

Liste des figures :

Figure 1 : Exemple de modèle physique à l'Université de Waterloo Canada	1
Figure 2 : Canal Venturi DEBITFLO, BAMO Mesures	4
Figure 3 : Déversoir en V	4
Figure 4 : Jaugeur à pointe	5
Figure 5 : Débitmètre à ultrason en mesure sur une tuyauterie ; modèle PCE-TDS 100, Source : PCE Instruments	6
Figure 6 : Réserve de sédiment et alimentation par vis sans fin (vis située dans la conduite indiquée par la flèche rouge).....	7
Figure 7 : Illustration du fonctionnement d'une pompe à lobes. Source : Métaux Moteurs Pompes Industries.....	8
Figure 8 : Illustration du fonctionnement d'une pompe centrifuge. Source : MAXICOURS.com	8
Figure 9 : Exemple de tamis vibrant, Source : LESSINE Tailored Bulk Technologies	10
Figure 10 : Système de récupération et de pesée discontinue du débit sortant sur un modèle physique	10
Figure 11 : Exemple de bascule et de capteur de vitesse (gauche) et intégration du dispositif sur un convoyeur à bande (droite), Source : TeleMetrix Pesage Mesure Régulation Industrielle	11
Figure 12 : Logiciel Fudaa-LSPIV et visualisation des résultats de calcul	14
Figure 13 : exemple de grains peints pour réagir à la lumière ultra-violette.....	16
Figure 14 : Exemple de chariot supportant les appareils photographiques utilisés pour de la photogrammétrie et permettant le déplacement du dispositif.....	19
Figure 15 : Technique de triangulation pour Scan Laser (A. Malhotra, 2011)	20
Figure 16 : Exemple de relevé bathymétrique réalisé au Line Laser Scanner (T. V. de Ruijscher, 2018)	21
Figure 17 : Fonctionnement de la technique Structured Light 3D Scanner, Source : 3Dnatives	22

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Méthodes et instruments présentant le meilleur potentiel.....	23
---	----

Table des matières

Introduction.....	1
Les dispositifs de mesure	3
Mesure de débit liquide	3
Mesures de débit liquide en entrée de modèle	3
Mesure du débit solide massique	7
Mesures du débit massique solide en entrée de modèle	7
Mesure de débit massique solide en sortie de modèle	9
Mesures de vitesses	13
Mesure de vitesse du fluide	14
Mesure de vitesse des sédiments charriés	15
Bathymétrie.....	17
Trois états du modèle.....	17
Les dispositifs de relevé bathymétrique	18
Conclusion et tableau récapitulatif	23
Bibliographie.....	24
Annexes	25

Introduction

Les modèles physiques hydrauliques (exemple d'un modèle à lit fixe en Figure 1) visent à reproduire de manière simplifiée le fonctionnement d'un cours d'eau (le prototype) en un environnement contrôlé (le laboratoire). Ces modélisations ont de multiples applications telles que la caractérisation d'un aléa inondation, le dimensionnement d'aménagements, l'évaluation d'impacts d'ouvrages implantés dans le lit majeur, la définition d'ouvrages de protection ou encore l'étude de l'évolution morphologique d'un cours d'eau.

Il existe deux grandes familles de modèles pour apporter des réponses aux nombreuses problématiques soulevées précédemment :

- Les modèles numériques/mathématiques (1D, 2D et 3D)
- Les modèles physiques



Figure 1 : Exemple de modèle physique à l'Université de Waterloo Canada

Ces modèles cherchent à reproduire des écoulements à surface libre, tridimensionnels et turbulents. Cette schématisation de la réalité est obtenue au prix d'approximations réalisées sur différentes représentations offertes par le prototype (G. Nicollet, 1991). Ces approximations peuvent être de l'ordre de :

- La géométrie des écoulements qui fait l'objet d'une discrétisation
- Les phénomènes physiques pris en compte faisant l'objet de simplifications consenties, particulièrement sur les courants secondaires, issus de distorsions d'échelles verticales ou horizontales
- La restitution des résultats lors de la réalisation de mesures issue de la résolution des appareils utilisés

Dans le cas présent ce travail s'intègre dans la réalisation d'un modèle capable de « reproduire en canal artificiel le processus de genèses/migration des barres associé à la baisse des débits et au changement de morphologie des berges ». Afin de réaliser cet objectif il semblerait qu'un modèle physique à fond mobile soit à retenir. En effet ce type de modèle est le plus à même de représenter l'évolution morphologique d'un cours d'eau, et ce particulièrement lorsque l'aspect sédimentologique est déterminant (ce dernier vient alors conditionner les écoulements).

Un des principaux enjeux auxquels il convient de faire face lors de la réalisation d'un modèle physique est le respect des règles de similitudes de base. En effet pour pouvoir considérer que les données issues du modèle soient transposables au prototype il est nécessaire que les paramètres alimentant le modèle respectent des similitudes d'échelles constantes en :

- Géométrie (rapport de dimensions du prototype et du modèle)
- Cinématique (rapport des accélérations en tous points entre prototype et modèle)
- Dynamique (rapport de forces appliquées en tous points entre prototype et modèle)

Si le respect simultané des similitudes géométriques et cinématique implique de facto le respect de la similitude dynamique, il vient poser un premier problème d'ordre pratique lorsque le respect de ces

échelles (particulièrement géométrique) est incompatible avec la surface disponible pour implanter un modèle physique.

A ceci s'ajoute des problématiques de similitude de Reynolds et de Froude (échelle dynamique) entraînant des effets d'échelle. En effet pour un même fluide utilisé entre le prototype et le modèle, le respect simultané de ces conditions implique l'utilisation d'un modèle présentant une similitude géométrique d'ordre 1, négligeant l'intérêt logistique d'un modèle physique. De plus, pour des conditions de hauteur d'eau réduites, on peut constater en fonction des circonstances expérimentales des incompatibilités dans cette similitude. Il arrive alors que mise à l'échelle du nombre de Reynolds demande une forte accélération des écoulements alors même que la mise à l'échelle du nombre de Froude demande un fort ralentissement de ces derniers.

Aussi, il sera nécessaire d'intégrer une gestion efficace de la hauteur d'eau en aval du modèle afin de respecter la condition de régime fluvial imposé dans une reproduction de la Loire. Un système de volets réglables peut être envisagé afin de retenir une partie des écoulements et respecter une condition de hauteur d'eau aval.

Les changements d'échelle à appliquer sur la géométrie, sur la densité et la granularité des éléments solides et sur les débits solide et liquide devront être déterminés en amont du projet afin de maintenir une similitude dynamique des écoulements et du transport sédimentaire. Cette mise à l'échelle doit pouvoir respecter les conditions de rugosité du chenal, de nature des sédiments (caractère cohésif) et de similitude d'entraînement pour les forces tractrices et les sédiments retenus (Julien, 2002).

On constate alors qu'il est difficile d'appliquer plusieurs similitudes de manière simultanée entre prototype et laboratoire dans le cas des modèles physiques. Il existe des méthodes de contournement de cette impossibilité. Il est par exemple envisageable de créer des distorsions géométriques en jouant sur des différences d'échelles de largeur et de longueur du modèle (on réduit ainsi les difficultés logistiques liées aux dimensions du modèle et celles issues des incompatibilités dynamiques liées à des hauteurs d'eau très faibles). On peut aussi envisager de complètement exclure certains critères de similitude présentant des difficultés jugées comme insurmontables ou créant trop d'incertitude.

Ces distorsions et exclusions ne sont pas sans conséquences sur le modèle et les résultats obtenus, puisqu'elles multiplient l'effet des imprécisions lors des extrapolations des résultats du modèle vers prototype. C'est ce dernier point qui motive la réalisation de ce rapport, cherchant à proposer des instrumentations et des méthodes de mesures capables de mesures suffisamment précises pour réduire les imprécisions dues aux effets d'échelle et de distorsion. Les méthodes et outils proposés répondent tous à des conditions de précision élevée, de facilité d'utilisation et d'acquisition et enfin de non intrusivité dans le modèle (ne perturbant pas le transport liquide et solide).

Rappelons que l'objectif est ici de « reproduire en canal artificiel le processus de génèses/migration des barres associé à la baisse des débits et au changement de morphologie des berges ». Ainsi les paramètres faisant l'objet de propositions sont :

- Les débits liquides en entrée de modèle (Mesure et contrôle du débit liquide qui se veut variable)
- Les débits solides en entrée et sortie du modèle (Réalisation d'un bilan sédimentaire, observation de la migration de barres sédimentaires)
- La vitesse des écoulements et des sédiments (Compréhension des phénomènes en jeu à l'échelle locale et mesure de débit liquide)
- La réalisation de relevés bathymétriques (Relevé de la morphologie, étude de l'évolution des formes du lit et mesure de débit liquide et solide)

Les dispositifs de mesure

Mesure de débit liquide

Mesures de débit liquide en entrée de modèle

Le débit liquide est un paramètre essentiel dans le fonctionnement d'un modèle physique. Tout comme les matériaux mobiles utilisés et la géométrie du modèle, celui-ci doit être mis à l'échelle afin de respecter la similitude dynamique. Il est extrêmement important d'en avoir un contrôle le plus précis possible, que ce soit pour des expériences en régime permanent ou variable.

Deux catégories de mesures sont envisageables : les mesures liées à une relation hauteur d'eau/débit réalisées dans des canaux jaugeurs et déversoirs, et celles liées à une relation section/vitesse d'écoulement ou force électromotrice/débit dans les conduites d'adduction d'eau alimentant le modèle.

Ces différents types de dispositifs mesurent le débit en deux points du système d'alimentation en eau et peuvent ainsi présenter un avantage si utilisés de manière simultanée. Les informations sur le débit entrant sont alors multipliées et indiquent en cas de non concordance des deux mesures un possible dysfonctionnement des parties correspondantes dans le système.

Canaux jaugeurs (Venturi) et déversoirs

Il s'agit là de s'appuyer sur une relation connue entre hauteur d'eau et débit en surface libre pour la section d'écoulement considérée. Ces systèmes de mesure de débit sont applicables aux écoulements à régime permanents ou à variation lente, leur utilisation est donc possible dans le cas de ce modèle dans les conditions de fonctionnement envisagées.

Les systèmes de type canaux jaugeurs sont divisés en trois sections. La première section tranquillise les écoulements si ces derniers présentaient des turbulences particulières. Le canal évolue ensuite en une section rétrécie jaugée. Ce rétrécissement a pour effet d'accélérer les écoulements et ainsi de basculer d'un écoulement sous-critique à supercritique représentant une hauteur d'eau présente dans le canal, à même d'être mesurée pour établir une appréciation du débit circulant dans celui-ci. Enfin, une troisième section élargie ralentit les écoulements afin de retourner à un état sous-critique pour permettre l'alimentation du modèle. Cette section élargie doit présenter une longueur suffisante pour s'affranchir de toute influence de la hauteur d'eau en aval du rétrécissement, qui pourrait perturber son fonctionnement et fausserait les mesures de hauteur d'eau.

Les dispositifs de canaux jaugeurs (Figure 2) existent sous de nombreuses formes, que ce soit dans la forme de leur section (col en U, rectangulaire ou encore trapézoïdal) et s'accompagnent parfois d'un seuil sur le fond du canal participant à l'accélération de l'écoulement. Chaque forme de canal correspond à une loi hydraulique reliant hauteur d'eau et débit pour la forme de col considérée. Ces canaux jaugeur peuvent répondre à la norme NF ISO 4359 reposant sur l'utilisation de lois hydrauliques normalisées et permettant de passer outre l'étape d'étalonnage du canal jaugeur. Ces normes sont respectées par la plupart des constructeurs qui fournissent une courbe d'étalonnage hauteur/débit pour leur produit. Dans le cas d'un canal jaugeur construit de manière indépendante, l'étape d'étalonnage expérimentale doit être réalisée de manière précise afin d'établir une relation fiable pouvant être utilisée pour l'ensemble des expérimentations sur le modèle.



Figure 2 : Canal Venturi DEBITFLO, BAMO Mesures

Les déversoirs quant à eux reposent sur un principe de débordement d'un réservoir recevant l'alimentation hydraulique en amont du modèle dans laquelle les écoulements sont tranquilisés. Ce débordement est réalisé au niveau d'un seuil de forme variable (généralement seuil plat à paroi déversant largement sur toute sa largeur ou échancrure en V (Figure 3) à déversement plus localisé). Une relation est établie entre le débit sortant du réservoir et la hauteur dans ce dernier. Ce système doit lui aussi être affranchi de toute influence de l'aval du seuil afin que les conditions d'écoulement soient limitées aux écoulements permanents dépendants de la hauteur de charge à l'amont. Un dispositif de dissipation d'énergie peut être nécessaire à l'aval du déversoir dans le cas d'une forte hauteur de chute qui pourrait aboutir à une accélération des écoulements pouvant être indésirable pour le fonctionnement du modèle.



Figure 3 : Déversoir en V

Plusieurs normes existent à l'échelle nationale et internationale (NF ISO 4362, 4374 ; ISO 8333, 9827) en fonction de la forme du déversoir utilisé. Une fois encore ces normes peuvent être respectées par les constructeurs qui fournissent une courbe d'étalonnage spécifique au déversoir. Si ce système est réalisé de manière indépendante, une étape d'étalonnage expérimentale doit permettre d'établir de manière précise une relation entre le débit entrant dans le modèle et la hauteur d'eau dans le réservoir.

Pour les deux systèmes présentés précédemment, les étapes de conception et de dimensionnement sont primordiales afin de s'assurer que ces dispositifs ne sont pas surchargés. Une surcharge risquerait alors d'entraîner des débordements ou des perturbations de fonctionnement liés à l'influence des écoulements en aval ou à un déversement non contrôlé du seuil. Les canaux jaugés et déversoirs présentent les avantages d'être fiables, simples d'utilisation et existent pour toute valeur de débit

(chaque modèle dispose cependant d'un débit minimum et maximum). Néanmoins cette fiabilité est avant tout conditionnée par une lecture précise de la hauteur d'eau dans la partie rétrécie du canal ou dans le réservoir.

Les mesures de hauteur d'eau peuvent être réalisées soit directement à vue, soit par l'intermédiaire d'équipements spécialisés. Les équipements de mesure couplés aux canaux et déversoirs sont très divers, quelques exemples sont ici cités :

- Les échelles limnimétriques ; facile à utiliser et mettre en place mais pouvant souffrir d'une précision réduite. Installée le long des parois du canal ou du réservoir elles permettent une lecture directe de la hauteur d'eau en un instant et à une résolution centimétrique à millimétrique.
- Les jaugeurs à pointe (Figure 4) ; ajoutant un degré de précision supérieur à la simplicité des échelles limnimétriques mais uniquement applicable aux surfaces d'eau non courantes. Le dispositif figurant un crochet terminant en pointe permet d'estimer la surface d'un niveau d'eau grâce aux propriétés de tension superficielle à l'interface air/eau. Cette tension est visualisée par les perturbations causées par la pointe. Le crochet est relié à un système d'échelle permettant une lecture de la hauteur d'eau à une résolution pouvant être inférieure au millimètre.
- Les capteurs de niveau ultrason ; Plus complexe et onéreux mais présentant une précision élevée (résolution généralement millimétrique, variable en fonction des modèles et installations) et permettant la réalisation de mesures de hauteur d'eau en continu, sur des eaux courantes ou non courantes et de manière non intrusive. Ces dispositifs exploitent la distance entre la sonde et la surface de l'eau et le délai de transit des ultrasons couvrant cette distance.



Figure 4 : Jaugeur à pointe

Débitmètre à ultrason et électromagnétique

Les dispositifs évoqués précédemment reposent sur une corrélation entre hauteur d'eau et débit pour des écoulements à surface libre. Les dispositifs d'alimentation hydraulique du modèle peuvent eux aussi faire l'objet de mesures de débit. En mesurant directement les débits transitant dans ces conduites on parle alors de dispositif de mesure intégrés. Certains modèles de débitmètres intègrent dans leur construction un segment de conduite aux dimensions connues pour une exportation des mesures de débit immédiate.

Dans le cas présent il est possible d'utiliser une corrélation entre la vitesse de l'écoulement et le débit pour une section en charge, aux dimensions connues et constante dans le temps. Il est ainsi possible d'utiliser de manière intégrée aux conduites d'alimentation un débitmètre à ultrasons (Figure 5) mesurant la vitesse de l'eau circulant dans la conduite. La connaissance de la géométrie de la section en question permet de calculer un débit circulant dans la conduite.



Figure 5 : Débitmètre à ultrason en mesure sur une tuyauterie ; modèle PCE-TDS 100, Source : PCE Instruments

Les débitmètres électromagnétiques constituent eux aussi une bonne méthode de mesure intégrée du débit en mesurant directement le débit circulant dans la conduite. Ce dispositif nécessite cependant que le fluide mesuré présente une conductivité électrique suffisante pour qu'une force électromotrice proportionnelle au débit soit produite et puisse être mesurée.

Les débitmètres à ultrason et électromagnétiques présentent des avantages certains en terme de précision absolue de la mesure du débit (mesures précises de 0,5 à 1 % du débit) ainsi qu'en précision temporelle puisque les mesures sont réalisées en temps réel et de manière continue. Cependant ils nécessitent un entretien régulier afin d'en assurer le bon fonctionnement et leur utilisation reste globalement plus complexe que les dispositifs de mesure de débit énoncés précédemment.

Complémentarité des méthodes de mesure du débit liquide en entrée de modèle

L'utilisation d'un canal jaugeur ou d'un déversoir permet de réaliser une mesure du débit entrant directement dans le modèle puisque le dispositif est situé à l'amont immédiat de celui-ci. Dans le cas présent l'utilisation d'un déversoir présente les avantages d'être globalement plus compact qu'un dispositif de canal. De plus il est possible d'envisager tout un panel de formes de seuils différents et interchangeables, répondants à différents besoins expérimentaux (un seuil bas sur la largeur totale du modèle permet une alimentation sur l'ensemble du modèle, et un seuil échancré localement permet une alimentation localisée sur la largeur de celui-ci).

L'utilisation d'un débitmètre sur les conduites d'adduction permet de mesurer et d'enregistrer le débit circulant sur une période plus longue et donc de s'assurer de la constance de ce dernier tout au long des expérimentations. Ce dernier point est essentiel dans le cas où plusieurs modèles ou dispositifs expérimentaux étaient rattachés au même système d'alimentation en eau et fonctionneraient de manière simultanée. Une sollicitation plus importante du réseau pourrait alors entraîner une réduction du débit fourni et serait difficilement observable sans un dispositif de mesure sur les conduites alimentant le modèle.

Ainsi les différents dispositifs présentés, intégrés et non intégrés présentent un intérêt particulier lorsqu'ils sont utilisés de manière complémentaire.

Mesure du débit solide massique

Afin d'obtenir des informations sur le bilan sédimentaire du modèle il est nécessaire de pouvoir réaliser des mesures de débit massique solide en entrée et en sortie de celui-ci. Dans les paragraphes suivant le terme débit est généralisé pour parler d'un débit massique exprimé en unité de masse par unité de temps. Différentes méthodes sont à considérer pour réaliser ces mesures.

Mesures du débit massique solide en entrée de modèle

En entrée du modèle, la mesure du débit solide doit être réalisée le plus tard possible avant l'injection dans le système afin d'avoir la mesure la plus fidèle du débit injecté. Ainsi, la mesure est bien souvent couplée voir intégrée au système d'injection. Le débit injecté est alors souvent proportionnel à la fréquence de fonctionnement des systèmes d'alimentation.

Les dispositifs concernés sont situés entre les volumes dédiés au stockage des sédiments injectés dans le modèle et leur point d'injection. Il est important de noter que l'utilisation de certains dispositifs nécessite que les matériaux utilisés soient plus ou moins humides en fonction des modèles et systèmes utilisés.

Alimentation de type tarière/vis sans fin

Ce dispositif repose sur l'utilisation d'une vis sans fin puisant dans le stock de sédiments et poussant ces derniers vers le modèle au travers d'une conduite (Figure 6). Le diamètre de la conduite dans laquelle pivote la vis étant stable, les variations de vitesse de déplacement des sédiments dans la conduite sont à l'origine des variations de débit solide en sortie. Le réglage de la vitesse à laquelle la vis pivote sur son axe donne la vitesse à laquelle les sédiments se déplacent et permet donc de décider d'une valeur de débit solide. Une phase de calibration entre fréquence de rotation du dispositif et débit solide en résultant est donc à anticiper.

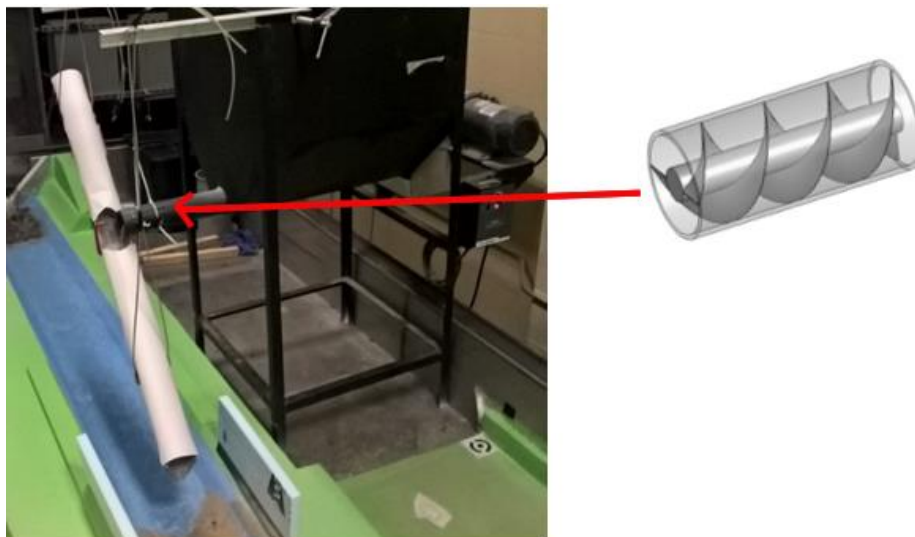


Figure 6 : Réserve de sédiment et alimentation par vis sans fin (vis située dans la conduite indiquée par la flèche rouge)

Ce dispositif présente plusieurs avantages. Tout d'abord il est simple d'utilisation et la technologie à l'œuvre, connue et utilisée depuis des siècles a fait ses preuves. De plus, il permet d'utiliser des sédiments sec ou humides (bien qu'une vérification de la non variabilité de la relation fréquence de rotation/débit solide est à réaliser pour différents sédiments). Aussi, une vis sans fin permet une alimentation en sédiments « douce », c'est-à-dire sans à-coups et sans aspirer ou propulser les matériaux.

Cependant cette méthode présente aussi certains inconvénients. Tout d'abord son fonctionnement peut entraîner de fortes pressions sur les sédiments entre la vis et la conduite dans laquelle celle-ci pivote. Ces pressions peuvent entraîner des dommages sur les sédiments allant jusqu'à l'éclatement des grains et peut ainsi modifier la distribution granulométrique des matériaux utilisés (phénomène d'autant plus important dans le cas d'une recirculation ou d'une réutilisation des sédiments, alors amenés à subir ces pressions plusieurs fois).

Aussi, il a été constaté qu'un classement granulaire pouvait s'opérer au sein des matériaux contenus dans le volume de stockage, où les plus fins sont entraînés plus difficilement que les grossiers par la vis. Enfin, ce dispositif implique un contrôle précis et une bonne stabilité de la fréquence de rotation de la vis afin de contrôler efficacement le débit solide entrant dans le modèle.

Pompe volumétrique/pompe centrifuge

En ce qui concerne l'utilisation de pompes pour acheminer les sédiments dans le modèle, ces dernières impliquent généralement que les sédiments présentent une bonne fluidité afin de pouvoir circuler dans les dispositifs d'aspiration et d'entraînement. Ce besoin de fluidité impose une humidification des sédiments.

Les pompes volumétriques forcent un volume déterminé de fluide à se déplacer vers un orifice de sortie par l'action de parties mobiles. Dans le cas présent, pour le fluide et les débits considérés, les pompes volumétriques à lobes (Figure 7) semblent les plus intéressantes. En effet ces dernières présentent l'avantage de fournir un débit constant lors de leur fonctionnement et rend possible l'adduction de sédiments sans violemment expulser ces derniers vers le modèle.

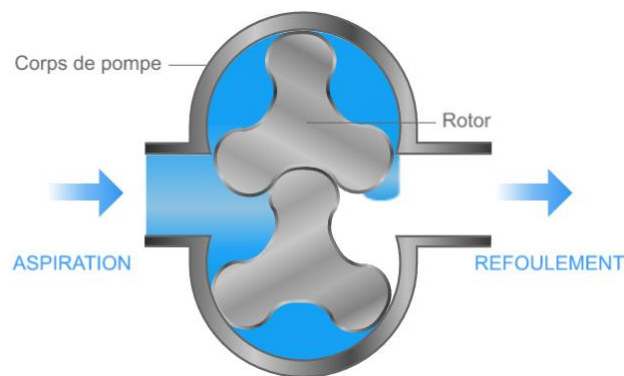


Figure 7 : Illustration du fonctionnement d'une pompe à lobes. Source : Métaux Moteurs Pompes Industries

Les pompes centrifuges sont un autre type de pompes pouvant être utilisées pour amener les sédiments dans le modèle tout en contrôlant le débit. Dans celles-ci la rotation de l'impulseur applique une accélération au fluide pompé et refoule ce dernier de manière tangentielle (Figure 8).

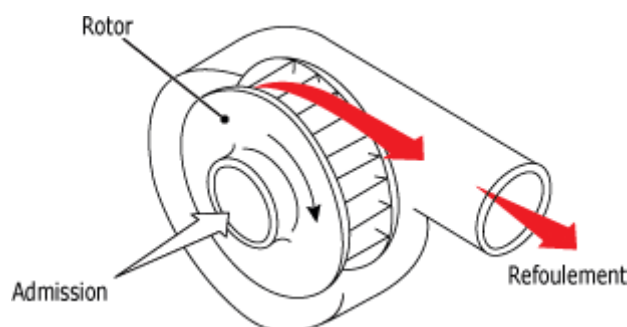


Figure 8 : Illustration du fonctionnement d'une pompe centrifuge. Source : MAXICOURS.com

Ces pompes peuvent exiger une vitesse de rotation du rotor élevée pouvant amener une expulsion rapide des sédiments potentiellement problématique en fonction de l'installation pour une alimentation de modèle physique.

Pour les deux formes de pompes évoquées précédemment, le débit solide injecté est proportionnel à la cadence de fonctionnement de la pompe et une phase expérimentale de calibration est à réaliser afin de déterminer le rapport débit/cadence de fonctionnement. De plus ces deux systèmes de pompe impliquent l'utilisation de matériaux dont la fluidité aura été augmentée (principalement par ajout d'eau au mélange de matériaux).

Chaque modèle présente ses avantages et inconvénients. Les pompes à lobes sont généralement plus compactes et peuvent s'intégrer de manière radiale sur un dispositif d'alimentation en sédiments, elles permettent de faire circuler les sédiments sans les accélérer et ainsi éviter leur éjection de manière brutale. Cependant ce type de pompe peut entraîner des dommages sur les sédiments qui y transitent si ces derniers venaient à être piégés et écrasés entre les lobes en fonctionnement. Les pompes centrifuges sont plus encombrantes puisqu'éjectant le fluide pompé sur un axe radial, et accélèrent le fluide lors de son fonctionnement. Cependant ces pompes sont globalement plus résistantes et risquent moins d'endommager les sédiments par écrasement.

Dans les deux cas la mesure du débit solide se fait donc avant tout par la connaissance du système d'alimentation en sédiments. Les phases de calibration sont alors essentielles et une vérification régulière doit être réalisée afin de s'assurer qu'aucune usure de la pompe n'affecte les débits résultants.

Mesure de débit massique solide en sortie de modèle

La mesure du débit solide en sortie de modèle permet de réaliser une comparaison entre le débit entrant et le débit sortant et ainsi de réaliser un bilan sédimentaire au cours de l'expérimentation.

Pour pouvoir réaliser ces mesures il est alors nécessaire de capturer les matériaux en sortie du modèle et de réaliser une pesée de ces derniers. Cette pesée peut être réalisée sur les matériaux encore humides et nécessite de prendre en compte le poids de l'eau dans la pesée (besoin d'estimer un rapport entre la masse d'un volume de matériaux sec et la masse d'un même volume de matériaux humides et ce, pour une valeur d'humidité identique entre les mesures) ou après une période de séchage afin de ne conserver que la masse de matériaux. Aussi, de par la faible hauteur d'eau rencontrée dans le modèle et le risque de perturber les écoulements, les techniques considérées comme intrusives (appareil de mesure directement installé dans le lit mineur) ne seront pas abordés.

Un des principaux obstacles pouvant être rencontré est lié au caractère fluvial du modèle. En effet, le maintien d'une ligne d'eau à l'aval du modèle (volets de régulations du niveau d'eau aval) implique que les sédiments charriés en fond de modèle doivent être piégés avant que ces derniers n'atteignent l'aval du modèle et ne viennent se bloquer à hauteur du système de régulation de la ligne d'eau. Aussi, les éléments en suspension peuvent être transportés par les écoulements quittant le modèle et une méthode de séparation des fluides et sédiments devra être considérée afin d'obtenir une mesure de débit solide comprenant les éléments charriés et en suspension. Cette difficulté peut cependant être surmontée si le matériau utilisé ne présente pas de caractéristiques pouvant amener à sa suspension ou si la charge en suspension est considérée comme négligeable au regard de la charge de fond.

Une manière d'envisager ce piégeage de la charge de fond pourrait consister en un dispositif de fente transversale en fond de chenal et située en amont du système de régulation de la hauteur d'eau. Les sédiments tomberaient dans cette fente puis seraient aspirés par des pompes permettant ainsi leur récupération. Il convient ensuite de séparer les fractions solides et liquides afin de d'isoler les

matériaux et de les peser. Un passage sur un tamis vibrant permettrait de réaliser cette séparation (Figure 9). Il faut alors s'assurer que le piégeage des sédiments dans cette fente s'opère sans influence sur le transport sédimentaire et l'évolution des formes du lit en amont, potentiellement en localisant celle-ci suffisamment en aval de la zone d'expérimentation.



Figure 9 : Exemple de tamis vibrant, Source : LESSINE Tailored Bulk Technologies

Dans le cas où il serait intéressant de mesurer le débit liquide en sortie de canal il conviendrait alors de prendre en compte la part de débit liquide ayant été aspirée avec les sédiments, et n'ayant pas quitté le modèle par l'aval.

Mesure discontinues



Figure 10 : Système de récupération et de pesée discontinue du débit sortant sur un modèle physique

La méthode de mesure la plus simple à envisager consiste en une récupération des matériaux après tamisage puis en une pesée manuelle afin de déterminer la masse de sédiments obtenus (Figure 10). Cette pesée peut être réalisée à des intervalles de temps variables afin d'obtenir un débit solide sortant sur la durée de l'expérience. Le pas de temps retenu entre chacune de ces pesées déterminera la précision de la mesure sur la durée. Il est important de garder à l'esprit que l'état d'humidité des matériaux récupérés influera sur la masse mesurée. Ainsi est-il nécessaire de connaître la relation précise existant entre un même volume de matériaux humides et sec. Cette relation devient d'autant plus importante dans le cas d'un pas de temps long ou d'un réceptacle permettant l'évacuation de l'eau contenue dans les sédiments entre les pesées.

Mesures continues

Afin d'obtenir une précision dans le temps supérieure aux mesures discontinues et observer plus finement les variations de débit solide sortant du modèle, il convient de mesurer celui-ci en continu. Deux dispositifs sont à même de réaliser cette mesure.

Une première solution envisageable correspond à une pesée de la masse de débit solide en continue après tamisage. Une méthode utilisée dans l'industrie consiste en un transport des matériaux sur un convoyeur à bande couplé à une bascule permettant la mesure de la masse transportée par le convoyeur au droit de la bascule (Figure 11).

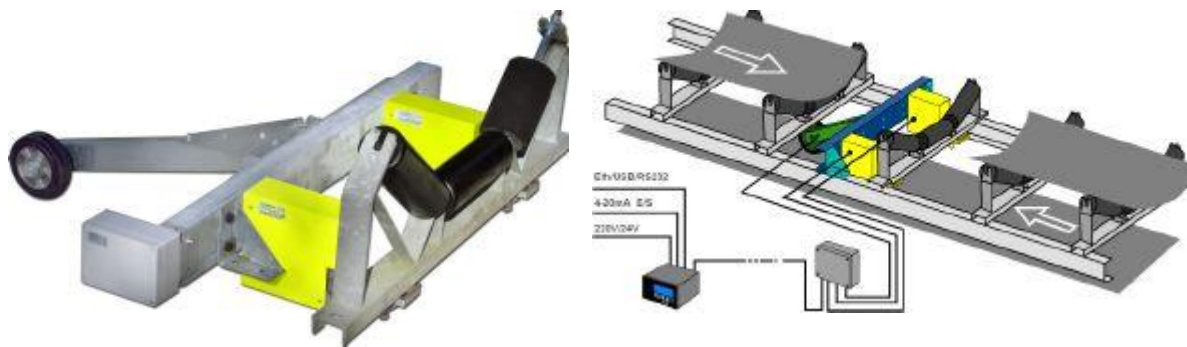


Figure 11 : Exemple de bascule et de capteur de vitesse (gauche) et intégration du dispositif sur un convoyeur à bande (droite), Source : TeleMetrix Pesage Mesure Régulation Industrielle

Ces systèmes de mesure par bascule sont couplés à des capteurs mesurant la vitesse de circulation de la bande. On obtient ainsi deux mesures pouvant être enregistrées et permettant d'obtenir un débit transitant sur le convoyeur en temps réel. L'utilisation de ce dispositif implique de prendre une précaution particulière. Il est absolument essentiel de s'assurer que les matériaux sortent du modèle et transitent au travers des pompes et du tamis vibrant de la manière la plus fluide possible. La fluidité de ce transport permet d'éviter les à-coups en apports de sédiments sur le convoyeur qui risqueraient de fausser la mesure du débit solide. Un manquement à l'achèvement de cette fluidité résulterait en augmentations ponctuelles artificielles non représentative du débit sortant réel.

L'utilisation de convoyeur à bascule intégrée présente plusieurs avantages. Tout d'abord cette méthode s'affranchit des variations de masse des sédiments dues à la déshumidification des matériaux causée par un délais entre sortie du modèle et pesée puisque cette dernière est réalisée immédiatement à la sortie du modèle. L'autre avantage procuré par ce dispositif est de pouvoir s'intégrer directement dans un système de recirculation des sédiments en les transportant directement vers la réserve destinée à alimenter le modèle.

Une autre méthode de mesure du débit solide sortant consiste en l'utilisation de techniques de mesures de la bathymétrie en temps réel. Ces mesures peuvent être réalisées sur une section ou un secteur aval du modèle, sur une géométrie simple et connue pour faciliter la mesure ou sur toute autre section d'intérêt. On peut ainsi déterminer sur la section ou sur le secteur une hauteur de sédiment évoluant au cours du temps. Cette évolution peut être traduite en un volume évoluant par rapport au temps et pouvant être transformé en débit massique.

Cette méthode repose donc sur l'utilisation de techniques bathymétriques qui font l'objet d'un développement ultérieur dans ce rapport. Nous pouvons néanmoins aborder les avantages et inconvénients de la méthode ; Celle-ci permet de réaliser des mesures en temps réel, non intrusives et directement sur le modèle sans risque de perturbations liées à l'extraction des sédiments ou aux variations du taux d'humidité des sédiments. Cependant elle présente les mêmes difficultés que celles

rencontrées avec les mesures bathymétriques développé dans la partie correspondante et implique des corrections en fonction des conditions d'expérimentation pour pouvoir être utilisée dans ce but.

Mesures de vitesses

Afin d'aboutir à une bonne connaissance des dynamiques en place dans le modèle il est nécessaire de déterminer les vitesses d'écoulement du fluide et des sédiments charriés sous l'action du courant. Ces mesures doivent pouvoir être réalisées sur l'intégralité de la surface offerte par le modèle et les méthodes utilisées se doivent donc de permettre une bonne mobilité et une bonne souplesse vis-à-vis de leur positionnement et de leur utilisation.

Dans le cas présent et de par la faible hauteur d'eau circulant dans le modèle, les méthodes présentées cherchent à éviter toute perturbation des écoulements solides et liquides dans le chenal. Cette restriction impose d'écarter l'utilisation des méthodes acoustiques (ex : sonde Vectrino) ou laser (vélocimétrie laser) qui présentent certes des avantages en terme de précision ou de mesure tri-directionnelles, mais demandent soit d'être immergée dans le fluide mesuré soit de présenter de fins éléments en suspensions répartis de manière homogène (incompatible avec une circulation simultanée de matériaux plus grossiers). Ainsi, les dispositifs proposés reposent sur des méthodes d'imagerie non intrusives à même d'éviter toute perturbation lors des expérimentations.

Les méthodes d'imagerie sont dore et déjà utilisées en modèle physique (A. Hauet, 2014) et sont prouvées capables de fournir des mesures de vitesse en modèle fidèles aux mesures in situ. Celles-ci consistent en la réalisation d'un suivi d'éléments flottants à la surface du fluide ou transportés dans ce dernier (Large Scale Particle Image Velocimetry, LSPIV). Il est alors supposé que ces éléments se déplacent à une vitesse identique à celle du fluide.

Des caméras vidéo ou des appareils photographique fixes sont utilisés pour capturer de manière régulière la position de ces éléments sur la zone étudiée. La comparaison de la position des éléments entre chaque image renseigne ainsi sur un déplacement. Ce déplacement peut être mesuré grâce au positionnement de repères immobiles à coordonnées connues. Ces coordonnées sont associées aux coordonnées en pixel sur l'image lors d'une phase de traitement informatique sur logiciel dédié (ex : Fudaa-LSPIV, société DeltaCAD) afin de corriger les effets de perspective et d'obtenir des ortho-images référencées. Ces référencements permettent d'attribuer une coordonnée à la position de chaque élément suivi. Les différences de positions des éléments entre chaque image et la fréquence de prise d'image permettent ainsi de calculer par interpolation les vitesses moyenne sur deux axes (longitudinal et transversal) soit sur une période déterminée soit entre deux images consécutives (A. A. Harpold, 2006). La vitesse de ces éléments est ensuite traduite en champ de vitesse du fluide sur la zone étudiée (Figure 12).

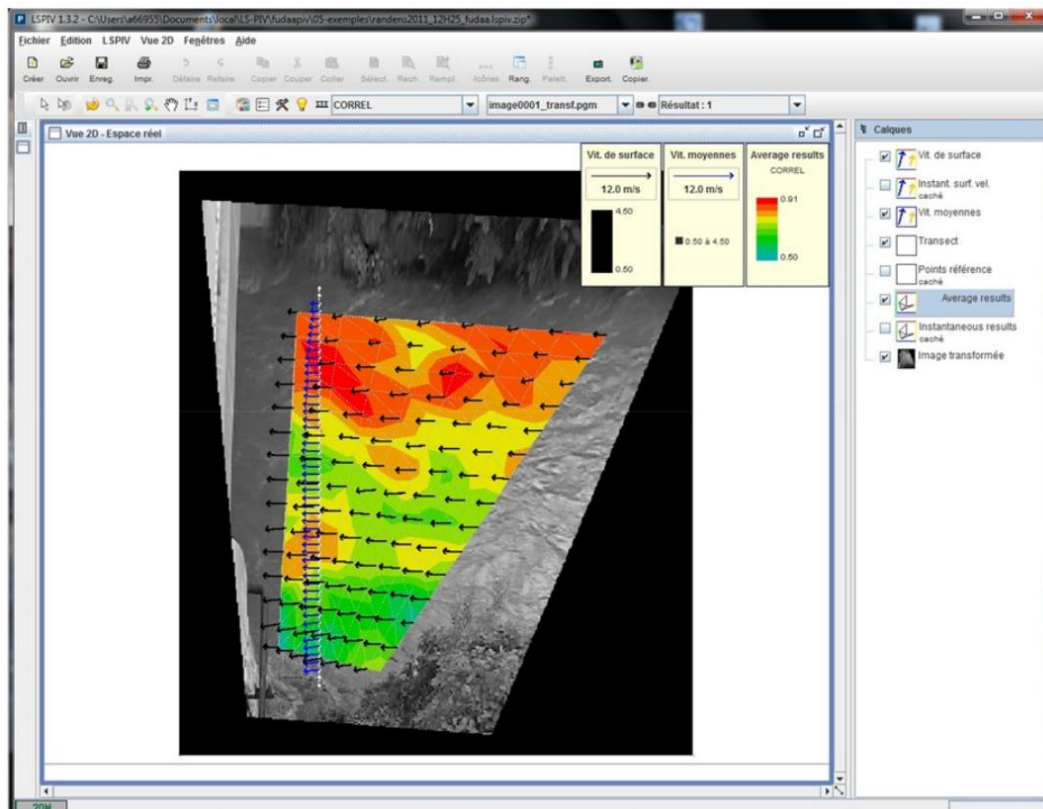


Figure 12 : Logiciel Fudaa-LSPV et visualisation des résultats de calcul

Mesure de vitesse du fluide

Deux méthodes de mesure de vitesses d'un fluide basées sur l'imagerie seront ici proposées. La première est une application directe de la méthode PIV (Particle Image Velocimetry), en injectant dans le modèle en amont de la zone de mesure des éléments flottants qui seront suivis selon la méthode développée précédemment. Les champs de vitesse obtenus apportent ainsi des informations sur les vitesses locales, intéressant dans le cas d'une géométrie particulière ou d'un ouvrage influant sur les écoulements.

De plus, les champs de vitesse obtenus peuvent aussi être exploités pour estimer l'évolution des vitesses le long de la colonne d'eau et pour déterminer une contrainte de fond si la bathymétrie et la granularité sont connue. Les valeurs de vitesse seront d'autant plus précises et fidèles que le temps d'enregistrement sera long et que les matériaux utilisés comme flottants seront suffisamment nombreux et facilement identifiables par le logiciel de traitement d'image. Cette méthode permet donc d'avoir des informations sur les vitesses en différents points d'une zone d'étude ainsi que la retranscription des vitesses sur une section du chenal. Si cette section présente une géométrie connue, on peut alors déterminer un débit sur cette section (A. Hauet, 2014).

La deuxième possibilité offerte par les méthodes d'imagerie consiste en la dilution d'un marqueur coloré en un instant donné. En connaissance de la section à laquelle l'élément colorant entre dans une zone de mesure et en ayant déterminé une section à laquelle on considère que celui-ci quitte la zone, on peut capturer sur plusieurs images le déplacement de ce marqueur dilué. Il est ainsi possible de connaître précisément l'instant auquel les premières traces de marqueur entrent dans la zone d'étude et l'instant auquel l'ensemble du marqueur a quitté cette même zone. La fréquence d'image prises et le nombre d'images entre l'entrée et la sortie de la zone permet d'obtenir une idée de la vitesse moyenne des écoulements sur le secteur. Cette méthode est très simple, rapide et permet de

potentiellement observer des singularités dans les écoulements mais manque grandement de précision en comparaison de la méthode PIV. Ainsi il faut être bien conscient des limites de cette méthode. En effet si elle permet de visualiser les vitesses et les écoulements, elle ne peut être utilisée pour réaliser des mesures fiables que si elle est répétée de nombreuses fois. Aussi, elle ne représentera toujours qu'une vitesse moyenne sur l'ensemble du secteur parcouru par l'élément de coloration.

Mesure de vitesse des sédiments charriés

Le suivi du déplacement de particules solides reposant sur l'imagerie est un champ exploré en modèle physique, et ce particulièrement pour sa capacité à automatiser les mesures (J. Heyman, 2014), (A. Radice, 2006). Ce suivi peut être réalisé depuis les parois du modèle si ces dernières sont transparentes afin d'observer les mouvements pouvant se réaliser sous la surface des sédiments (mais uniquement proches de ladite parois), ou de manière aérienne, sur un axe vertical perpendiculaire au modèle afin d'observer les mouvements des couches les plus superficielles.

Les travaux réalisés jusque-là semblent indiquer que ce suivi fonctionne, bien que des dispositions soient à prendre afin d'accroître la visibilité des matériaux. En effet le caractère non intrusif de la technique peut alors être un inconvénient puisqu'en cas d'eau en circulation dans le chenal il devient plus difficile de distinguer les sédiments en mouvement à cause des perturbations à la surface de l'eau.

Une solution consiste à disposer une fenêtre transparente à cette interface afin de permettre une prise de vue suffisamment nette des déplacements sous la surface. Cette solution est efficace mais viens à l'encontre de la volonté de limiter les intrusions dans le modèle et il convient de s'assurer que l'impact du dispositif est minime sur les écoulements et le transport sédimentaire.

Aussi, la faible taille des matériaux utilisés pour représenter les sédiments peut rendre plus difficile leur reconnaissance lors des étapes de traitement informatique. Une solution envisagée consiste en une augmentation de la visibilité de ces derniers, principalement par la création d'un contraste entre les matériaux transportés et le fond du chenal fixe sur le modèle. Ce contraste peut être créé localement sur des zones d'étude dédiées à la mesure du déplacement des sédiments (bande de couleur fixée transversalement) ou sur l'ensemble du modèle si il existe un bon contraste naturel entre les sédiments et le chenal.

Dans le cas où les sédiments venaient à s'accumuler localement de façon à masquer la couleur du fond du chenal ou si le fond du chenal devait être constitué lui-même d'éléments mobiles, ce contraste serait plus difficile à obtenir. On pourrait alors envisager que certains des grains pourraient être peints en une couleur particulière afin d'être suivi. L'utilisation d'une peinture réagissant à la lumière ultra-violette peut être une bonne solution pour augmenter la visibilité des grains au travers de la couche d'eau et la diminution de l'éclairement environnant réduit les reflets à sa surface (Figure 13).

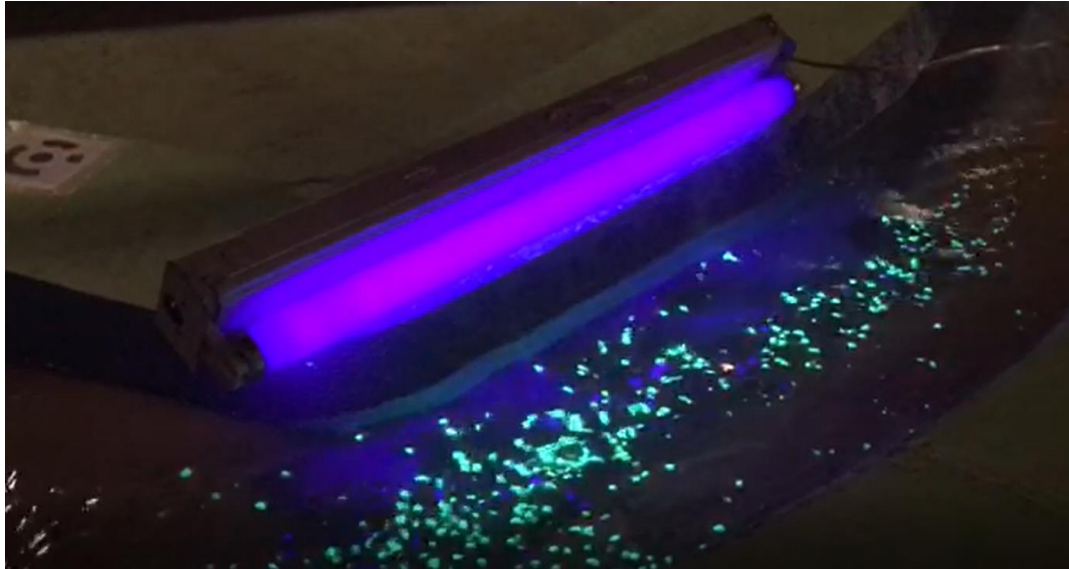


Figure 13 : exemple de grains peints pour réagir à la lumière ultra-violette

Après ce traitement les matériaux sont facilement identifiables et peuvent être photographiés sans difficulté sur les zones éclairées. De plus, ces peintures existent sous de nombreuses couleurs, permettant ainsi de choisir la teinte créant le contraste le plus marqué ou d'attribuer différentes couleurs à différentes classes de taille de sédiments (3 couleurs sont utilisées sur la Figure 13).

Les principales limites imposées par l'utilisation de la méthode PIV sur les sédiments sont de trois types. Tout d'abord il est nécessaire de s'assurer que les grains suivis sont facilement identifiables sur le plus d'images possibles lors du traitement. Pour optimiser cette identification il est possible d'utiliser les méthodes d'augmentation des contrastes évoquées précédemment, mais le choix du matériel photographique utilisé et son positionnement seront primordiaux. En effet une image réalisée à une distance trop élevée ou à une qualité trop faible ne permettra pas d'identifier les grains de manière individuelle et ainsi de suivre leur mouvement (habituellement des appareils capable de prendre des images pour de très courtes expositions sont utilisés).

La densité de sédiments présents peut être elle aussi un inconvénient. Dans le cas où celle-ci serait trop forte il deviendrait difficile d'identifier un grain isolé et de suivre son déplacement entre les images. L'utilisation de marqueurs (tels que des grains peints d'une couleur différente) ou l'application de la méthode sur des zones de faible densité sédimentaire permet de réduire le nombre d'éléments potentiellement identifiés et donc de réaliser un suivi bien plus fin.

Enfin, dans le cas où une peinture est utilisée afin de créer un contraste entre le sédiment et le fond du modèle ou entre sédiments, il est absolument nécessaire de s'assurer que cette couche de peinture ne modifie pas de manière significative les paramètres physiques du matériau (densité, rugosité). Ceci est particulièrement important dans l'hypothèse où le matériau utilisé pour représenter les sédiments présente une densité faible. Il convient donc de s'assurer que cette étape de marquage est sans impact sur ces paramètres avant son utilisation dans le modèle.

Ainsi, les méthodes de Particle Image Velocimetry permettent de visualiser les déplacements des grains et de mesurer leur vitesse de déplacement sur une zone d'étude. Il est cependant important que garder à l'esprit que les vitesses obtenues sont des vitesses moyennes de déplacement des sédiments ayant traversé la zone, et ce sur les parties superficielles du fond du lit.

Bathymétrie

Un des intérêt majeur rencontré dans l'utilisation d'un modèle physique de rivière est qu'il permet de simuler des évolutions hydromorphologiques sur un temps très court (de quelques heures à quelques jours), là où les mêmes évolutions peuvent mettre des dizaines voire des centaines d'années à se mettre en place en milieu naturel. Il est donc essentiel de pouvoir réaliser un suivi de l'évolution morphologique du modèle au cours des expérimentations au travers de relevés réalisés en lit mineur et/ou majeur. Les méthodes décrites par la suite présentent toutes la caractéristique d'être non intrusives afin de ne pas perturber le transport solide et liquide. Pour ce faire elles reposent principalement sur l'utilisation de technologies laser et d'imagerie. Afin d'optimiser la performance des lasers utilisés, ces derniers doivent émettre des rayons de couleur bleu/vert afin de pénétrer efficacement les couches d'eau. Le caractère non intrusif de ces dispositifs peut alors amener des incertitudes et perturbations dues aux phénomènes de réfraction et de reflets à l'interface air/fluide. Ces perturbations seront d'autant plus marquée dans le cas de dispositifs ne pouvant restreindre leur zone d'étude au chenal sous eau et couvrant aussi des zones exondées. Il conviendra d'appliquer les calibrations et le cas échéant les compensations nécessaires afin d'uniformiser au besoin les résultats obtenus en délimitant les zones inondées (subissant une réfraction) et zones exondées (ne subissant pas de réfraction).

Trois états du modèle

Les suivis bathymétriques doivent pouvoir procurer des données sur l'état initial du modèle avant expérimentation, lorsque ce dernier est en fonctionnement ainsi qu'une fois son fonctionnement terminé. Afin de permettre une bonne polyvalence de mesures en fonction des contextes rencontrés et de l'avancement des expérimentations, trois différents états sont considérés :

L'état « en fonctionnement », correspondant aux périodes pendant lesquelles les apports liquide et solide sont rétablis et pendant lesquelles la morphologie évolue. Les matériaux sont alors transportés par les écoulements et les évolutions des formes du lit sont à leur paroxysme. Cet état impose des mesures rapides au travers d'une couche d'eau en mouvement. L'intérêt évident de cet état est qu'il reproduit alors les mécanismes et évolutions en jeu dans l'état naturel, au prix d'une acquisition de données plus difficile du fait d'une lame d'eau en mouvement dans le chenal (J.A. Angel, 2014) (T. V. de Ruijscher, 2018). Il implique donc de procéder à des compensations d'erreur afin de réaliser des mesures bathymétriques lors de cet état.

L'état « noyé », pendant lequel le modèle ne fonctionne pas mais reste immergé grâce au contrôle appliqué par le système de régulation du niveau d'eau à l'aval. Aucun courant n'agit sur les matériaux, aucune entrée ou sortie d'eau ou de sédiment n'est à l'œuvre. Cet état présente l'avantage de maintenir la structure des formes s'étant développées dans le chenal et donc d'éviter une perte structurelle liée à une modification de la hauteur d'eau dans les sédiments. Cependant certaines modifications restent à anticiper puisqu'aucun courant n'est à l'œuvre et que l'arrêt de l'entraînement des matériaux force des dépôts dans des zones qui présentaient jusque-là un courant suffisamment fort pour les entraîner. Les mesures devront pouvoir être réalisées au travers d'une couche d'eau non courante. Cet état permet d'arrêter provisoirement une expérience et de « figer » l'état morphologique du modèle pour l'observer ou le préserver entre deux expériences espacées dans le temps. Ces mesures sont alors non continues et imposent d'appliquer des corrections aux données obtenues du fait de la réfraction induite lorsque les méthodes optiques et laser sont appliquées.

L'état « exondé » du modèle (avant ou après son fonctionnement), pendant lequel il a été vidé, ne présente pas de zones en eau et l'intégralité des sédiments est au contact de l'air (ces derniers pouvant être humides ou non). Un relevé réalisé dans cet état permet d'enregistrer l'état initial du modèle

avant expérimentation ou de constater un état final après évacuation de l'eau du modèle. Il s'agit donc de mesures que l'on pourrait qualifier de non continues puisque intervenant à des pas de temps larges. Aussi, l'étape de vidange du modèle peut alors être à l'origine de détérioration des formes présentes (principalement un affaissement des formes lié au retrait de la ligne d'eau). Ainsi, si réaliser des mesures bathymétriques dans cet état semble moins pertinent vis-à-vis de cette détérioration des formes, il permet de négliger toutes les perturbations liées à la présence d'eau dans le modèle (effets de réfraction pour les méthodes d'imagerie et laser), et ainsi d'obtenir un relevé de l'ensemble du modèle sans avoir à ajouter de correction pour des zones en eau.

Ainsi les trois états énoncés précédemment offrent une gamme de mesures caractérisées à la fois par la facilité de la mesure (besoin de correction) et la fidélité morphologique du modèle vis-à-vis de son homologue naturel :

- Etat « en fonctionnement », mesures les plus difficiles à réaliser dans l'eau courante mais fidélité morphologique élevée.
- Etat « inondé », mesures plus faciles à réaliser, correction de la réfraction dans les zones inondées mais perte de fidélité morphologique.
- Etat « exondé », mesures simplifiées, absence de reflets et de réfraction mais fidélité morphologique la plus faible.

Les dispositifs de relevé bathymétrique

Plusieurs dispositifs sont utilisables afin de réaliser des mesures bathymétriques tout en respectant la condition de non intrusivité. Il est attendu que ceux-ci puissent offrir une résolution au minimum millimétrique pour obtenir des résultats exploitable transposables à une échelle réelle.

La photogrammétrie

La photogrammétrie est un dispositif relativement simple d'utilisation et précis (précision inférieure au millimètre dans de bonnes conditions). Il repose sur la stéréoscopie, reproduisant du relief à partir de deux images d'un même sujet prises de deux points de vue différents (ESRI, s.d.).

Le chenal est photographié au-dessus du modèle sur lequel sont installés des cibles dont la position est référencée précisément avant chaque expérimentation. Ces cibles aux coordonnées connues servent ensuite de repères pour l'assemblage des clichés et permettent d'attribuer des valeurs d'élévations aux points créés lors du traitement stéréoscopique.

La position des appareils photographiques utilisé est un paramètre essentiel pour la réussite de cette méthode et différentes distances et angles incidents sont à explorer pour obtenir la meilleure couverture possible. De ces paramètres dépendent en effet la surface couverte par les images et le recouvrement entre chaque cliché, permettant de les mettre en relation pour créer l'image la plus précise possible et réduire les erreurs. Enfin, les appareils peuvent être déplacés le long du modèle au cours de l'acquisition afin de couvrir l'intégralité de sa surface (Figure 14).

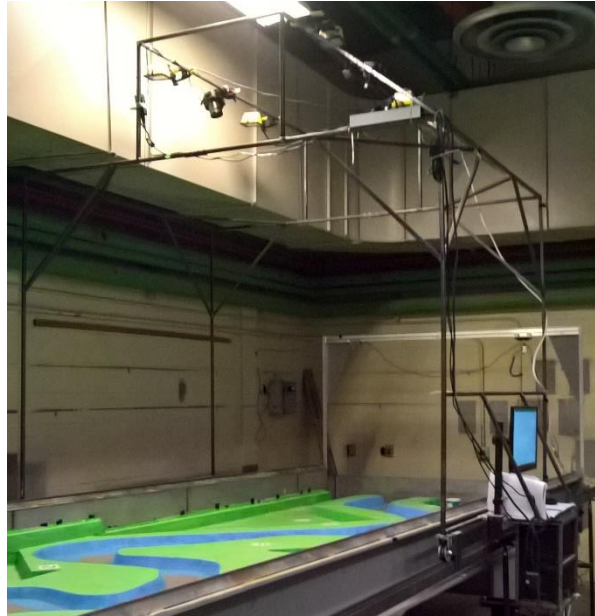


Figure 14 : Exemple de chariot supportant les appareils photographiques utilisés pour de la photogrammétrie et permettant le déplacement du dispositif

Les clichés de la zone d'étude sont ensuite traités par un logiciel de stéréoscopie (exemple : Agisoft Photoscan) capable de reconstituer une orthophotographie du chenal et un modèle numérique de terrain (MNT) grâce aux positions relatives des cibles sur les images et de leur altitude.

Si cette méthode est simple d'utilisation et permet d'obtenir des résultats suffisamment précis, elle présente certains inconvénients. Tout d'abord l'expérience a montré que la calibration du dispositif peut être un processus nécessitant plusieurs phases de test afin d'atteindre la résolution ciblée. De plus, la méthode requiert une bonne luminosité et impose que celle-ci soit régulière tout au long des prises de vue, impliquant la mise en place d'un système d'éclairage puissant qui peut se refléter sur les surfaces inondées. Aussi, cette méthode trouve ses limites lorsque les zones en eau sont reconnues comme des surfaces par le logiciel de stéréoscopie ou que la réfraction fausse les prises de vues des parties immergées.

Ces limites indiquent donc que ce dispositif est le mieux utilisé pour des mesures discontinues, dans un état plutôt exondé ou potentiellement inondé dans le cas où les reflets sont efficacement réduits et que la réfraction est corrigée après la prise d'images (Gyer, 1996), (S. Kyle).

Line laser Scanner

La technologie du Line Laser Scanner repose sur un principe de distorsion d'une laser projeté en ligne droite sur une surface. Une caméra ou un capteur dédié est utilisée pour observer cette ligne et en enregistrer les variations. Du point de vue de ce capteur, la position de chaque point composant la ligne émise sera alors différente en fonction de la distance entre l'objet et l'émetteur laser. Le dispositif est installé de façon à créer un triangle composé de la ligne laser, du capteur et de l'émetteur (Figure 15). Lors de la calibration on mesure la distance entre le capteur et la ligne laser, l'angle d'incidence du laser et celui du capteur, il est alors possible de déterminer les dimension du triangle et ainsi de connaître les positions de chaque point composant la ligne laser dans le référentiel qu'est l'image du capteur. Lors des mesures la forme de l'objet distord la ligne et modifie la position des points. Ces positions peuvent être traduite en une distance séparant le point sur l'objet et l'émetteur laser (A. Malhotra, 2011). Ces données sont ensuite exportées sous formes de points référencés pouvant être exploités statistiquement ou transformés en représentation de la bathymétrie

Cette technologie permet donc d'obtenir des coordonnées d'altitude sur une section transversale ou longitudinale du modèle. Deux applications sont alors envisageables pour le modèle physique.

La première consiste en un suivi d'une tranche fixe au cours du temps. Cet usage est utilisé en industrie sur des chaînes de fabrication où les objets circulent sous le dispositif afin d'en vérifier la conformité. Dans le cas du modèle, le dispositif placé sur une zone d'étude présentant un intérêt particulier peut enregistrer l'élévation du fond du modèle. Les mesures sont alors principalement limitées par la fréquence d'acquisition du capteur mais la valeur extrêmement élevée de cette dernière (jusqu'à 2000 Hz) permet de considérer cette mesure comme continue. Il devient donc possible d'étudier une section du modèle afin de constater son évolution au cours du temps, d'observer et de mesurer les flux de sédiments et donc aussi de mesurer un débit solide circulant dans la section lors du fonctionnement du modèle.

L'autre application consiste en un balayage du modèle par ce dispositif. La grande fréquence d'acquisition permet alors de réaliser un balayage rapide du modèle à même d'obtenir un relevé bathymétrique de celui-ci. Cette application implique de mettre en place un dispositif de suivi de la position du système afin de faire correspondre des coordonnées longitudinales et transversales à chaque altitude mesurée au droit de la ligne laser. L'application de cette méthode aux modèles physique (T. V. de Ruijscher, 2018) a révélé que les erreurs dues à la réfraction sont négligeables dans les expériences sur lit mobile en comparaison des erreurs de mesure résiduelles. Aussi, bien qu'une augmentation de la profondeur puissent induire de nouvelles erreurs de mesure, les variations du nombre de Froude ne semble pas entraîner de perte de donnée. L'utilisation de filtres permet de limiter l'apparition de valeurs aberrantes et une interpolation des points enregistrés permet d'obtenir une bathymétrie cohérente et précise (Figure 16).

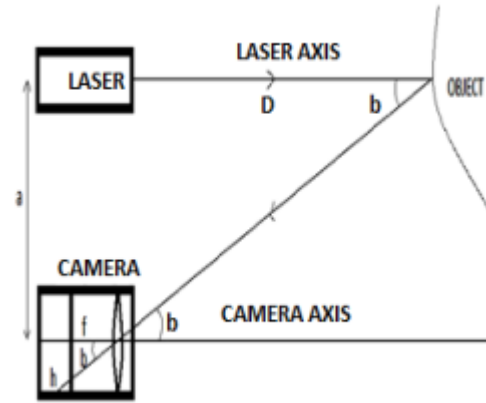


Figure 15 : Technique de triangulation pour Scan Laser
(A. Malhotra, 2011)

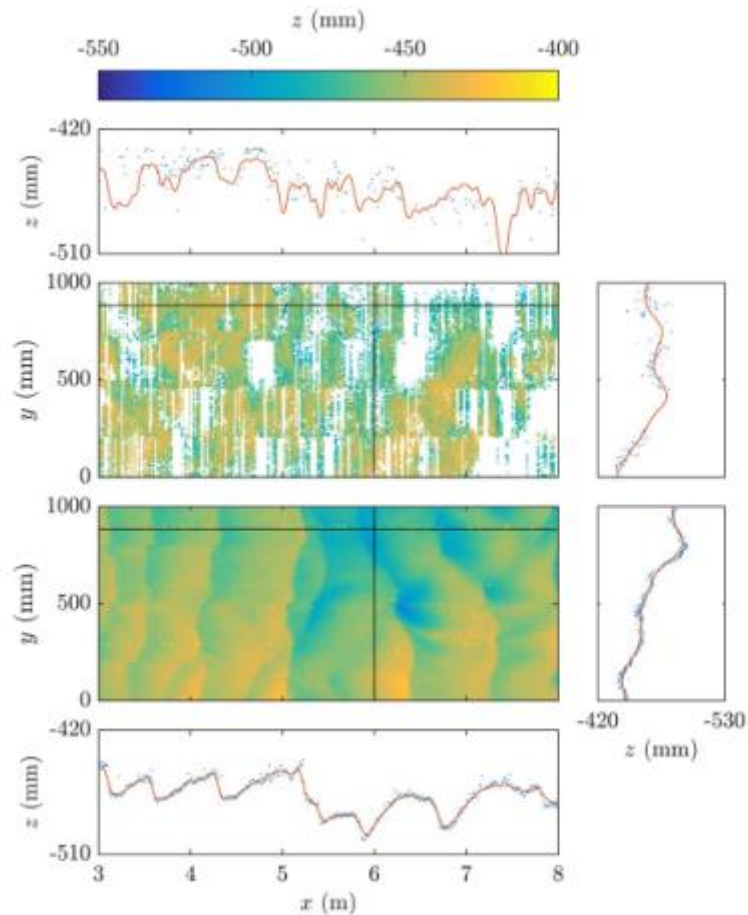


Figure 16 : Exemple de relevé bathymétrique réalisé au Line Laser Scanner (T. V. de Ruijscher, 2018)

Ainsi les Line Laser Scanners peuvent être utilisés pour réaliser des mesures continues sur une section transversale ou longitudinale du modèle ou encore sur son intégralité pour réaliser une carte de sa bathymétrie.

Pour cette dernière application la trajectoire employée devra aboutir au meilleur compromis entre recouvrement et vitesse d'exécution. La grande précision de l'outil (jusqu'à 1280 points par ligne, une fréquence d'acquisition élevée et une précision annoncée de 2 μ m), sa rapidité et son utilisation simple semble en faire un outil prometteur utilisable sur les trois états du modèle énoncés précédemment. De plus, ces dispositifs proposent des lasers de couleur bleu, spécialement adaptés aux mesures sur des objets transparents et dont la performance face à la présence d'eau dans le modèle restera supérieure aux dispositifs à lumière rouge. Quoiqu'il en soit, même si la méthode peut être appliquée dans les trois états du modèle, il reste nécessaire de définir les corrections à mettre en place vis-à-vis de la réfraction en fonction de l'état en question et d'appliquer ces dernières si nécessaires.

Structured Light 3D Scanner

La technologie employée par les Scanners à lumière structurée est très similaire à celle employée par les Line Laser Scanners. Ici ce n'est plus une ligne qui est projetée mais un ensemble de lignes en franges ou formant une forme géométrique (Figure 17). La triangulation est double puisque réalisée par deux capteurs observant le même objet et placés à différents angles. On peut donc en une seule mesure réaliser un scan tridimensionnel de l'objet en question sans avoir à déplacer le dispositif. Les données produites sont obtenues sous la forme d'un nuage de points exploitable pour la réalisation de relevés bathymétrique.

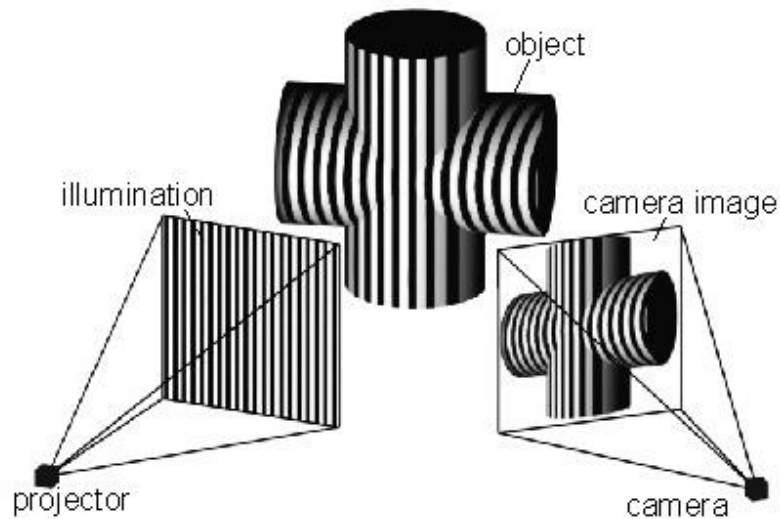


Figure 17 : Fonctionnement de la technique Structured Light 3D Scanner, Source : 3Dnatives

Les travaux réalisés à ce sujet indiquent que ces dispositifs sont fiables pour reproduire les fonds existants dans des contextes de modèles physiques en eau, après application d'une correction liée à la hauteur d'eau en place. (J.A. Angel, 2014). La vitesse d'acquisition et la précision des mesures sont similaire aux technologies de Line Laser Scanner (précision estimée de 10 μm) en condition normales mais l'utilisation de ces dispositifs est relativement nouvelle sur les modèles physiques et leur usage s'est limité à des études visant à expérimenter la méthode. Ces travaux indiquent que quelques secondes sont nécessaires pour scanner une portion de modèle mais que la résolution du nuage de points attend une résolution inférieure à 1,5 mm avec un modèle en fonctionnement. Aussi, les corrections de réfraction sont efficaces pour des profondeur allant jusqu'à 7 cm.

Conclusion et tableau récapitulatif

Ainsi il existe de nombreuses méthodes pour mesurer et suivre les débits liquides et solides, les vitesses solides et liquides et la bathymétrie sur un modèle physique d'une dimension de 5 à 10 mètres de long pour 2 à 3 mètres de large. Les dispositifs décrits dans ce rapport ne constituent pas une liste exhaustive du vaste champ de possibilités en terme d'outils de mesures, mais cherchent à proposer des méthodes capables répondre à des impératifs de précision, de facilité d'utilisation et dans une moindre mesure de faisabilité technique et financière.

Chacune d'entre elles présentent des avantages et des inconvénients qui lui sont propre et le choix des méthodes retenues ainsi que du niveau technique et technologique des appareils utilisés dépendra des caractéristiques spécifiques au dimensionnement de modèle et de leur intérêt vis-à-vis des besoins et circonstances rencontrées.

Les principaux avantages et inconvénients des méthodes présentées dans ce rapport sont résumés en Annexe I et les méthodes présentant le meilleur potentiel figurent dans le Tableau 1:

Tableau 1 : Méthodes et instruments présentant le meilleur potentiel

Méthode	Avantages	Degrés de précision	Gamme de Prix
Mesures de débit liquide en entrée			
Déversoir	Fiable et simple d'utilisation Applicable à une large gamme de débits	Précision dépendante de la fiabilité de la mesure de la hauteur d'eau	Variable, sur devis
Capteur de niveaux à ultrason	Mesures en continu Précision élevée	De 0,5 à 1% du débit	De 160 à 1600 euros
Mesure de débit solide en entrée			
Pompes Volumétriques	Alimentation sans à-coup Système compact et intégré	Variable, à déterminer expérimentalement	Variable, sur devis
Mesure de débit solide en sortie			
Convoyeur à bascule	Mesures en continu et instantanées Possibilité de recirculation des sédiments après la pesée	1 à 2% de la masse mesurée	Elevée, sur devis
Mesure de vitesse des fluides			
Particle Image Velocimetry	Mesure de vitesses moyenne sur une large zone Bonne précision	Variable en fonction de l'échelle retenue et du matériel utilisé	300 euros (caméra 120 fps)
Mesure de vitesse des matériaux			
Particle Image Velocimetry	Mesure de vitesses moyenne sur une large zone Bonne précision	Variable en fonction de l'échelle retenue et du matériel utilisé	300 euros (caméra 120 fps)
Bathymétrie			
Line Laser Scanner	Mesures continues sur une section du modèle Précision élevée	µmétrique	De quelques centaines à milliers d'euros

Bibliographie

- A. A. Harpold, S. M. (2006, Août). Stream discharge measurement using a large-scale particle image velocimetry prototype. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 49. doi:10.13031/2013.22300
- A. Hauet, M. J. (2014). Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière. (E. Sciences, Éd.) *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 16-22. doi:10.1051/lhb/2014024
- A. Malhotra, K. G. (2011, Decembre). Laser Triangulation for 3D Profiling of Target. *International Journal of Computer Applications*, 35(8).
- A. Radice, S. M. (2006, Septembre 13). Solid transport measurements through image processing. *Experiments in Fluids*, 51(5), 721 - 734. doi:10.1007/s00348-006-0195-9
- ESRI. (s.d.). *What is image classification*. Consulté le 2018, sur ArcGIS Desktop: <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.4/extensions/spatial-analyst/image-classification/what-is-image-classification-.htm>
- G. Nicollet, G. L. (1991). Modèles hydrauliques fluviaux. C (184), 1 - 6. Récupéré sur <https://books.google.fr/books?id=wUpJpJqDwm4C&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false>
- Gyer, M. S. (1996, March). Methods for computing Photogrammetric Refraction Corrections for Vertical and Oblique Photographs. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(3), 301 - 310.
- J. Heyman, C. A. (2014, Août). Tracking bed load particles in a steep flume: methods and results. doi:10.1201/b17133-123
- J.A. Angel, B. G.-L. (2014, 12 31). Mapping bed-level evolution in laboratory flumes by means of structured light. *Book of Abstracts NCR-Days*.
- Jianhu Zhao, X. Z. (2017, Avril 30). Shallow Water Measurements Using a Single Green Laser Corrected by Building a Near Water Surface Penetration Model. *Remote Sensing*. doi:10.3390/rs9050426
- Julien, P. Y. (2002). *River Mechanics*. (C. U. Press, Éd.)
- Les modèles physiques :représentation des sédiments marins*. (s.d.). Récupéré sur INP Toulouse, ENSEEIHT: <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD9598/travaux/optsee/hym/nome55/hydromar/lignon/page5.htm>
- S. Kyle, S. R. (s.d.). Compensating for the effects of refraction in photogrammetric metrology. (U. University College London, & M. A. RMIT University, Éd.s.)
- T. V. de Ruijscher, A. J. (2018, Mars 23). Application of a Line Laser Scanner for Bed Form Tracking in a Laboratory Flume. (A. Publications, Éd.) *Water Resources Research*. doi:10.1002/2017WR021646

Annexes

Annexe I : Tableau récapitulatif des instruments et méthodes proposées I

Annexe I : Tableau récapitulatif des instruments et méthodes proposées

Méthode	Avantages	Inconvénients	Degrès de précision
Mesures de débit liquide en entrée			
Canaux Venturi et déversoir	Fiable et simple d'utilisation Applicable à une large gamme de débits	Efficacité dépendante de la fiabilité de la mesure de la hauteur d'eau	Précision dépendante de la fiabilité de la mesure de la hauteur d'eau
Echelle Limnimétrique	Simple d'utilisation et d'installation	Précision réduite (en fonction de la stabilité de la hauteur d'eau) Mesure discontinue	cm à mm
Jaugeur à pointe	Bonne précision Simple d'utilisation	Uniquement applicable à une hauteur d'eau stable Mesure discontinue	Inférieure au mm
Capteur de niveaux à ultrason	Mesures en continu Précision élevée	Prix plus élevé	De 0,5 à 1% du débit
Mesure de débit solide en entrée			
Vis sans fin / Tarrière	Simple d'utilisation Alimentation sans à-coups Fonctionnement fiable	Peut endommager les matériaux Peut entraîner un granuloclasement dans les stocks	Variable, à déterminer expérimentalement
Pompes Volumétriques	Alimentation sans à-coup Système compact et intégré	Peut endommager les matériaux	Variable, à déterminer expérimentalement en fonction des modèles et de la réponse face au matériaux y transitant
Pompes Centrifuges	Résistantes Faible risque d'endommager les matériaux	Accélération des matériaux en éjection de la pompe	Variable, à déterminer expérimentalement en fonction des modèles et de la réponse face au matériaux y transitant
Mesure de débit solide en sortie			

Récupération et pesée manuelle	Simple à mettre en place et à réaliser	Mesure discontinue Faible précision sur le temps	Précision dépendant du système de mesure de masse utilisé et de l'état d'humidité des matériaux
Convoyeur à bascule	Mesures en continu et instantanée Possibilité de recirculation des sédiments immédiatement après la pesée	Plus cher Demande plus d'espace	1 à 2% de la masse mesurée
Techniques bathymétriques	Mesure en continu	Inconvénients liés à la méthode de mesure bathymétrique retenue	Précision liée à la méthode de mesure bathymétrique retenue
Mesure de vitesse des fluides			
Particle Image Velocimetry	Mesure de vitesses moyenne sur une large zone Bonne précision	Besoin d'utiliser des marqueurs flottants pouvant ne pas représenter l'ensemble des écoulements Mesure discontinue	Variable en fonction de l'échelle physique et de l'échelle de temps Potentiellement élevée
Marqueur coloré dilué	Permet de visualiser les écoulements singuliers	Peu précis Mesure discontinue Une seule vitesse moyenne obtenue sur une large zone	Faible précision
Mesure de vitesse des matériaux			
Particle Image Velocimetry	Mesure de vitesses moyenne sur une large zone Bonne précision	Seuls les matériaux des couches superficielles sont visibles Besoin d'un bon contraste pour observer les matériaux Mesure discontinue	Variable en fonction de l'échelle physique et de l'échelle de temps Potentiellement élevée
Bathymétrie			

Photogrammetrie	Bonne précision Production d'une orthophotographie et d'un MNT	Demande d'avoir réalisé une bonne calibration Mesure discontinue Demande une bonne luminosité Correction des reflets et de la réfraction sur les surfaces en eau	Inférieur au mm dans de bonnes conditions
Line Laser Scanner	Mesures continues sur une section du modèle Précision élevée	Besoin de corriger la réfraction	μm
Structured Light 3D Scanner	Mesures tridimensionnelles Relevés bathymétriques rapides Précision élevée Mesures continues	Besoin de corriger la réfraction	μm

Directeur de recherche :

Stéphane Rodrigues

Louis Vervynck
PFE/DAE5
IMA
2018-2019

Proposition de méthodes de mesures sur un modèle physique fluvial de la Loire

Résumé : Les modèles physiques hydrauliques sont des représentations en modèle réduit visant à reproduire de manière simplifiée le fonctionnement d'un cours d'eau. Les modèles physiques sont particulièrement utiles dans l'expérimentation de différentes configurations d'aménagement ou de gestion des débits solides et liquides et permettent d'anticiper les effets d'une perturbation sur un cours d'eau.

Ces modèles présentent l'inconvénient d'induire des incertitudes produites par des distorsions et/ou exclusions de règles de similitudes et d'échelle (Géométrie, Cinématique et Dynamique). Ces libertés prises afin de rendre possible la modélisation de phénomènes naturels en conditions contrôlées entraînent une exacerbation des incertitudes lorsque les résultats sont extrapolés au domaine naturel. Afin de limiter l'impact de ces incertitudes il devient essentiel de pouvoir réaliser des mesures les plus précises possibles.

Ce rapport s'attache à présenter différents dispositifs de mesures qui pourraient être mis en place dans l'hypothèse du développement d'un modèle physique à fond mobile visant à reproduire le processus de genèses/migration des barres associé à la baisse des débits et au changement de morphologie des berges. Les paramètres traités ont été retenus soit puisqu'ils servent à paramétrer le modèle soit puisqu'ils font l'objet d'études visant à produire des résultats. Ces paramètres sont :

- Les débits liquides en entrée de modèle (Mesure et contrôle du débit qui se veut variable)
- Les débits solides en entrée et sortie du modèle (Réalisation d'un bilan sédimentaire, observation de la migration de barres sédimentaires)
- La vitesse des écoulements et des sédiments (Compréhension des phénomènes en jeu à l'échelle locale et mesure de débit liquide)
- La réalisation de relevés bathymétriques (Relevé de la morphologie, étude de l'évolution des formes du lit et mesure de débit liquide et solide)

Chacune des méthodes proposées vise à fournir un résultat suffisamment précis, facilement acquérable et surtout pouvant être mis en place et utilisé sans perturber le transport liquide, solide ou tout autre mécanisme à l'œuvre.

Mots Clés : Modèle physique, Hydromorphologie, Instrumentation et méthodes de mesures