des rangs.

Évaluation de la moyenne des rangs sur les mesures expérimentales

L'objectif de cette sous-section est de comparer la performance des modèles d'estimation du débit solide en utilisant la moyenne des rangs sur les données expérimentales collectées dans le cadre de cette recherche. La figure 10.18 présente les moyennes des rangs des équations de transport solide et des modèles développés, en fonction des types de sols des expérimentations.

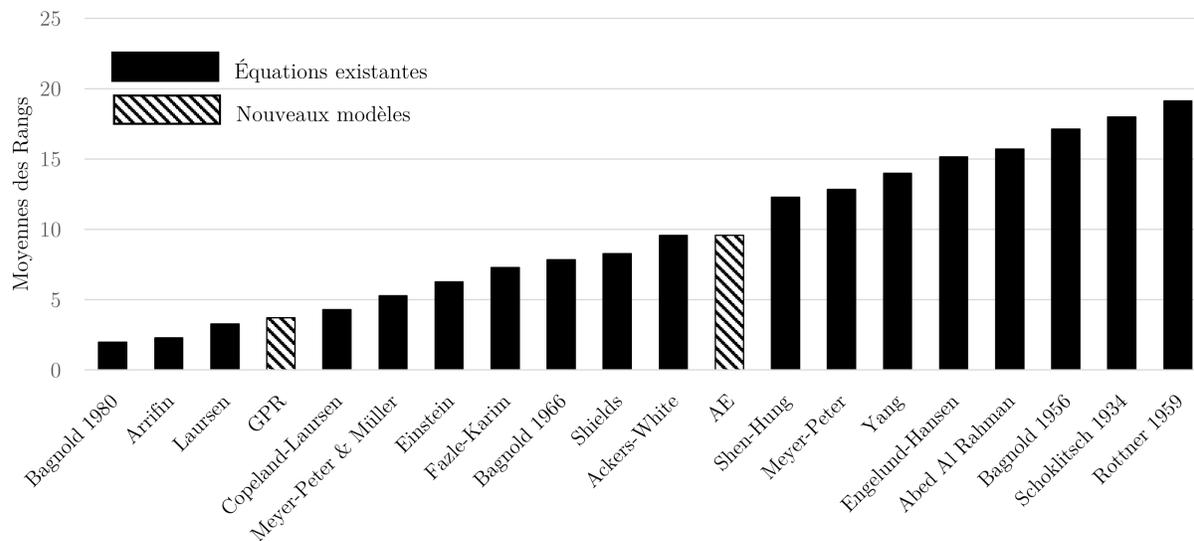


(a)



(b)

FIGURE 10.18 La moyenne des rangs des équations de transport solide existantes et des modèles développés pour les expérimentations en laboratoire en fonction du a) Gravier b) Sable grossier c) Sable fin



(c)

FIGURE 10.18 La moyenne des rangs des équations de transport solide existantes et des modèles développés pour les expérimentations en laboratoire en fonction du a) Gravier b) Sable grossier c) Sable fin (suite)

En ce qui concerne les mesures expérimentales, il est essentiel de noter que, étant donné le nombre relativement faible de données, une seule erreur d'estimation peut avoir une influence significative sur l'analyse des performances. Pour les expérimentations sur le gravier et le sable grossier, l'algorithme ensembliste se classe respectivement en troisième et deuxième position selon le critère de la moyenne des rangs. Cependant, il occupe la 11^{ème} position pour le sable fin, ce qui est similaire à sa performance selon le critère du RMSE. Cela peut être attribué à la complexité du comportement sédimentaire du sable fin lors des expérimentations.

La régression par processus gaussien se classe quatrième pour le gravier et troisième pour le sable grossier ainsi que pour le sable fin. Elle est également l'équation la plus stable, aux côtés de l'équation de Copeland-Laursen. Les performances de la RPG, évaluées à l'aide du critère de la moyenne des rangs, soulignent la qualité de l'extraction des listes de données homogènes utilisées pour sa calibration.

10.3.5 Variation des rangs en fonction de la concentration

Les performances des algorithmes d'estimation du débit solide dépendent des conditions hydrauliques et physiographiques des cours d'eau à l'étude. Il est donc pertinent d'examiner la performance des algorithmes développés en fonction des caractéristiques sédimentaires.

La figure 10.19 illustre la moyenne mobile de 100 données des rangs de la régression par processus gaussien et de l'algorithme ensembliste en fonction de la concentration mesurée.

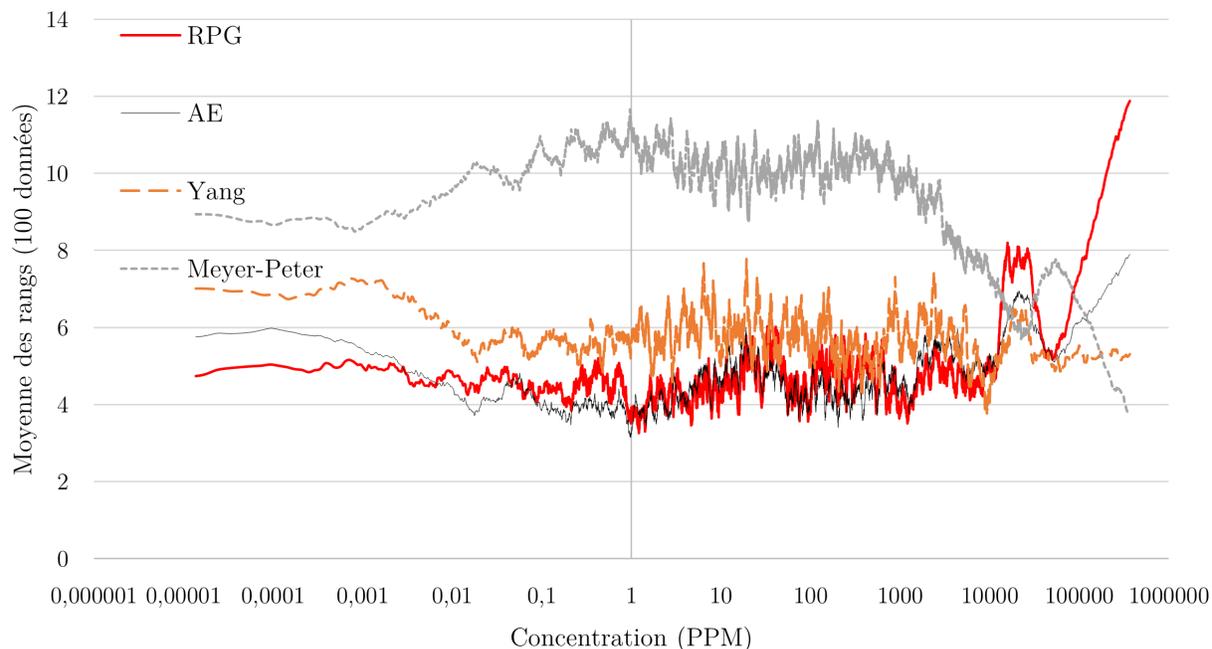


FIGURE 10.19 La moyenne des rangs des nouveaux modèles d'estimation et d'équations de transport solide existantes en fonction de la concentration (PPM) mesurée

La figure 10.19 met en évidence que, pour des concentrations inférieures à 10 000 PPM, les deux modèles d'estimation du transport sédimentaire développés présentent de bonnes performances. L'équation de Meyer-Peter est incluse, car elle affiche la meilleure RMSE sur les données de la littérature, tandis que l'équation de Yang se distingue par la meilleure moyenne des rangs parmi les équations de transport solide existantes. Il est notable que l'équation de Meyer-Peter se classe mieux pour les concentrations élevées. En ce qui concerne les modèles développés, leur rang se situe approximativement à la cinquième position pour les concentrations allant de 0 à 10 000 PPM. Cependant, pour les concentrations supérieures à 100 000 PPM, la RPG semble perdre en performance. Cela s'explique par le fait que les listes de données homogènes sont moins représentatives des écoulements à débit solide élevé en raison du manque de données dans la littérature. Néanmoins, on peut conclure que les modèles développés sont performants pour des concentrations inférieures à 10 000 PPM.

CHAPITRE 11 DISCUSSION ET CONCLUSION

Le chapitre suivant présente une discussion détaillée des résultats obtenus. Par la suite, l'originalité, les impacts ainsi que les contributions du projet de recherche sont mis en évidence. Les limitations et recommandations de la recherche sont élaborées avant de conclure avec une synthèse du projet.

11.1 Discussion

L'objectif principal de cette recherche est de développer un algorithme intégrant la régression par processus gaussien et un algorithme ensembliste pour améliorer l'estimation du transport sédimentaire par charriage des matériaux non cohésifs. Cet algorithme a été conçu pour tenir compte des conditions hydrauliques, physiographiques et sédimentaires spécifiques aux rivières, dans le cadre de modélisations en hydraulique d'écoulement à surface libre à fond mobile.

Cette discussion permet ainsi de mettre en lumière les forces et les limites de la méthodologie employée, tout en soulignant les implications pratiques des résultats pour l'estimation du transport sédimentaire dans les systèmes fluviaux. Les perspectives d'amélioration et les futures orientations de recherche sont également abordées, afin de contribuer à une meilleure compréhension et modélisation des processus de transport solide en hydraulique fluviale.

11.1.1 Analyse de l'incertitude du protocole expérimentale des mesures de transport solide

L'incertitude est une composante inévitable de toute expérimentation scientifique, en particulier dans le contexte des mesures hydrauliques et sédimentaires. Les instruments de mesure et les protocoles expérimentaux introduisent des marges d'erreur qui peuvent affecter la précision et la répétabilité des résultats [227]. Il est donc essentiel de quantifier ces incertitudes pour mieux comprendre la variabilité des données et évaluer la fiabilité des conclusions tirées.

Dans ce contexte, les incertitudes associées aux mesures du débit liquide sont investiguées pour évaluer la répétabilité des expérimentations. La précision des mesures de débit liquide peut être affectée par plusieurs facteurs, notamment les variations temporelles dues au système d'alimentation et à la configuration expérimentale. En supposant l'absence de fuites notables dans le canal expérimental, on peut considérer que le débit est uniforme sur l'ensemble du canal. Toutefois, les variations temporelles du débit, causées principalement par les

fluctuations dans l'alimentation du canal, peuvent induire des variations significatives dans le comportement hydraulique. Il est à noter que pour l'ensemble des expérimentations, aucun mouvement n'a été observé au niveau de la vanne. Ainsi, la cause principale des incertitudes de la variation du débit à court terme dans le canal est la variation de l'élévation de l'eau à l'intérieur du château d'eau.

Différentes méthodes sont utilisées pour mesurer le débit liquide dans un canal expérimental. L'une de ces méthodes est la vélocimétrie par images de particules (PIV) qui permet d'identifier le déplacement des particules d'eau [228]. Une autre approche est d'utiliser des capteurs de pression pour isoler le paramètre de vitesse de l'écoulement spécifique [229]. Ces approches peuvent être utilisées pour mesurer la vitesse d'écoulement en régime non-permanent et considérer la section d'écoulement pour calculer le débit avec l'équation de continuité. ($Q = UA$).

Dans cette recherche, les expérimentations ont été conçues pour être quasi-uniformes et quasi-permanentes, bien que certaines incertitudes demeurent en raison du système d'alimentation et de la géométrie du canal. Les variations instantanées du débit causées par le système d'alimentation ont été estimées à environ $10 \text{ m}^3/h$, indépendamment du débit global dans le canal. Cette variation a un impact plus prononcé sur les expérimentations à débit faible, où l'hypothèse d'un écoulement quasi-permanent est moins respectée. Une conséquence directe de ces variations du débit est la modification instantanée des paramètres hydrauliques tels que la vitesse d'écoulement moyenne et la profondeur d'eau, ce qui peut influencer les mesures de débit solide instantané et, par conséquent, la précision du débit solide moyen.

L'analyse des incertitudes a révélé que les types de sédiments influencent également la sensibilité aux variations du débit. Par exemple, les graviers, qui nécessitent une contrainte de cisaillement minimale plus élevée pour initier leur mise en mouvement, sont soumis à des débits liquides plus importants et sont donc moins sensibles aux fluctuations de débit. En revanche, pour les expérimentations portant sur le sable fin et grossier, avec un débit liquide avoisinant les $100 \text{ m}^3/h$, soit une variation relative d'environ 10%, les modifications instantanées des conditions hydrauliques sont proportionnellement plus marquées. Cela peut entraîner un impact significatif sur le débit solide instantané mesuré. En effet, les sédiments plus fins, tels que le sable, se montrent plus sensibles aux fluctuations de débit, ce qui peut affecter la précision des mesures de débit solide.

Concernant la profondeur d'eau mesurée, le sable grossier et le gravier montrent une stabilité dans le temps, tandis qu'une variation significative de l'élévation du sol est observée pour le sable fin. Cette variation est causée par une modification morphologique de la couche de sédiment, due au transport sédimentaire, et non par les instruments de mesure. Cette

variabilité de la couche du sol entraîne la formation de dunes sur l'axe longitudinal et latéral du canal, ce qui peut provoquer des variations locales de la vitesse d'écoulement au niveau des dunes. Cette variation du sol est naturelle lors du transport sédimentaire. Le régime d'écoulement et la vitesse d'écoulement contrôlent le type de modification du lit du canal par la formation d'ondulation, de dunes ou d'anti-dunes [230]. Ainsi, les variations causées par la morphologie du lit du canal n'affectent pas la précision des mesures, mais incluent la variabilité intrinsèque au transport des sédiments.

L'uniformité de l'écoulement a été étudiée en observant la profondeur d'eau en fonction de l'axe longitudinal. En raison de la disposition du réceptacle à sédiment, un creux est présent dans le canal, causant une variation brusque du fond du canal et affectant la profondeur d'écoulement au niveau du réceptacle. Une variation de 2 mm et 5 mm a été observée pour le sable fin et grossier respectivement. Cette légère variation est attendue, car la vitesse d'écoulement est faible, et une moindre variation de la profondeur d'eau est nécessaire pour équilibrer l'énergie spécifique [34]. De plus, cette variation est suffisamment faible pour considérer l'écoulement comme quasi-uniforme. Cependant, la variation de la profondeur d'eau sur le gravier avoisine 25 mm, s'approchant plus d'un écoulement non-uniforme, ce qui nécessite de prendre en compte la pente énergétique. Il est donc probable qu'une différence notable existe entre la pente énergétique et celle du fond du canal. Un comportement hydraulique non-uniforme peut augmenter le transport sédimentaire puisque l'accélération convective peut appliquer une pression supplémentaire sur le lit du canal [231]. De ce fait, les résultats des expérimentations sur le gravier peuvent surestimer le débit solide attendu. Ce phénomène semble être observé puisque la majorité des équations de transport solide estime une concentration nulle pour les expérimentations sur le gravier.

Concernant le débit solide mesuré, la variation du débit solide instantané est proportionnelle au débit solide moyen. Toutefois, il a été montré que le débit solide instantané présente une forte variation [232]. Ainsi, lorsque le débit et la vitesse d'écoulement sont plus élevés, le débit solide mesuré devient plus variable. Cela peut être dû à la formation de dunes, qui agissent comme des zones de stockage se vidant dans le réceptacle sur une courte durée. Il est important de noter que le débit solide moyen n'est pas affecté par la variation du débit instantané si la durée d'expérimentation est suffisamment longue. Il est possible de supposer que le débit solide moyen mesuré lors des expérimentations est adéquat malgré la variation naturelle du débit solide instantané en raison des longues périodes de mesure.

Un sol présentant une distribution granulométrique étendue induit des interactions hydro-sédimentaires plus complexes, influençant significativement les mécanismes de transport solide [233, 234]. Les expérimentations ayant été conduites sur trois types de sédiments à gra-

nulométrie uniforme, il serait pertinent de tester les performances des nouveaux modèles d'estimation sur des sols à distribution granulométrique non uniforme. Une telle approche permettrait d'évaluer leur robustesse face à des conditions sédimentaires plus réalistes et d'élargir leur domaine d'application aux configurations hydrosédimentaires complexes.

En résumé, les résultats obtenus lors des expérimentations sont attendus. Le régime d'écoulement quasi-permanent est atteint lors des expérimentations. En ce qui concerne la quasi-uniformité de l'écoulement, celle-ci est atteinte pour les expérimentations sur le sable fin et grossier, mais s'approche plus d'un écoulement non-uniforme pour le gravier. Toutefois, ces expérimentations sont pertinentes pour évaluer la performance des modèles développés et peuvent être ajoutées comme données supplémentaires dans la base de données provenant de la littérature.

11.1.2 Mesures existantes du transport solide et homogénéisation des écoulements

Les résultats obtenus à partir de l'extraction des listes de données similaires à un écoulement à l'étude mettent en lumière plusieurs points cruciaux concernant l'efficacité des méthodes utilisées pour évaluer les équations de transport solide. Cette homogénéité est essentielle pour garantir que les modèles développés puissent être évalués de manière fiable et précise.

La majorité des modèles d'estimation du débit solide développés repose sur de petites bases de données expérimentales [147,235], utilise des ensembles de données limités à un domaine restreint [8], ou sont calibrée pour des rivières spécifiques [236,237]. L'algorithme d'extraction de données homogènes pour un écoulement donné permet de faciliter la sélection des données appropriées pour l'utilisation des équations de transport solide existantes. Les données extraites peuvent être utilisées pour aider l'ingénieur à choisir l'équation de transport solide la plus adaptée et pour recalibrer les coefficients afin de les ajuster aux caractéristiques d'une rivière particulière. En s'appuyant sur des paramètres adimensionnels significatifs décrivant le comportement sédimentaire, il est possible d'assurer l'utilisation d'un ensemble de données pertinent pour l'estimation précise du débit solide.

La création de listes homogènes a révélé que, pour une majorité des cas, une taille de 50 données est adéquate pour représenter les conditions hydrauliques et sédimentaires des rivières à l'étude. La borne inférieure de 50 données est principalement choisie pour réduire le temps de calcul de l'algorithme sachant le nombre important de comparaisons nécessaire. La performance de l'algorithme d'extraction de données homogènes n'est pas influencée pour les listes contenant plus de 50 données. Cependant, il est crucial de noter que cette limite, bien que pratique pour des raisons de temps de calcul, peut parfois compromettre la précision

dans des contextes spécifiques où une plus grande quantité de données pourrait offrir une meilleure représentativité.

En ce qui concerne la représentativité des données, les résultats montrent une bonne concordance entre les concentrations mesurées et celles issues des listes de données homogènes, notamment pour les concentrations inférieures à 10 000 PPM. Cette correspondance suggère que les listes de données capturent efficacement les comportements sédimentaires caractéristiques des rivières étudiées. Cependant, pour les concentrations supérieures à 10 000 PPM, une diminution du nombre de données disponibles ainsi qu'une augmentation de l'incertitude sont notées. Cela met en lumière la nécessité d'enrichir la base de données avec des mesures à haute concentration afin d'améliorer la précision et la fiabilité des modèles.

L'analyse des variables adimensionnelles confirme que les domaines de ces variables dans les listes homogènes suivent généralement les tendances observées dans les mesures réelles. La relation entre la concentration et le paramètre des particules, la puissance de courant unitaire ainsi que la vitesse adimensionnelle suivent la tendance attendue, à l'exception des limites extrêmes des domaines de mesure en raison du manque de données enregistrées. Cependant, les limites des domaines sont généralement plus grandes pour un nombre de Froude élevé, ce qui peut refléter un manque de données pour les régimes torrentiels. Les limites du débit unitaire adimensionnel montrent une bonne concordance avec les valeurs mesurées, bien que certaines limites inférieures soient significativement plus faibles. Ces observations suggèrent que, bien que les domaines des variables adimensionnelles soient principalement représentatifs, il existe des écarts pour certaines conditions spécifiques qui nécessitent une attention particulière.

Bien que les listes de données homogènes fournissent une base solide pour l'évaluation des équations de transport solide, les résultats mettent en évidence des domaines nécessitant des améliorations. L'enrichissement des bases de données avec des mesures à haute concentration et pour des régimes hydrauliques extrêmes permettrait d'améliorer la précision et la représentativité des listes de données homogènes extraites. Ces améliorations contribueront à une meilleure compréhension des comportements sédimentaires et à une évaluation plus précise des équations de transport solide, offrant ainsi des outils plus robustes pour la gestion des sédiments dans les rivières étudiées.

11.1.3 Régression par processus gaussien et algorithme ensembliste pour l'estimation du débit solide

Cette section discute de l'atteinte des objectifs de cette au travers de l'application et la performance de la régression par processus gaussien (RPG) et de l'algorithme ensembliste

(AE) pour l'estimation du débit solide en rivière.

L'évaluation des performances est réalisée à l'aide de deux critères : la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et la moyenne des rangs. La RMSE est particulièrement efficace pour évaluer les performances de prédiction d'un modèle lorsque les erreurs suivent une distribution normale [238]. La majorité des équations de transport solide utilise la RMSE pour évaluer leurs performances, car elles traitent généralement des comportements sédimentaires relativement homogènes [11, 93, 94]. Cependant, cette méthode tend à accorder une importance aux erreurs de grande amplitude en raison de son caractère quadratique. Par conséquent, dans le cadre d'une base de données fortement hétérogène, la RMSE peut diluer les estimations à faible concentration. Cette approche est donc bien adaptée pour évaluer les performances des modèles sur les données issues du montage expérimental, tandis que le critère de la moyenne des rangs est plus approprié pour les données tirées de la littérature.

La régression par processus gaussien, une technique de régression non paramétrique, est particulièrement efficace pour modéliser des relations complexes et non linéaires entre les variables d'entrée et les débits solides [176]. Cette méthode repose sur des fonctions aléatoires, ce qui permet de prédire les débits solides avec des intervalles de confiance quantifiés, offrant ainsi une estimation plus robuste. Sa flexibilité à capturer des comportements non linéaires et sa capacité à intégrer des informations a priori en font un outil pertinent en hydraulique des sédiments. Les résultats montrent que le modèle RPG est performant pour des concentrations allant de 0 à 10 000 PPM, avec une précision notable dans les plages de concentration courantes.

Les algorithmes ensemblistes combinent plusieurs modèles de régression pour fournir des prédictions plus robustes. Cette approche permet de réduire le risque de surcalibration et d'améliorer la généralisation des prévisions en intégrant les résultats de divers modèles. Cependant, une tendance à sous-estimer les débits solides a été observée. Étant donné que ces algorithmes utilisent une pondération des équations de transport solide existantes, cette sous-estimation peut être attribuée à la tendance de ces équations à sous-estimer le transport sédimentaire. Pour pallier cette limitation, l'ajout d'équations de transport solide dans l'algorithme ensembliste pourrait améliorer l'ajustement des prédictions.

La comparaison entre les modèles développés, à savoir la régression par processus gaussien et les algorithmes ensemblistes, et les équations de transport solide traditionnelles, révèle que les méthodes avancées offrent souvent une meilleure précision. En effet, les performances sur les expérimentations montre que la RPG classe parmi les meilleurs pour les trois types de sols et que l'algorithme ensembliste performe sur le gravier et sable grossier. De plus, l'algorithme ensembliste et la RPG se classent en première et deuxième position respective-

ment pour les données provenant de la littérature selon le critère de la moyenne des rangs, avec une moyenne de 4,59 et 4,77. Concernant les équations de transport solide existantes, bien qu'efficaces dans des contextes bien définis, ne capturent pas toujours adéquatement les variations complexes observées dans les données expérimentales. Les équations de Yang et Ackers et White révisé se distinguent par leur flexibilité dans la modélisation de comportements sédimentaires hétérogènes grâce à leur approche physique basée sur la minimisation de l'énergie. Il serait pertinent d'explorer davantage cette approche pour calibrer des équations adaptées à un domaine sédimentaire plus étendu.

Les modèles développés ont été comparés aux équations de transport solide existantes, fondées sur des principes physiques bien établis. Cependant, avec les avancées technologiques récentes, plusieurs modèles d'estimation basés sur l'apprentissage automatique, tels que les réseaux de neurones artificiels, ont vu le jour [8,239,240]. Il serait pertinent d'évaluer les performances de l'algorithme ensembliste et de la régression par processus gaussien dans le cadre du transport sédimentaire en les comparant à celles d'autres algorithmes d'apprentissage automatique. Une telle analyse permettrait d'identifier les approches les plus robustes et adaptées aux contextes hydrosédimentaires complexes.

11.2 Originalité et impacts

Les objectifs de cette recherche visaient à développer des outils et des méthodes permettant d'améliorer l'estimation du débit solide par charriage de matériaux non cohésifs, en se basant sur des données expérimentales et de terrain. Les contributions principales de cette étude peuvent être résumées en quatre points majeurs.

La première contribution est la création d'une base de données, contenant 11 463 données issues de conditions naturelles et expérimentales. Cette base de données intègre des paramètres hydrauliques, physiographiques et sédimentaires essentiels pour l'application des équations de transport solide existantes. Elle représente une avancée significative en offrant un outil de référence pour la calibration et la réforme des équations de transport solide, permettant une adaptation plus fine aux domaines d'application spécifiques. Grâce à cette base de données, il est désormais possible d'explorer en profondeur la relation entre les paramètres d'écoulement et le comportement sédimentaire, ouvrant la voie à une meilleure compréhension des variations des paramètres significatifs en fonction de la concentration. Cette contribution est particulièrement importante pour les nouvelles méthodes d'intelligence artificielle, qui nécessitent des ensembles de données complets pour améliorer leurs performances.

La deuxième contribution innovante de cette recherche est le développement d'un algorithme

original permettant d'extraire une liste de données homogènes spécifiques à une rivière donnée. Cet algorithme n'a pas d'équivalent dans la littérature existante et constitue une avancée notable. Il permet de créer une base de données sur un domaine d'étude spécifique, facilitant ainsi la calibration ou l'évaluation des équations de transport solide sans nécessiter de nouvelles mesures sur le terrain. Cette liste de données homogènes sert également de guide pour les ingénieurs dans le choix des équations les plus appropriées, évitant ainsi les erreurs d'extrapolation. De plus, ces données homogènes peuvent être utilisées pour recalibrer des équations existantes ou en développer de nouvelles adaptées à des domaines d'études spécifiques.

La troisième contribution est l'introduction et l'implémentation de la régression par processus gaussien dans le domaine du transport sédimentaire. Ce type de régression non paramétrique est particulièrement efficace pour estimer des phénomènes complexes, mais n'avait pas encore été largement exploré dans ce domaine en raison de la nature hétérogène des données et du nombre élevé de paramètres de calibration. Toutefois, la transformation des paramètres dimensionnels en paramètres adimensionnels a permis de réduire le nombre de variables significatives, tandis que l'extraction de données homogènes a éliminé les comportements hétérogènes des données utilisées pour la calibration. Ces avancées ont permis de surmonter les obstacles traditionnels à l'utilisation de la RPG dans le domaine du transport sédimentaire, offrant ainsi une méthode robuste et adaptative pour l'estimation du débit solide.

Enfin, la dernière contribution majeure est la combinaison de plusieurs équations de transport solide pour estimer un débit solide unique à l'aide d'un algorithme ensembliste. Le domaine du transport sédimentaire compte près d'une centaine d'équations, chacune utilisant différentes approches physiques pour estimer le débit solide. L'algorithme ensembliste combine les forces de ces équations pour pallier leurs faiblesses, démontrant une flexibilité remarquable sur différents types d'écoulements. Cette approche a non seulement montré une meilleure performance en fonction du critère de la moyenne des rangs comparativement aux équations de transport solide existantes, mais elle a également permis d'obtenir des estimations plus robustes et fiables dans des contextes variés.

En somme, cette recherche a abouti à des outils et des méthodes novateurs qui non seulement améliorent la précision des estimations du débit solide, mais offrent également des solutions flexibles et adaptatives pour les applications futures dans le domaine du transport sédimentaire. Ces contributions sont essentielles pour le développement de modèles plus performants et pour une meilleure prise de décision dans la gestion des sédiments.

11.3 Limitations et perspectives

Les limitations et recommandations du projet de recherche sont présentées en fonction du montage expérimental, de la base de données provenant de la littérature, de l'algorithme d'extraction de la liste de données homogènes et des algorithmes d'estimations développés.

11.3.1 Montage expérimental

Le domaine des écoulements expérimentaux est restreint par les limites du montage expérimental. En effet, la validation des algorithmes a été effectuée sur du gravier, du sable grossier et du sable fin uniformes, avec un débit maximal de $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$ et une pente longitudinale de 0,4% dans un canal rectangulaire. Il est donc recommandé d'utiliser un canal expérimental à pente variable et d'augmenter le débit maximal possible afin d'élargir le domaine de validation des modèles.

Le système d'alimentation du débit liquide subit quelques fluctuations instantanées sur la période totale des expérimentations. Cette fluctuation du débit peut s'opposer à l'hypothèse qu'un écoulement quasi-permanent est étudié lors des expérimentations. Un système d'alimentation plus robuste pourrait être utilisé pour assurer la permanence de l'écoulement lors des expérimentations.

Pour les expérimentations sur le gravier, la dénivelée brusque causée par le réceptacle à sédiment influence l'uniformité de l'écoulement. Ainsi, un canal plus long permettrait de stabiliser l'écoulement et assurer que les expérimentations sont en milieu uniforme.

Différent instrument de mesure peut être utilisé pour mesurer le débit solide instantané et moyen tel que la vélocimétrie par images de particules (PIV) qui offre une méthode pour visualiser l'écoulement en fonction de la profondeur et permet de mieux quantifier le débit solide instantané. Cette méthode de mesure peut permettre une investigation plus approfondie sur l'estimation du débit solide instantané.

Ces modifications au montage expérimental permettraient de réduire les incertitudes de mesure ainsi que d'augmenter le domaine des expérimentations utilisé pour la validation des algorithmes développés.

11.3.2 Extraction de liste de données homogènes

Les 11 463 données recensées dans la littérature concernent majoritairement des débits solides inférieurs à 10 000 PPM. Par conséquent, il serait pertinent d'ajouter un plus grand nombre de mesures à concentrations élevées pour mieux évaluer le comportement sédimentaire dans

ces domaines d'écoulement. De plus, il serait judicieux d'intégrer d'autres paramètres, tels que la végétation ou le coefficient d'uniformité, afin d'inclure une gamme plus complexe de comportements sédimentaires.

Le comportement homogène est rarement observé pour les concentrations supérieures à 10 000 PPM. Cette situation est due au manque de données disponibles dans la littérature concernant ce type de comportement sédimentaire. Cependant, il peut être pertinent de réduire le nombre de données dans les listes de données homogènes à haute concentration afin de maintenir un comportement homogène. L'utilisation récurrente de cet algorithme dans les futurs contextes de transport sédimentaire permet l'ajout de celles-ci dans la base de données pour élargir et enrichir les données en conditions extrêmes.

Chaque paramètre adimensionnel utilisé pour l'extraction d'une liste de données similaires à un écoulement à l'étude est supposé également significatif. De ce fait, l'agrandissement des domaines des paramètres adimensionnels est identique pour chacune des variables. Ainsi, il est possible d'obtenir des domaines des paramètres adimensionnels qui se retrouvent à l'extérieur des valeurs mesurées. Il peut être intéressant d'investiguer un élargissement variable en fonction des différents paramètres proportionnelle à leur sensibilité sur la concentration.

11.3.3 Algorithmes d'estimation du débit solide

Pour l'algorithme ensembliste, une sous-estimation des débits solides est observée. L'ajout d'équations de transport solide existantes pourrait donc compenser cette faiblesse. En outre, l'utilisation d'équations dont le domaine d'application inclut des concentrations supérieures à 10 000 PPM pourrait contribuer à pallier le manque de données mesurées dans la littérature. Il serait également intéressant d'évaluer différentes méthodes pour pondérer les équations de transport solide sélectionnées en les associant à l'algorithme ensembliste, en recourant à des techniques d'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones artificiels ou les algorithmes de forêt aléatoire.

Pour la régression par processus gaussien, les points de départ des longueurs de dépendance sont tous équivalents. Toutefois, certains paramètres adimensionnels sont plus significatifs que d'autres et pourraient avoir des longueurs de dépendances plus faibles. De plus, la fonction de covariance est la même pour l'ensemble des estimations. Il peut être pertinent de faire une analyse de sensibilité des paramètres de calibration en fonction de différent domaine de concentration.

11.3.4 Étude de cas

Il serait pertinent d'appliquer les algorithmes développés dans le cadre de cette recherche sur une étude de cas. Toutefois, cette étape nécessite un grand nombre de données listées ci-dessous :

- La topographie du cours d'eau utilisée pour l'étude de cas
- Un débit liquide mesuré et fixe dans le temps pour être en régime quasi-permanent
- Une condition frontière aval connue et documentée telle qu'un ouvrage de contrôle
- Une bathymétrie récente et précise
- Une connaissance sur les types de sédiments dans le fond du cours d'eau pour assurer une granulométrie uniforme, un diamètre médian inclus dans les domaines d'estimation ainsi qu'une connaissance approfondie sur le coefficient de Manning de la rivière
- Plusieurs débits solides mesurés avec une connaissance sur l'incertitude des mesures

Ces éléments sont indispensables pour faire une modélisation hydraulique à fond mobile. De plus, il faut prendre en considération que la précision des données fournies influence directement la validation des algorithmes.

CHAPITRE 12 CONCLUSION

Cette thèse a pour objectif principal de développer une méthode innovante pour améliorer l'estimation du transport sédimentaire par charriage de matériaux non cohésifs en rivière. En intégrant un algorithme ensembliste avec une régression par processus gaussien, le projet a cherché à prendre en compte plus précisément les conditions hydrauliques, physiographiques et sédimentaires des rivières, dans le cadre de modélisations hydrauliques d'écoulement à surface libre à fond mobile. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de cette approche combinée, permettant non seulement de réduire l'incertitude des estimations, mais également de mieux capturer les comportements complexes des flux de sédiments, souvent négligés par les modèles traditionnels. Les comparaisons avec des méthodes existantes montrent une amélioration significative de la précision des estimations de débit solide, un aspect crucial pour la gestion durable des cours d'eau.

En se basant sur ces résultats, plusieurs recommandations peuvent être formulées. D'abord, il est fortement conseillé aux gestionnaires de ressources en eau et aux ingénieurs d'adopter des modèles probabilistes, comme ceux développés dans cette thèse, afin d'améliorer la précision des estimations de transport sédimentaire. L'intégration systématique de variables adimensionnelles dans les analyses hydrauliques et sédimentaires est également recommandée pour une meilleure compréhension des interactions complexes entre les forces hydrauliques et les caractéristiques sédimentaires, augmentant ainsi la robustesse des modèles. De plus, il serait pertinent de développer des programmes de formation continue pour les professionnels du secteur, afin de les familiariser avec les nouvelles techniques et méthodologies issues des recherches récentes, y compris celles présentées dans ce travail.

Les travaux réalisés ouvrent également de nombreuses perspectives de recherche. Une application plus large du modèle proposé, englobant une plus grande diversité de rivières avec des régimes hydrauliques différents et des types de sédiments variés, permettrait de tester la généralisation des résultats et de continuer à affiner le modèle. De plus, le développement d'outils décisionnels basés sur ce modèle pourrait aider les gestionnaires de rivières à planifier et à mettre en œuvre des stratégies de gestion des sédiments en temps réel, en s'appuyant sur des prévisions hydrologiques et sédimentaires fiables.

En conclusion, cette thèse représente une avancée significative dans l'amélioration des méthodes d'estimation du transport sédimentaire. Tout d'abord, de nouvelles données hydro-sédimentaires ont été recueillies à travers des expérimentations en laboratoire. Ensuite, une vaste base de données regroupant 11 463 entrées a été constituée, fournissant une référence

pour le développement futur d'équations de transport solide. De plus, un algorithme d'extraction de données de transport solide homogènes a été conçu, permettant une évaluation plus précise des performances des équations de transport dans des conditions hydrosédimentaires spécifiques. Enfin, l'intégration d'une régression par processus gaussien et d'un algorithme ensembliste améliore l'estimation du débit solide pour des matériaux non cohésifs en rivière. Ces contributions offrent des perspectives d'applications élargies, tandis que les avenues de recherche futures ouvriront la voie à des innovations dans ce domaine pour la gestion des cours d'eau.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Acharya, *Experimental study and numerical simulation of flow and sediment transport around a series of spur dikes*. The University of Arizona, 2011.
- [2] W. Wu, *Computational River Dynamics*. Taylor & Francis, 2007. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.ca/books?id=baIrUy9OdIIC>
- [3] D. Guha-Sapir *et al.*, “Annual disaster statistical review 2011 : the numbers and trends,” 2012.
- [4] E. E. B. W. H. Castle, S., “Résilience aux inondations dans le bassin du lac Champlain et la rivière Richelieu,” *Lake Champlain Basin Program*, 2013.
- [5] R. L. Wilby et R. Keenan, “Adapting to flood risk under climate change,” *Progress in physical geography*, vol. 36, n°. 3, p. 348–378, 2012.
- [6] M. Leclerc et R. Greendale, “Simulation hydrodynamique et bilan sédimentaire des rivières Chicoutimi et des Ha! Ha! lors des crues exceptionnelles de juillet 1996.” 1997.
- [7] R. A. Bagnold, *An approach to the sediment transport problem from general physics*. US government printing office, 1966.
- [8] C. T. Yang, R. Marsooli et M. T. Aalami, “Evaluation of total load sediment transport formulas using ANN,” *International Journal of Sediment Research*, vol. 24, n°. 3, p. 274–286, 2009. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001627910600030>
- [9] C. T. Yang, “Unit stream power equations for total load,” *Journal of Hydrology*, vol. 40, n°. 1-2, p. 123–138, 1979.
- [10] ———, “Unit stream power equation for gravel,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 110, n°. 12, p. 1783–1797, 1984.
- [11] C. T. Yang, A. Molinas et B. Wu, “Sediment transport in the yellow river,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 122, n°. 5, p. 237–244, 1996.
- [12] A. J. Mehta *et al.*, “Cohesive sediment transport. I : Process description,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 115, n°. 8, p. 1076–1093, 1989.
- [13] D. Hinton, R. Hotchkiss et D. P. Ames, “Comprehensive and quality-controlled bedload transport database,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 143, n°. 2, p. 06016024, 2017.
- [14] J. Cunge, “Practical aspects of computational river hydraulics,” *Pitman Publishing Ltd. London, (17 CUN), 1980, 420*, 1980.

- [15] G. Tammann et W. Hesse, “Die abhängigkeit der viscosität von der temperatur bei unterkühlten flüssigkeiten,” *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, vol. 156, n^o. 1, p. 245–257, 1926. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/zaac.19261560121>
- [16] A. Akoulov et T. Wiens, “The effect of co-saturated salts on the kinematic viscosity of water,” *USURJ : University of Saskatchewan Undergraduate Research Journal*, vol. 5, 01 2019.
- [17] R. F. Craig, *Soil mechanics*. Springer, 2013.
- [18] C. Yang, *Sediment Transport : Theory and Practice*. Krieger Pub., 2003. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.ca/books?id=n7kYAQAIAAJ>
- [19] S. Zhiyao *et al.*, “A simple formula for predicting settling velocity of sediment particles,” *Water Science and Engineering*, vol. 1, n^o. 1, p. 37–43, 2008. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S167423701530017X>
- [20] A. Pektaş, “Determining the essential parameters of bed load and suspended sediment load,” *International Journal of Global Warming*, vol. 8, p. 335–359, 11 2015.
- [21] H. L. Langhaar, “Dimensional analysis and theory of models,” Rapport technique, 1962.
- [22] A. B. Shields, “Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement,” 1936.
- [23] M. Yalin, “S.(1977). mechanics of sediment transport,” *Pergamon. and early results. Sediment. Geol*, vol. 15, p. 1–53.
- [24] L. C. v. Rijn, “Sediment transport, part ii : suspended load transport,” *Journal of hydraulic engineering*, vol. 110, n^o. 11, p. 1613–1641, 1984.
- [25] L. C. Van Rijn, “Sediment transport, part i : bed load transport,” *Journal of hydraulic engineering*, vol. 110, n^o. 10, p. 1431–1456, 1984.
- [26] G. Tayfur *et al.*, “Case study : Finite element method and artificial neural network models for flow through jeziersko earthfill dam in poland,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 131, n^o. 6, p. 431–440, 2005.
- [27] G. Tayfur, Y. Karimi et V. P. Singh, “Principle component analysis in conjunction with data driven methods for sediment load prediction,” *Water resources management*, vol. 27, p. 2541–2554, 2013.
- [28] B. Bhattacharya, R. Price et D. Solomatine, “Machine learning approach to modeling sediment transport,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 133, n^o. 4, p. 440–450, 2007.

- [29] M. Sasal *et al.*, “Artificial neural network for bedload estimation in alluvial rivers,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 47, n° 2, p. 223–232, 2009.
- [30] A. O’Hagan *et al.*, “Uncertain judgements : eliciting experts’ probabilities,” 2006.
- [31] N.-S. Cheng, “Simple modification of manning-strickler formula for large-scale roughness,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 143, n° 9, p. 04017031, 2017.
- [32] A. J. Schleiss *et al.*, “Reservoir sedimentation,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 54, n° 6, p. 595–614, 2016.
- [33] L. Guertault, “Évaluation des processus hydro-sédimentaires d’une retenue de forme allongée : application à la retenue de génissiat sur le haut-rhône,” Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I, 2015.
- [34] W. Graf, *Hydraulics of Sediment Transport*, ser. Jessie B. Cox Ocean Studies Collection. Water Resources Publications, 1984. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.ca/books?id=222b6L4WR-0C>
- [35] P. DuBoys, “Le rhône et les rivières a lit affouil-lable. etude du régime du rhône et de faction exercée par les eaux sur un lit à fond de graviers indéfiniment affouil-lable,” 1879.
- [36] “Movement of sediment as bed load in rivers,” *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 28, n° 4, p. 615–620, 1947. [En ligne]. Disponible : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/TR028i004p00615>
- [37] H. Favre et H. Einstein, “Neuere versuchsresultate über den geschiebebetrieb,” *Schweizerische Bauzeitung*, März, 1934.
- [38] E. Meyer-Peter et R. Müller, “Formulas for bed-load transport,” dans *IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2*. IAHR, 1948.
- [39] A. Schoklitsch, “Der geschiebetrieb und die geschiebefracht,” *Wasserkraft Wasserwirtschaft*, vol. 4, p. 1–7, 1934.
- [40] —, “Berechnung der geschiebefracht,” *Wasser und Energiewirtschaft*, n° 1, 1949.
- [41] H. A. Einstein, “Formulas for the transportation of bed load,” *Transactions of the American Society of civil Engineers*, vol. 107, n° 1, p. 561–577, 1942.
- [42] C. B. Brown, “Sediment transportation,” *Engineering hydraulics*, vol. 12, p. 769–857, 1950.
- [43] G. Di Silvio, “Validity and limitations of different transport models with particular reference to sediment transport,” dans *Agricultural Nonpoint Source Pollution : Model Selection and Application*, ser. Developments in Environmental Modelling, A. Giorgini

- et F. Zingales, édit. Elsevier, 1986, vol. 10, p. 191–212. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444995056500149>
- [44] G. M. Smart, “Sediment transport formula for steep channels,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 110, n°. 3, p. 267–276, 1984.
- [45] E. Sidiropoulos *et al.*, “Extending the applicability of the meyer–peter and müller bed load transport formula,” *Water*, vol. 13, n°. 20, p. 2817, 2021.
- [46] E. Lane et A. Kalinske, “Engineering calculations of suspended sediment,” *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 22, n°. 3, p. 603–607, 1941.
- [47] H. Einstein, *The Bed-load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows*, ser. Technical bulletin (United States. Dept. of Agriculture). U.S. Department of Agriculture, 1950. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.ca/books?id=xIhtv2wpR9oC>
- [48] N. H. Brooks, “Calculation of suspended load discharge from velocity and concentration parameters,” dans *Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference*, 1963, p. 229–237.
- [49] F.-M. Chang, D. B. Simons et E. V. Richardson, “Total bed-material discharge in alluvial channels,” Thèse de doctorat, Colorado State University. Libraries, 1965.
- [50] A. A. Dakheel, A. H. Al-Aboodi et S. A. Abbas, “An empirical formula development to predict suspended sediment load for khour al-zubair port, south of iraq,” *Open Engineering*, vol. 12, n°. 1, p. 169–175, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0021>
- [51] E. M. Laursen, “The total sediment load of streams,” *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 84, n°. 1, p. 1–36, 1958. [En ligne]. Disponible : <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JYCEAJ.0000158>
- [52] F. B. Toffaleti, “A procedure for computation of the total river sand discharge and detailed distribution, bed to surface,” 1968.
- [53] F. Engelund et E. Hansen, *Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Teknisk forlag, 1967. [En ligne]. Disponible : https://books.google.ca/books?id=_r8vAAAAYAAJ
- [54] P. Ackers et W. R. White, “Sediment transport : New approach and analysis,” *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 99, n°. 11, p. 2041–2060, 1973. [En ligne]. Disponible : <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JYCEAJ.0003791>
- [55] C. T. Yang, “Incipient motion and sediment transport,” *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 99, n°. 10, p. 1679–1704, 1973. [En ligne]. Disponible : <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JYCEAJ.0003766>

- [56] —, “Unit stream power equation for gravel,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 110, n°. 12, p. 1783–1797, 1984.
- [57] W. R. Brownlie, “Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels,” 1981.
- [58] E. Madden, “Modified laursen method for estimating bed-material sediment load. usace-wes,” *Contract Report HL-93-3*, 1993.
- [59] H. R. Wallingford, “Sediment transport : the ackers and white theory updated (sr 237),” 1990.
- [60] H. Einstein et N. Chien, “Second approximation to the solution of suspended load theory, mrd sediment series, no. 3, univ. of calif,” *Inst, of Eng. Res*, 1954.
- [61] X. Wang *et al.*, “Modification of the einstein bed-load formula,” *Journal of Hydraulic Engineering-asce - J HYDRAUL ENG-ASCE*, vol. 134, 09 2008.
- [62] G. Dodaro *et al.*, “Modified einstein sediment transport method to simulate the local scour evolution downstream of a rigid bed,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 142, n°. 11, p. 04016041, 2016.
- [63] E. Beilicci et R. Beilicci, “Comparison of different methods of modeling the phenomena of sediment transport in riverbeds,” *Aerul si Apa. Componente ale Mediului*, p. 171–183, 2023.
- [64] M. Wong et G. Parker, “Reanalysis and correction of bed-load relation of meyer-peter and müller using their own database,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 132, n°. 11, p. 1159–1168, 2006.
- [65] J. A. Bailard, “An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach,” *Journal of Geophysical Research : Oceans*, vol. 86, n°. C11, p. 10 938–10 954, 1981. [En ligne]. Disponible : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JC086iC11p10938>
- [66] V. A. Vanoni, “Chapter iv, sediment sources and sediment yields. task committee on preparation of sedimentation manual, committee on sedimentation of hydraulics division,” *Sediment Engineering, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*, n°. 54, p. 437–487, 1975.
- [67] A. A. Bishop, D. B. Simons et E. V. Richardson, “Total bed-material transport,” *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 91, n°. 2, p. 175–191, 1965.
- [68] W. R. Brownlie, “Flow depth in sand-bed channels,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 109, n°. 7, p. 959–990, 1983.

- [69] B. R. Colby, "Practical computations of bed-material discharge," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 90, n^o. 2, p. 217–246, 1964. [En ligne]. Disponible : <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JYCEAJ.0001015>
- [70] B. R. Colby et C. H. Hembree, "Computations of total sediment discharge, niobrara river near cody, nebraska," *Science*, vol. 119, n^o. 3097, p. 657–658, 1954.
- [71] R. R. Copeland, W. A. Thomas *et al.*, "Corte madera creek sedimentation study : Numerical model investigation," 1989.
- [72] I. Egiazaroff, "Calculation of nonuniform sediment concentrations," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 91, n^o. 4, p. 225–247, 1965.
- [73] W. H. Graf et E. R. Acaroglu, "Sediment transport in conveyance systems (part 1)/a physical model for sediment transport in conveyance systems," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 13, n^o. 2, p. 20–39, 1968.
- [74] W. H. Graf, "Sediment transport in steep channel," *Jour. Hydroscience and Hydr. Eng., JSCE.*, vol. 5, n^o. 1, p. 11–26, 1987.
- [75] M. F. Karim, *Computer-based predictors for sediment discharge and friction factor of alluvial streams*. The University of Iowa, 1981.
- [76] T. Maddock Jr, "Equations for resistance to flow and sediment transport in alluvial channels," *Water Resources Research*, vol. 12, n^o. 1, p. 11–21, 1976.
- [77] A. Molinas et B. Wu, "Transport of sediment in large sand-bed rivers," *Journal of hydraulic research*, vol. 39, n^o. 2, p. 135–146, 2001.
- [78] I. Moore et G. Burch, "Sediment transport capacity of sheet and rill flow : application of unit stream power theory," *Water Resources Research*, vol. 22, n^o. 8, p. 1350–1360, 1986.
- [79] K. G. R. Raju, R. C. Bhardwaj et R. J. Garde, "Total load transport in alluvial channels," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 107, n^o. 2, p. 179–191, 1981.
- [80] J. Rottner, "A formula for bed load transportation," *La Houille Blanche*, vol. 14, n^o. 3, p. 285–307, 1959.
- [81] F. B. Toffaleti, "Definitive computation of sand discharge in rivers," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 95, n^o. 1, p. 225–248, 1969.
- [82] M. Velikanov *et al.*, "Gravitational theory of sediment transport," *Journal of Science of the Soviet Union, Geophysics*, vol. 4, n^o. GTS translation 62-15004, 1954.
- [83] N. Vittal, R. Kgranga et R. Garde, "Sediment transport relations using concept of effective shear stress," *IN : SEDIMENT TRANSPORTATION, VOLUME 1*, 1973.

- [84] W. Wu, S. S. Wang et Y. Jia, "Nonuniform sediment transport in alluvial rivers," *Journal of hydraulic research*, vol. 38, n^o. 6, p. 427–434, 2000.
- [85] C. T. Yang, A. Molinas et B. Wu, "Sediment transport in the yellow river," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 122, n^o. 5, p. 237–244, 1996.
- [86] S.-Q. Yang et S.-Y. Lim, "Total load transport formula for flow in alluvial channels," *Journal of hydraulic engineering*, vol. 129, n^o. 1, p. 68–72, 2003.
- [87] T. Nakato, "Tests of selected sediment transport formulas," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 116, n^o. 3, p. 362–379, 1990.
- [88] C. C. Inglis, "Discussion of systematic evaluation of river regime," *Journal of the Waterways and Harbors Division*, vol. 94, n^o. 1, p. 109–114, 1968. [En ligne]. Disponible : <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JWHEAU.0000545>
- [89] C. T. Yang et A. Molinas, "Sediment transport and unit stream power function," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 108, n^o. 6, p. 774–793, 1982.
- [90] C. T. Yang et S. Wan, "Comparisons of selected bed-material load formulas," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 117, n^o. 8, p. 973–989, 1991.
- [91] H. H. Chang, "Selection of gravel transport formula for stream modeling," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 120, n^o. 5, p. 646–651, 1994. [En ligne]. Disponible : <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281994%29120%3A5%28646%29>
- [92] M. Bravo-Espinosa, W. R. Osterkamp et V. L. Lopes, "Bedload transport in alluvial channels," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 129, n^o. 10, p. 783–795, 2003. [En ligne]. Disponible : <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282003%29129%3A10%28783%29>
- [93] D. Vázquez-Tarrió et R. Menéndez-Duarte, "Assessment of bedload equations using data obtained with tracers in two coarse-bed mountain streams (narcea river basin, nw spain)," *Geomorphology*, vol. 238, p. 78–93, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X15001312>
- [94] B. Gomez et M. Church, "An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers," *Water Resources Research*, vol. 25, n^o. 6, p. 1161–1186, 1989. [En ligne]. Disponible : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR025i006p01161>
- [95] V. A. Vanoni, N. H. Brooks et J. F. Kennedy, "Lecture notes on sediment transportation and channel stability," 1961.
- [96] S. Shulits, R. D. Hill *et al.*, "Bedload formulas," 1968.

- [97] A. S. o. C. E. Task Committee for Preparation of Sediment Manual, Committee on Sedimentation of the Hydraulics Division, "Sediment transportation mechanics : H. sediment discharge formulas," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 97, n°. 4, p. 523–567, 1971.
- [98] W. White, H. Milli et A. Crabbe, "Sediment transport : An appraisal of available methods, volume 2—performance of theoretical methods when applied to flume and field data," *Hydraulics Research Station Wallingford Publication, Report No. IT*, vol. 119, 1973.
- [99] K. Mahmood, "Verification of sediment transport functions—missouri river," *Missouri River Div. Sediment Ser. Rep.*, vol. 19, 1980.
- [100] H. M. Habersack et J. B. Laronne, "Evaluation and improvement of bed load discharge formulas based on helley–smith sampling in an alpine gravel bed river," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128, n°. 5, p. 484–499, 2002.
- [101] J. J. Barry *et al.*, "Performance of bed load transport equations in mountain gravel-bed rivers : A re-analysis," dans *In : Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference ; 2006 April 2-6 ; Reno, NV. Washington, DC : US Department of the Interior, US Geological Survey, Advisory Committee on Water Information, US Subcommittee on Sedimentation. 8 p.*, 2006.
- [102] R. López, D. Vericat et R. J. Batalla, "Evaluation of bed load transport formulae in a large regulated gravel bed river : The lower ebro (ne iberian peninsula)," *Journal of Hydrology*, vol. 510, p. 164–181, 2014. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413009116>
- [103] F. M. Abdel-Aal, *Extension of Bed-load Formulas to High Sediment Rates*. University of California, Hydraulic Engineering Laboratory, Wave Research . . . , 1969.
- [104] J. R. Barton et P.-N. Lin, "Study of the sediment transport in alluvial channels, a," Thèse de doctorat, Colorado State University. Libraries, 1955.
- [105] W. Bengal, "Government of," study on the critical tractive force various grades of sand," *Annual Report of the River Research Institute, West Bengal, Publication*, n°. 26 Part I, p. 5–12, 1965.
- [106] J. Bogardi et C. Yen, "Tractation of pebbles by flowing water," *State Univeristy of Iowa*, 1939.
- [107] V. A. Vanoni et N. H. Brooks, *Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams*. US Army Engineer Division, Missouri River, 1957, n°. 11.
- [108] H. J. Casey, *Über geschiebebewegung*. Preuß. Versuchsanst. f. Wasserbau u. Schiffbau, 1935, vol. 19.

- [109] S.-d. Chyn, "An experimental study of the sand transporting capacity of flowing water on sandy bed and the effect of the composition of the sand shiou-dean chyn." Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 1935.
- [110] W. Costello, "Development of bed configuration in coarse sands. report 74-1," *Department of Earth and Planetary Science. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts*, 1974.
- [111] T. Davies, "Summary of experimental data for flume tests over fine sand," *Department of Civil Engineering, University of Southampton*, 1971.
- [112] H. A. Einstein, "Effect of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution," *University of California, Berkeley, Calif.*, vol. 33, p. 2, 1955.
- [113] E. P. Water, "Power development authority, flume studies of roughness and sediment transport of movable bed of sand," *Annual Report of Hydraulic Research Laboratory for*, vol. 1967, p. 1968–1969, 1966.
- [114] M. G. Foley, "Scour and fill in ephemeral streams," 1975.
- [115] J. J. Franco, "Effects of water temperature on bed-load movement," *Journal of the Waterways and Harbors Division*, vol. 94, n^o. 3, p. 343–352, 1968.
- [116] C. GIBBS et C. Neill, "Interim report on laboratory study of basket-type bed-load samplers, research council of alberta in association with department of civil engineering, university of alberta," Number REH/72/2, April, Rapport technique, 1972.
- [117] G. K. Gilbert et E. C. Murphy, *The transportation of debris by running water*. US Government Printing Office, 1914, n^o. 86.
- [118] H. P. Guy, D. B. Simons et E. V. Richardson, *Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61*. US Government Printing Office, 1966.
- [119] H. M. Hill, V. S. Srinivasan et T. E. Unny Jr, "Instability of flat bed in alluvial channels," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 95, n^o. 5, p. 1545–1558, 1969.
- [120] P.-Y. Ho, *Abhängigkeit der Geschiebebewegung von der Kornform und der Temperatur*. Preussische Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau, 1939.
- [121] A. Jorissen, "Étude expérimentale du transport solide des cours d'eau," *Rev. Univ. Mines*, vol. 14, p. 269–282, 1938.
- [122] A. A. Kalinske et C. huan Hsia., "Study of transportation of fine sediments by flowing water." 1945.
- [123] G. Kalkanis *et al.*, "Turbulent flow near an oscillating wall," 1957.
- [124] J. Kennedy, "Stationary waves and anti-dunes in alluvial channels, calif," *Inst. Technol. Rep. KHR-2*, vol. 146, 1961.

- [125] F. T. Mavis *et al.*, “The transportation of detritus by flowing water (i),” 1935.
- [126] C. MacDougall, “Bed-sediment transportation in open channels,” *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 14, n^o. 1, p. 491–495, 1933.
- [127] D. G. Mutter, “A flume study of alluvial bed configurations,” Thèse de doctorat, Department of Civil Engineering, University of Alberta, 1971.
- [128] C. Neill, “Mean-velocity criterion for scour of coarse uniform bed-material,” 1967.
- [129] C. F. Nordin, “Flume studies with fine and coarse sands,” US Geological Survey, Report technique, 1976.
- [130] M. P. O’Brien, “Notes on the transportation of silt by streams,” *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 17, n^o. 2, p. 431–436, 1936.
- [131] Y. Onishi, J. F. Kennedy et S. C. Jain, “Effects of meandering in alluvial streams,” *Journal of the Hydraulics division*, vol. 102, n^o. 7, p. 899–917, 1976.
- [132] A. Paintal, “Concept of critical shear stress in loose boundary open channels,” *Journal of hydraulic research*, vol. 9, n^o. 1, p. 91–113, 1971.
- [133] C. Pratt, *Summary of experimental data for flume tests over 0.49 mm sand*. University of Southampton, 1970.
- [134] S. SATOH, “Research on the bed load transportation (i),” *Journal of Research, Public Works Research Institute*, vol. 3, 1958.
- [135] B. Singh, “Transport of bed-load in channels with special reference to gradient and form,” Thèse de doctorat, Imperial College London, 1960.
- [136] J. P. Soni, “Short statistical analysis of total load concentration,” *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 106, n^o. 8, p. 1383–1389, 1980.
- [137] R. A. Stein, “Laboratory studies of total load and apparent bed load,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 70, n^o. 8, p. 1831–1842, 1965.
- [138] L. Straub, “Transportation characteristics missouri river sediment, mrd sediment series no. 4, st,” *Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis, Minnesota*, 1954.
- [139] B. D. Taylor, “Temperature effects in alluvial streams,” Thèse de doctorat, California Institute of Technology, 1972.
- [140] V. A. Vanoui et L.-S. Hwang, “Relation between bed forms and friction in streams,” *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 93, n^o. 3, p. 121–144, 1967.
- [141] J. C. Willis, “Suspended load from error-function models,” *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 105, n^o. 7, p. 801–816, 1979.

- [142] G. P. Williams, *Flume width and water depth effects in sediment-transport experiments*. US Government Printing Office, 1970.
- [143] J. C. Willis, N. L. Coleman et W. M. Ellis, “Laboratory study of transport of fine sand,” *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 98, n^o. 3, p. 489–501, 1972.
- [144] U. W. E. Station, “Studies of river bed materials and their movement,” *US Waterways Exptl. Sta., Paper*, vol. 17, p. 159, 1935.
- [145] N. Znamenskaya, “Experimental study of the dune movement of sediment,” *Soviet Hydrology : Selected Papers*, vol. 3, 1963.
- [146] A. Recking *et al.*, “Bed-load transport flume experiments on steep slopes,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, n^o. 9, p. 1302–1310, 2008.
- [147] D. Rickenmann *et al.*, “Bedload transport measurements with impact plate geophones : Comparison of sensor calibration in different gravel-bed streams,” *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 39, n^o. 7, p. 928–942, 2014.
- [148] G. N. Nomicos, “Effects of sediment load on the velocity field and friction factor of turbulent flow in an open channel,” Thèse de doctorat, California Institute of Technology, 1956.
- [149] U. W. E. Station, “Studies of river bed materials and their movement,” *US Waterways Exptl. Sta., Paper*, vol. 17, p. 159, 1935.
- [150] —, “Effect of turbidity on sand movement,” *Unpublished report of experiments*, 1935.
- [151] —, “Flume tests made to develop a synthetic sand which will not form ripples when used in movable-bed models,” *Technical Memorandum*, vol. 99-1 (unpublished), 1936.
- [152] —, “Flume tests of synthetic sand mixtures (sand no 10),” *Technical Memorandum*, vol. 95-1 (unpublished), 1936.
- [153] —, “Studies of light-weight materials, with special reference to their movement and use as model bed material,” *Technical Memorandum*, vol. 103-1 (unpublished), 1936.
- [154] G. P. Williams et D. L. Rosgen, *Measured total sediment loads (suspended loads and bedloads) for 93 United States streams*. US Geological Survey Washington, DC, 1989.
- [155] K. Mahmood, R. Tarar et T. Masood, “Selected equilibrium-state data from acop canals. civil mechanical and environmental engineering department report no,” EWR-79-2. George Washington University. Washington, DC, February, 495, Rapport technique, 1979.
- [156] D. B. Simons, “Theory and design of stable channels in alluvial materials,” Thèse de doctorat, Colorado State University. Libraries, 1957.

- [157] S. Chitale, *Hydraulics of stable channels*. Government of India, Ministry of Irrigation & Power, Central Water & Power . . ., 1966.
- [158] K. Shinohara, “On the characteristics of sand waves formed upon the beds of open channels,” *Reports of Research Institute of Applied Mech., Kyushu University*, vol. 7, n°. 25, p. 15–45, 1959.
- [159] L. Leopold, “Sediment transport data for various us rivers,” *Personal Communication by WR Brownlie*, 1969.
- [160] D. W. Hubbell et D. Q. Matejka, “Investigations of sediment transportation, middle loup river at dunning, nebraska : with application of data from turbulence flume,” Geological Survey (US), Rapport technique, 1959.
- [161] H. W. Shen, A. S. Harrison et W. J. Mellema, “Temperature and missouri river stages near omaha,” *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 104, n°. 1, p. 1–20, 1978.
- [162] H. A. Einstein, *Bed-load transportation in Mountain Creek*. Greenville sediment load laboratory, 1944, vol. 55.
- [163] A. Prins, “Río magdalena and canal del dique survey project,” 1973.
- [164] B. R. Colby et C. H. Hembree, “Computations of total sediment discharge, niobrara river near cody, nebraska,” *Science*, vol. 119, n°. 3097, p. 657–658, 1954.
- [165] G. W. Samide, “Sediment transport measurements,” Thèse de doctorat, West Canadian Graphic Industries, 1971.
- [166] R. T. Milhous, “Sediment transport in a gravel-bottomed stream,” 1973.
- [167] A. Peterson et R. Howells, *A compendium of solids transport data for mobile boundary channels*. Department of Civil Engineering, University of Alberta, 1973.
- [168] J. K. Culbertson et al., *Summary of alluvial-channel data from Rio Grande conveyance channel, New Mexico, 1965-69*. US Government Printing Office, 1972.
- [169] C. F. Nordin et J. P. Beverage, *Sediment transport in the Rio Grande, New Mexico*. US Government Printing Office, 1965.
- [170] M. L. Jones et H. R. Seitz, *Sediment transport in the Snake and Clearwater Rivers in the vicinity of Lewiston, Idaho*. US Geological Survey, Water Resources Division, 1980, vol. 80, n°. 690.
- [171] J. Knott, *Sediment discharge in the Trinity river basin, California*. US Geological Survey, 1974, vol. 49.
- [172] B. o. R. United States Department of the Interior, “Interim report, total sediment transport program, lower colorado river basin,” 1958.

- [173] D. Hinton, R. H. Hotchkiss et M. Cope, “Comparison of calibrated empirical and semi-empirical methods for bedload transport rate prediction in gravel bed streams,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 144, n^o. 7, p. 04018038, 2018.
- [174] D. Lindley, “Regression and correlation analysis,” *Time series and statistics*, p. 237–243, 1990.
- [175] R. Peters, G. Schmitz et J. Cullmann, “Flood routing modelling with artificial neural networks,” *Advances in Geosciences*, vol. 9, p. 131–136, 2006. [En ligne]. Disponible : <https://adgeo.copernicus.org/articles/9/131/2006/>
- [176] J. Yuan *et al.*, “Reliable multi-objective optimization of high-speed wedm process based on gaussian process regression,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, n^o. 1, p. 47–60, 2008.
- [177] K. Khosravi *et al.*, “A comparative assessment of decision trees algorithms for flash flood susceptibility modeling at haraz watershed, northern iran,” *Science of the Total Environment*, vol. 627, p. 744–755, 2018.
- [178] C. Chang *et al.*, “Appraisal of soft computing techniques in prediction of total bed material load in tropical rivers,” *Journal of earth system science*, vol. 121, p. 125–133, 2012.
- [179] J.-A. Goulet, *Probabilistic Machine Learning for Civil Engineers*. MIT Press, 2020.
- [180] H. Nagy, K. Watanabe et M. Hirano, “Prediction of sediment load concentration in rivers using artificial neural network model,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128, n^o. 6, p. 588–595, 2002.
- [181] A. Ab. Ghani *et al.*, “Prediction of total bed material load for rivers in malaysia : A case study of langat, muda and kurau rivers,” *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 11, p. 307–318, 2011.
- [182] B. Kumar, “Neural network prediction of bed material load transport,” *Hydrological sciences journal*, vol. 57, n^o. 5, p. 956–966, 2012.
- [183] M. Y. A. Khan *et al.*, “Artificial neural network simulation for prediction of suspended sediment concentration in the river ramganga, ganges basin, india,” *International journal of sediment research*, vol. 34, n^o. 2, p. 95–107, 2019.
- [184] K. Roushangar et S. Shahnazi, “Prediction of sediment transport rates in gravel-bed rivers using Gaussian process regression,” *Journal of Hydroinformatics*, vol. 22, n^o. 2, p. 249–262, 10 2019.
- [185] C. E. Rasmussen et C. Williams, “Gaussian processes for machine learning the mit press,” *Cambridge, MA*, vol. 32, p. 68, 2006.

- [186] K. P. Murphy, *Machine learning : a probabilistic perspective*. MIT press, 2012.
- [187] J. Sehwat, M. Patel et B. Kumar, “Gaussian process regression to predict incipient motion of alluvial channel,” dans *Proceedings of Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving : SocProS 2014, Volume 2*. Springer, 2015, p. 435–441.
- [188] C. E. Rasmussen et H. Nickisch, “Gaussian processes for machine learning (gpml) toolbox,” *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 11, p. 3011–3015, dec 2010.
- [189] B. T. Pham *et al.*, “A comparison of support vector machines and bayesian algorithms for landslide susceptibility modelling,” *Geocarto International*, vol. 34, n^o. 13, p. 1385–1407, 2019.
- [190] K. Khosravi, M. Panahi et D. Tien Bui, “Spatial prediction of groundwater spring potential mapping based on an adaptive neuro-fuzzy inference system and metaheuristic optimization,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 22, n^o. 9, p. 4771–4792, 2018.
- [191] K. Khosravi *et al.*, “Bedload transport rate prediction : Application of novel hybrid data mining techniques,” *Journal of Hydrology*, vol. 585, p. 124774, 2020.
- [192] L. I. Kuncheva et C. J. Whitaker, “Measures of diversity in classifier ensembles and their relationship with the ensemble accuracy,” *Machine learning*, vol. 51, n^o. 2, p. 181, 2003.
- [193] P. Sollich et A. Krogh, “Learning with ensembles : How overfitting can be useful,” *Advances in neural information processing systems*, vol. 8, 1995.
- [194] M. Gashler, C. Giraud-Carrier et T. Martinez, “Decision tree ensemble : Small heterogeneous is better than large homogeneous,” dans *2008 Seventh international conference on machine learning and applications*. IEEE, 2008, p. 900–905.
- [195] S. Hurst, *The characteristic function of the Student t distribution*. Centre for Mathematics and its Applications, School of Mathematical Sciences, 1995.
- [196] B. Chen, L. Shen et H. Zhang, “Gaussian process regression-based material model for stochastic structural analysis,” *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A : Civil Engineering*, vol. 7, n^o. 3, p. 04021025, 2021.
- [197] J. M. Bland et D. G. Altman, “Measurement error.” *BMJ : British medical journal*, vol. 312, n^o. 7047, p. 1654, 1996.
- [198] P. D. Thorne et D. Hurther, “An overview on the use of backscattered sound for measuring suspended particle size and concentration profiles in non-cohesive inorganic sediment transport studies,” *Continental Shelf Research*, vol. 73, p. 97–118, 2014.

- [199] S.-g. Hwang *et al.*, “How to use gp : effects of the mean function and hyperparameter selection on gaussian process regression,” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2023, n^o. 02, p. 014, 2023.
- [200] I. Pustokhina *et al.*, “Developing a robust model based on the gaussian process regression approach to predict biodiesel properties,” *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2021, p. 1–12, 2021.
- [201] W. Gould, J. Pitblado et W. Sribney, *Maximum likelihood estimation with Stata*. Stata press, 2006.
- [202] L. Gan et J. Jiang, “A test for global maximum,” *Journal of the American Statistical Association*, vol. 94, n^o. 447, p. 847–854, 1999.
- [203] T.-T. Wong, “Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation,” *Pattern Recognition*, vol. 48, n^o. 9, p. 2839–2846, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320315000989>
- [204] B. Camenen et M. Larson, “A General Formula for Noncohesive Suspended Sediment Transport,” *Journal of Coastal Research*, vol. 24, n^o. 3 (243), p. 615–627, 05 2008. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.2112/06-0694.1>
- [205] V. Tolvanen, P. Jylänki et A. Vehtari, “Expectation propagation for nonstationary heteroscedastic gaussian process regression,” dans *2014 IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)*, 2014, p. 1–6.
- [206] D. A. Freedman, *Statistical models : theory and practice*. cambridge university press, 2009.
- [207] A. L. B. Cavalcante, L. F. M. Ribeiro et A. P. de Assis, “Experimental and physical modeling of bed load heterogeneous sediment transport,” *International Journal of Geomechanics*, vol. 13, n^o. 5, p. 545–556, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0000246>
- [208] G. S. Kell, “Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0.deg. to 150.deg.. correlations and tables for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale,” *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 20, n^o. 1, p. 97–105, 1975. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1021/je60064a005>
- [209] National centers for environmental information (ncei). [En ligne]. Disponible : <https://www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/us-climate-normals>
- [210] A. Sharma, B. Kumar et R. Balachandar, “Comparison of flow and morphological characteristics in uniform and non-uniform sand bed channel,” *Canadian Journal*

- of Civil Engineering*, vol. 47, n^o. 6, p. 678–690, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0627>
- [211] Q. Yue *et al.*, “A portable device for on-site measurement of sediment concentration through volume-mass replacement,” *Water Resources Research*, vol. 59, n^o. 4, p. e2022WR033584, 2023, e2022WR033584 2022WR033584. [En ligne]. Disponible : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2022WR033584>
- [212] A. Riazi et U. Türker, “The drag coefficient and settling velocity of natural sediment particles,” *Computational Particle Mechanics*, vol. 6, n^o. 3, p. 427–437, 2019.
- [213] A. Sahoo, S. Samantaray et R. B. Singh, “Analysis of velocity profiles in rectangular straight open channel flow.” *Pertanika Journal of Science & Technology*, vol. 28, n^o. 1, 2020.
- [214] P. Mishra *et al.*, “Application of student’s t-test, analysis of variance, and covariance,” *Annals of cardiac anaesthesia*, vol. 22, n^o. 4, p. 407, 2019.
- [215] S. Parthasarathy et M. Ogihara, “Clustering distributed homogeneous datasets,” dans *Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*, D. A. Zighed, J. Komorowski et J. Żytkow, édit. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2000, p. 566–574.
- [216] J. Le Guern *et al.*, “Relevance of acoustic methods to quantify bedload transport and bedform dynamics in large sandy-gravel bed river,” *Earth Surface Dynamics Discussions*, vol. 2020, p. 1–34, 2020.
- [217] C. Peterson et A. Miller, “Mode, median, and mean as optimal strategies.” *Journal of Experimental Psychology*, vol. 68, n^o. 4, p. 363, 1964.
- [218] C. E. Rasmussen et H. Nickisch, “Gaussian processes for machine learning (gpml) toolbox,” *The Journal of Machine Learning Research*, vol. 11, p. 3011–3015, 2010.
- [219] D. H. Wolpert, “Stacked generalization,” *Neural networks*, vol. 5, n^o. 2, p. 241–259, 1992.
- [220] L. Breiman, “Stacked regressions,” *Machine learning*, vol. 24, p. 49–64, 1996.
- [221] A. Crescitelli *et al.*, “Novel sensitive nanocoatings based on swent composites for advanced fiber optic chemo-sensors,” dans *SENSORS, 2008 IEEE*. IEEE, 2008, p. 965–968.
- [222] M. Caporin et F. Lisi, “Comparing and selecting performance measures using rank correlations,” *Economics*, vol. 5, n^o. 1, p. 20110010, 2011. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2011-10>
- [223] D. Batur et F. F. Choobineh, “Mean-variance based ranking and selection,” dans *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 2010, p. 1160–1166.

- [224] S. Mahadevan et S. Sarkar, “Uncertainty analysis methods,” *US Department of Energy, Washington, DC, USA*, 2009.
- [225] O. Castro-Orgaz et H. Chanson, “Bernoulli theorem, minimum specific energy, and water wave celerity in open-channel flow,” *Journal of irrigation and drainage engineering*, vol. 135, n^o. 6, p. 773–778, 2009.
- [226] B. Camenen et M. Larson, “A general formula for non-cohesive bed load sediment transport,” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 63, n^o. 1-2, p. 249–260, 2005.
- [227] A. A. Beylich et K. Laute, “Combining impact sensor field and laboratory flume measurements with other techniques for studying fluvial bedload transport in steep mountain streams,” *Geomorphology*, vol. 218, p. 72–87, 2014, sediment flux and sediment budget studies in cold environments : New approaches and techniques. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X13004601>
- [228] A. Hauet *et al.*, “Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method,” *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 13, n^o. 2, p. 105–110, 2008.
- [229] G. Metri et T.-F. Mahdi, “Cross-sectional water velocity in unsteady flow conditions by pressure sensors,” dans *Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference*. Springer, 2021, p. 181–189.
- [230] J. F. Kennedy, “The formation of sediment ripples, dunes, and antidunes,” *Annual review of fluid mechanics*, vol. 1, n^o. 1, p. 147–168, 1969.
- [231] Y. K. Paulos, “Intense bedload transport in non-uniform flow,” Thèse de doctorat, University of British Columbia, 1998.
- [232] C. Ancey et I. Pascal, “Estimating mean bedload transport rates and their uncertainty,” *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, vol. 125, n^o. 7, p. e2020JF005534, 2020.
- [233] G. Proffitt et A. Sutherland, “Transport of non-uniform sediments,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 21, n^o. 1, p. 33–43, 1983. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1080/00221688309499448>
- [234] B. S. Michael Tritthart et H. Habersack, “Non-uniformity and layering in sediment transport modelling 1 : flume simulations,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 49, n^o. 3, p. 325–334, 2011. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.583528>
- [235] P. Gao, “An equation for bed-load transport capacities in gravel-bed rivers,” *Journal of Hydrology*, vol. 402, n^o. 3-4, p. 297–305, 2011.

- [236] D. Vázquez-Tarrío et R. Menéndez-Duarte, “Assessment of bedload equations using data obtained with tracers in two coarse-bed mountain streams (narcea river basin, nw spain),” *Geomorphology*, vol. 238, p. 78–93, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X15001312>
- [237] S. O. Sulaiman *et al.*, “Evaluation of sediment transport empirical equations : case study of the euphrates river west iraq,” *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, n°. 10, p. 825, 2021.
- [238] S. J. Gelfand, “Understanding the impact of heteroscedasticity on the predictive ability of modern regression methods,” 2015.
- [239] S. A. Rahman et D. Chakrabarty, “Sediment transport modelling in an alluvial river with artificial neural network,” *Journal of Hydrology*, vol. 588, p. 125056, 2020.
- [240] L. Yitian et R. R. Gu, “Modeling flow and sediment transport in a river system using an artificial neural network,” *Environmental management*, vol. 31, p. 0122–0134, 2003.

ANNEXE A UTILISATION DE L'OUTIL DE CALCUL

L'annexe suivante explique l'utilisation de l'outil de calcul du transport sédimentaire dans le cadre de ce projet de recherche sur la version R2022b de MATLAB. Le cas utilisé ci-dessous à titre d'exemple est la première donnée de la base de données provenant de la littérature.

Entrants :

Sept entrants sont nécessaires pour utiliser l'outil.

1. Débit liquide (m³/s)
2. Pente longitudinale (m/m)
3. Largeur à la surface (m)
4. Profondeur d'eau moyenne (m)
5. diamètre médian (m)
6. Densité relative (-)
7. Température (°C)

Prendre note que dans l'absence de connaissance de la densité relative des grains et de la température, il est possible de poser les valeurs de 2.65 et 20 C respectivement.

The image shows a dialog box titled 'Entrants' with the following input fields and values:

Débit (m ³ /s)	0.09
Pente longitudinal (m/m)	0.055
Largeur à la surface (m)	2.84
Profondeur d'eau (m)	0.12
Diamètre médian (m)	0.051
Densité relative	2.65
Température (C)	15.33

At the bottom right of the dialog box are two buttons: 'OK' and 'Cancel'.

FIGURE A.1 Entrants de l'outil de calcul

Sortants :

Trois fenêtres vont s'ouvrir à la fin de l'estimation

Fenêtre 1 : Résumé des concentrations estimées

- La première colonne indique les équations en ordre de performance sur une liste d'écoulements similaires aux données d'entrées.
- La deuxième colonne indique l'estimation des concentrations pour chaque équation pour l'écoulement fourni comme entrant.
- La troisième colonne indique la RMSE des équations sur la liste d'écoulements similaires aux données d'entrées.

	1	2	3
1	Équation	Concentration	RMSE
2	Algorithme ensembliste	0.38183	--
3	Mean_GPML	1.6935675	28.920746224574
4	Shields	0	105.56874881391
5	Fazle-Karim	0.00031386108	106.88370785303
6	Bagnold 1956	0	107.31260851504
7	Yang	0	107.93854633207
8	Ack & Whi	0	107.93854633207
9	MPM	0	107.93854633207
10	Bagnold 1966	0	107.93854633207
11	Bagnold 1980	0	107.93854633207
12	Copeland-Laursen	0	107.93854633207
13	Laursen	0	107.93854633207
14	Meyer-Peter 1934	0	107.93854633207
15	Rottner 1959	0	107.93854633207
16	Einstein	0	107.93854633207
17	Arrifin	16.306913	20876.082261959
18	Abed_Al_Rahman	100.09092	501070.66056754
19	Schoklitsch 1934	0	899664.55975618
20	Eng & Han	18.672257	1507742.2520265
21	Shen & Hung 1972	1238.6199	97095508.704221
22	Graf 1968	456.85209	5719366649.665

FIGURE A.2 Résultats des estimations du débit solide de l'outil de calcul

Fenêtre 2 : Résumé des paramètres adimensionnels

- La première colonne indique les paramètres adimensionnels.
- La deuxième colonne indique les valeurs des paramètres adimensionnels des données d'entrées.
- La troisième colonne indique la moyenne des paramètres adimensionnels de la liste d'écoulements similaires aux données d'entrées.
- La quatrième colonne indique le minimum des paramètres adimensionnels de la liste d'écoulements similaires aux données d'entrées.
- La cinquième colonne indique le maximum des paramètres adimensionnels de la liste

d'écoulements similaires aux données d'entrées.

	1	2	3	4	5
1	Paramètre	Rivière à l'étude	Moyenne liste similaire	Minimum liste similaire	Maximum liste similaire
2	Nombre de Froude	0.24345	0.31466	0.27567	0.38364
3	Débit unitaire adimensionnel	6.5499	5.1187	2.7602	7.337
4	Paramètre des particules	2.5601e-06	1.4195e-06	1.0597e-06	3.0792e-06
5	Puissance de courant unitaire	0.024436	0.010848	0.0092674	0.014575
6	Paramètre de vitesse adimensionnelle	0.026331	0.033209	0.023683	0.042389

FIGURE A.3 Limites de la base de données extraites du cas d'application

Fenêtre 3 : Avertissement de performance (optionnel)

Cette fenêtre renvoie un avertissement sur les performances du modèle si au moins un des paramètres adimensionnels n'est pas dans le domaine de la liste d'écoulements similaires aux données d'entrées.

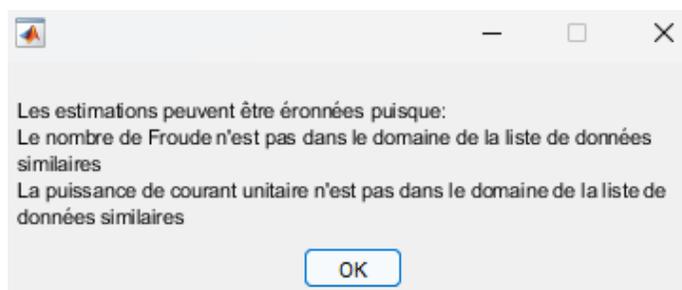


FIGURE A.4 Message d'avertissement de l'outil de calcul