

MODELISATION DES PERTES DE CHARGES DE FAISCEAU DE STRUCTURES FLEXIBLES PLACE DANS UN ECOULEMENT TURBULENT A SURFACE LIBRE

HEAD LOSS MODELLING OF FLEXIBLE STRUCTURES BUNDLES PLACED IN A TURBULENT FREE SURFACE FLOW

T. LARRIEU⁽¹⁾, L. CASSAN⁽²⁾, F. MOULIN⁽²⁾, A. BERNARD⁽¹⁾, L. DAVID⁽¹⁾,
G. PINEAU⁽¹⁾, D. CALLUAUD⁽¹⁾,

*thomas.larrieu@univ-poitiers.fr; ludovic.cassan@toulouse-inp.fr; frederic.moulin@toulouse-inp.fr;
anthony.bernard@univ-poitiers.fr; laurent.david@univ-poitiers.fr; gerard.pineau@univ-poitiers.fr;
damien.calluaud@univ-poitiers.fr*

⁽¹⁾ Institut Pprime, Pôle R&D Ecohydraulique, OFB-IMFT-PPRIME, Poitiers

⁽²⁾ Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Pôle R&D Ecohydraulique, OFB-IMFT-PPRIME, Toulouse

Abstract : Lorsque des structures flexibles sont placées dans un écoulement, elles dissipent une partie de l'énergie cinétique du fluide. Quantifier cette dissipation présente des intérêts pour un grand nombre d'application allant de l'étude de l'écoulement à surface libre sur une canopée de végétaux, l'amélioration des dispositifs de passe à poissons par ajout d'obstacles flexibles à la protection des berges par végétalisation. Basé sur des mesures effectuée à l'Institut Pprime, l'objectif de cette étude est de proposer des modèles empiriques qui caractérisent la perte de charge en connectant, la flexibilité du matériau par le nombre de Cauchy, la densité des tiges, le nombre de rangées, les caractéristiques intrinsèques de la canopée et la nature des écoulements.

1. Introduction

La modélisation des pertes de charge générées par des structures flexibles en écoulement turbulent à surface libre représente un enjeu important dans le domaine des écoulements naturels fluviaux. La présence de végétation immergée ou émergée en milieu aquatique est définie sous le terme de canopée, ou encore canopée aquatique. Une canopée peut être vue comme une communauté de plantes [5], [6]. Contrairement à une canopée, un patch de structures représente une portion ou tronçon des éléments (plantes) composant la canopée. La surface occupée par le couvert végétal d'une canopée est donc bien plus importante que celle correspondant au couvert végétal d'un patch. Le patch modélise les interactions fluide-structures existant entre une section finie de roseaux et l'écoulement turbulent à surface libre qui la traverse. Des cylindres flexibles modélisent la végétation du patch, et permettent de simuler les phénomènes physiques qui régissent de telles interactions. De plus, ce travail permettra d'étoffer les connaissances sur ces interactions fluide-structures (FSI) qui règnent au sein des canopées afin de mieux appréhender les phénomènes physiques qui régissent l'hydrodynamique des écoulements à surface libre en présence de végétation aquatique ainsi que l'hydromorphologie des rivières par la même occasion.

Des expériences ont été menées dans le canal hydrodynamique ouvert de l'Institut Pprime, Université de Poitiers. La démarche expérimentale consiste à étudier les pertes de charge causées par un faisceau de structures placées dans un écoulement, [4]. Les structures flexibles employées sont des tiges verticales de cylindres circulaires aux caractéristiques mécaniques et géométriques comparables aux structures végétales. Jusqu'à présent l'étude de canopée à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse a porté principalement sur des obstacles rigides soit pour des passes à poissons en enrochement ou la modélisation de crue extrême (simulation de la submersion totale de zone habitée), [2], [3]. Ces études ont permis d'élaborer des lois de comportements à l'échelle de l'ouvrage ou de la

rivière mais aussi de comprendre plus finement la structure de la couche limite dans et au-dessus des obstacles.

2. Matériel utilisé

Les essais ont été réalisés dans le canal hydrodynamique CanHyde de l'institut Pprime, figure 1. Deux types de structures ont été utilisés, des structures flexibles, cylindres circulaires de diamètre $D = 0.016\text{m}$ et de longueur $H = 0.4\text{m}$ réalisées en polyuréthane UR – 3558, et des structures rigides de mêmes dimensions en acier inoxydable (figure 4.2). Ces structures ont été fixées sur une plaque en PVC avec le mode de fixation épaulement/lamage. La mesure des hauteurs d'eau a été réalisée avec des sondes acoustiques Microsonic MIC+35 ayant une gamme de mesure de 65mm à 350mm.

Les données exploitables sont des hauteurs d'eau mesurées par ces sondes acoustiques sur une période de 250 s afin d'assurer la convergence temporelle et à une fréquence de 200 Hz. Ces capteurs sont disposés en amont et en aval du patch composé des structures, cf. Figure 6 de diamètre D égal à 16 mm et de hauteur h de 400 mm.

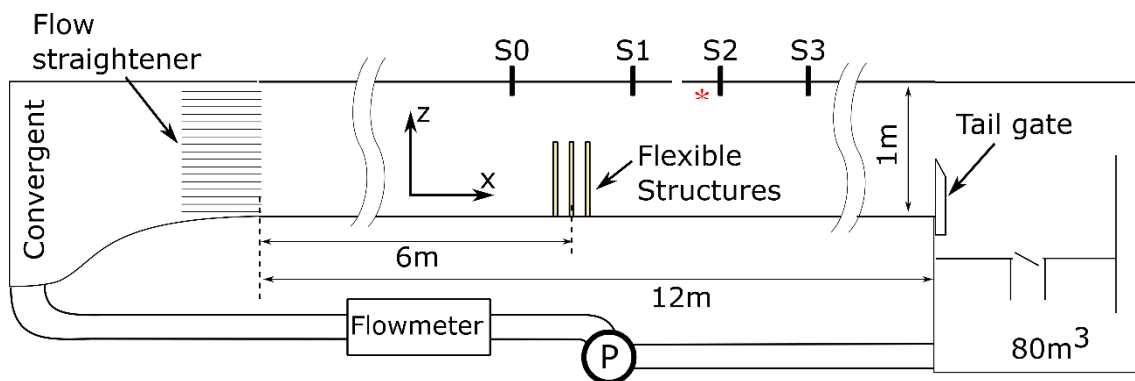


Figure 1 : Schéma du principe expérimental mis en place. * Même schéma avec les structures rigides

Les mesures de hauteurs d'eau en amont et en aval du patch permettent ainsi d'évaluer les pertes de charge dues à la présence du patch de structures rigides qui représente donc un obstacle à l'écoulement turbulent à surface libre dans le canal. L'étude consiste à quantifier l'influence des différents paramètres qui régissent d'une part l'écoulement, et d'autre part la disposition relative des cylindres entre eux sur l'évolution des pertes de charge associées. Les rangées sont disposées les unes par rapport aux autres en quinconce, dans le but d'obtenir une configuration en triangle équilatéral entre deux cylindres appartenant à une même rangée et un cylindre appartenant à une rangée voisine, figure 2. Les essais paramétriques réalisés permettent de définir différentes configurations de patch et de conditions d'écoulement :

- Une vitesse amont moyenne est définie et imposée en fixant le débit en début de canal. Ainsi, 4 vitesses ont été testées : 0.5, 0.75, 1 et 1.25 m/s.
- Pour chaque vitesse testée, deux paramètres définissent la disposition relative des cylindres entre eux. Ces deux paramètres qui sont le nombre de rangées transverses à l'écoulement noté N et la distance inter-axiale entre deux cylindres voisins notée S , représentent alors une densité de structures composant le patch. Dans les essais, N a varié de 1 à 4 par pas de 1 et S de telle manière que le rapport S/D varie de 3 à 12 par pas de 3

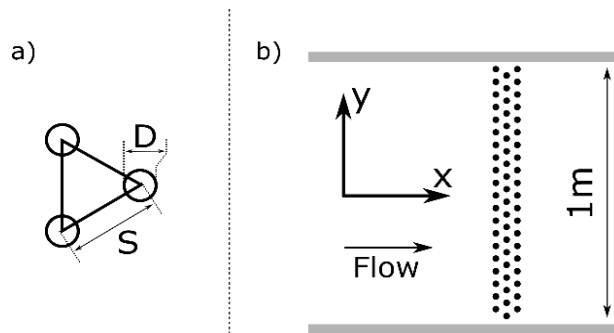


Figure 2 : [Vues de dessus] a) Pattern d'implantation des structures. b) Disposition en quinconce des cylindres, transversalement à l'écoulement.

3. Résultats

3.1. Evolution des pertes de charges

Dans l'écoulement, les structures vont avoir un comportement proche de celui d'un cylindre isolé, même pour le cas où elles sont les plus proches ($S/D = 3$). Pour la plus petite vitesse (0.5m/s) les structures vibrent transversalement et longitudinalement de façon cohérente avec des amplitudes importantes. On remarque des phénomènes de résonances des cylindres, ils vibrent de façon synchrone, cependant ce phénomène n'est pas permanent et fait intervenir des groupes de 3 à 4 cylindres côte à côte. Lorsque la vitesse augmente, les vibrations transversales se réduisent significativement, les cylindres fléchissent davantage dans le sens de l'écoulement (figure 3) et les résonances entre cylindres disparaissent. Dans le cas où la vitesse est la plus importante (1.25m/s), la flexion est significative ce qui réduit la surface en opposition avec le fluide. On constate alors qu'une partie de l'écoulement passe au-dessus des structures et sera donc peu influencée par celles-ci.

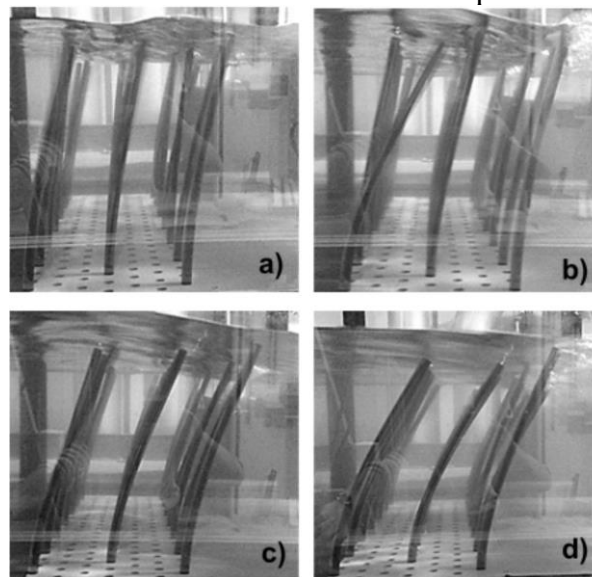


Figure 3 : Photographies des structures flexibles durant les essais (configuration $S/D = 9$; $N = 3$). a) $u_0 = 0.5\text{m/s}$ b) $u_0 = 0.75\text{m/s}$ c) $u_0 = 1.0\text{m/s}$ d) $u_0 = 1.25\text{m/s}$

Les pertes de charge obtenues indiquent que les trois paramètres de l'étude ont une influence sur les pertes de charge (figure 4). Lorsque le nombre de rangées augmente alors la perte de charge associée augmente. Cette augmentation est causée par l'augmentation de la résistance à l'écoulement par l'augmentation du nombre de cylindres dans l'écoulement. Lorsque S/D diminue alors la perte de charge augmente. La réduction de S/D implique une diminution de la distance entre les cylindres, donc une réduction de la surface de passage pour l'eau. La valeur minimale pour ce paramètre est 1. Dans ce cas, la section de passage pour le fluide est nulle, donc une perte de charge infinie. On peut donc supposer que la perte de charge augmentera suivant une allure exponentielle, tendant vers

l'infinie lorsque S/D tend vers 1 et tendant vers 0 lorsque S/D tend vers l'infini. Ces tendances s'observent dans l'analyse du coefficient de perte de charge qui sera présenté dans la suite. Pour finir, les pertes de charge sont dépendantes de la vitesse, elles augmentent lorsque la vitesse augmente. Cette dépendance semble être en fonction de la vitesse au carrée (figure 4). Malgré la flexibilité des structures, on constate que l'évolution des pertes de charge est peu influencée par la vitesse. Les effets de la flexibilité seront présentés par la comparaison des résultats entre les essais menés avec les structures flexibles et rigides. Les coefficients de corrélation R^2 pour ces régressions linéaire sont supérieurs à 0,95, sauf pour deux d'entre elles. Cela concerne les configurations, $N = 1$ pour $S/D = 12$ et $S/D = 9$. La mauvaise qualité des régressions dans ces configurations s'explique par la faible perte de charge qu'elles induisent, la part des incertitudes de mesures devient importante vis-à-vis des résultats.

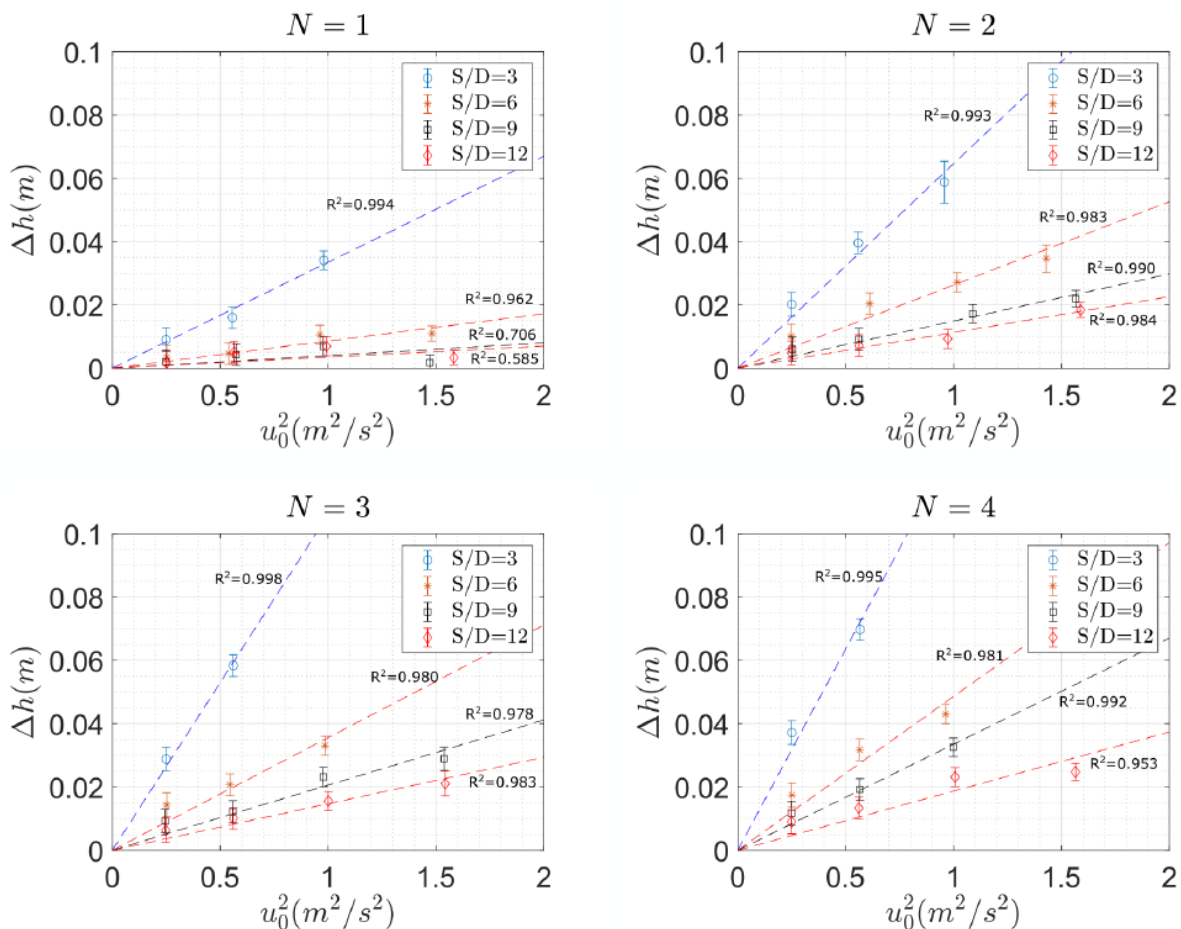


Figure 4 : Pertes de charge tracées en fonction de u_0 pour l'ensemble des configurations expérimentales pour les structures flexibles

3.2. Modèle basée sur l'application de la conservation de la quantité de mouvement

La construction du modèle est faite à partir de la conservation de la quantité de mouvement sur un volume de contrôle (figure 5). Pour cette étude, l'écoulement est supposé stationnaire, uniforme en amont et en aval de l'obstacle (figure 5). De plus, les frottements du canal ne sont pas pris en considération puisqu'ils ont été retranchés des résultats expérimentaux et la vitesse est supposée uniforme et égale à la vitesse débitante (les effets de couche limite sont négligés), seules les résistances causées par l'obstacle seront étudiées. L'équation peut alors être simplifiée en éliminant le terme propre à l'accélération et aux forces de frottement.

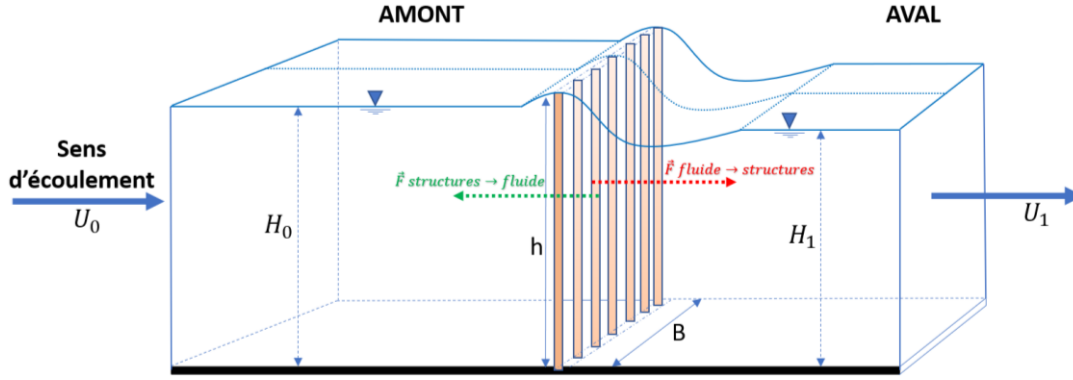


Figure 5 Schématisation du problème

Où :

h_0 est la profondeur totale à l'amont des structures, la profondeur est ici définie comme la différence d'altitude entre la surface libre et le fond du canal. Donc h_0 (m) est vue comme la hauteur d'eau moyenne totale amont.

h_1 (m) est la hauteur d'eau moyenne totale aval et $g=9,81$ m.s⁻² la constante de pesanteur.

B représente la largeur constante du canal ouvert, égale à 1m.

U_1 est la vitesse moyenne débitante en aval des structures.

L'équation qui régit la conservation de la quantité de mouvement dans un volume de fluide donné est :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \int \int \int_{V_c} \frac{d\rho_f \vec{u}}{dt} dV_c + \int \int_{S_c} \rho_f \vec{u} (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS_c \quad \text{Équation 1}$$

Trois actions mécaniques sont considérées ici, les pressions hydrostatiques amont et aval, la pression atmosphérique p_{atm} et la trainée de l'obstacle, le tout projeté suivant l'axe x.

La somme de l'ensemble des pressions hydrostatique et atmosphérique conduit à :

$$L_c \int_0^{h_0} p_0(z) dz + L_c \int_0^{h_1} p_1(z) dz + L_c \int_{h_1}^{h_0} p_{atm} dz = \frac{1}{2} L_c \rho_f g h_0^2 - \frac{1}{2} L_c \rho_f g h_1^2 \quad \text{Équation 2}$$

La trainée globale de l'obstacle est définie à partir de la trainée d'un cylindre isolé dans un écoulement transverse. Cette trainée est estimée à partir du coefficient de trainée $C_x = 1.2$, obtenu pour un cylindre isolé [1] pour un nombre de Reynolds équivalent. Il est supposé ici que la trainée totale dépend du nombre de cylindres dans l'écoulement, donc que chaque cylindre a la même trainée, qu'il se trouve sur la première ou la dernière rangée. La trainée de l'ensemble du faisceau dépend de la vitesse maximale entre les barreaux u_m , [1]. Cette vitesse est estimée par conservation du débit. Ainsi la trainée totale peut s'écrire :

$$F_{tot-x} = -N_c N \left(\frac{1}{2} \rho_f H D C_x \left(\frac{1}{1 - \frac{D}{S}} \right)^2 u_0^2 \right) \quad \text{Équation 3}$$

Sachant que $L_c = N_c S$, que $u_1 = u_0 h_0/h_1$ (conservation du débit), l'équation du bilan des quantités de mouvement peut être exprimée selon x :

$$\frac{h_1^3}{h_0^3} + \frac{h_1}{h_0} \left(N \frac{D}{S} \frac{H}{h_0} \frac{C_x}{\left(1 - \frac{D}{S}\right)^2} \frac{u_0^2}{gh_0} - \frac{2u_0^2}{gh_0} - 1 \right) + \frac{2u_0^2}{gh_0} = 0$$

Équation 4

Il est possible également d'implémenter les effets de la flexibilité et de la présence de plusieurs cylindres sur la trainée. La flexibilité des structures a pour conséquence de réduire la surface projetée en opposition avec le fluide. Cette réduction de trainée appelée reconfiguration R est causée par la flexion de la structure. Elle est directement proportionnelle au nombre de Cauchy C_Y à la puissance ν , appelé exposant de Vogel. Le paramètre de reconfiguration R est ajouté au modèle, il est défini comme $R = KC_Y^\nu$.

Pour compléter ce modèle en tenant compte de phénomènes dû à la présence de plusieurs cylindres, un coefficient est introduit qui traduit la modification de la valeur de la trainée en fonction du nombre de cylindre.

L'équation finale s'écrit alors :

$$\frac{h_1^3}{h_0^3} + \frac{h_1}{h_0} \left(NS_{1a} \frac{RH}{h_0} \frac{C_x}{\left(1 - \frac{D}{S}\right)^{2+\alpha}} \frac{u_0^2}{gh_0} - \frac{2u_0^2}{gh_0} - 1 \right) + \frac{2u_0^2}{gh_0} = 0$$

Équation 5

Cette équation est un polynôme d'ordre trois qui permet de trouver la hauteur d'eau relative h_1/h_0 en fonction de la configuration expérimentale. Les résultats sont alors réintroduits dans l'équation de Bernoulli appliquée entre le point amont et un point aval des structures :

$$\frac{u_0^2}{2gh_0} \left(1 - \frac{h_0^2}{h_1^2} \right) + \left(1 - \frac{h_1}{h_0} \right) = \frac{\Delta h}{h_0}$$

Équation 6

Le modèle flexible a été résolu par l'ajout du paramètre de reconfiguration R dans l'équation de trainée en conservant $\alpha = -0.66$. Ce nombre permet de prendre en considération la réduction de trainée causée par la flexion des structures flexibles. Les paramètres K et ν ont été déterminés et semble atteindre un optimum pour $K = 0.90$ et $\nu = -0.29$. Les pertes de charge déterminées par le modèle offrent un niveau de corrélation qui semble satisfaisant. Un écart important entre les résultats du modèle et les résultats expérimentaux apparaît pour le point de pertes de charge la plus importante.

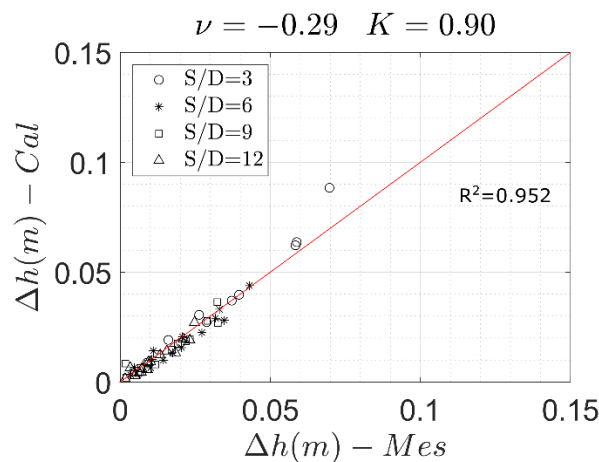


Figure 6 : Comparaison du modèle des pertes de charges avec reconfiguration par rapport aux mesures expérimentales.

3.3. Modèle basée sur la pente de frottement

Une autre approche consiste à transformer la force de trainée en une densité surfacique (τ_*) répartie sur une surface élémentaire autour de chaque tige. Cette transformation permet d'utiliser les méthodes de type courbe de remous pour calculer l'évolution de la hauteur d'eau à l'intérieur de la végétation. Afin d'être consistant avec les modèles de frottement utilisés dans les passes à macrorugosité [2], on définit la position des blocs à partir de l'écartement inter rangée dans le sens longitudinal (a_x) et transversal (a_y). Il vient alors les relations suivantes : $a_x = S\sqrt{2}$, $a_y = S$ et $C = \frac{D^2}{a_x a_y} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{D}{S}\right)^2$, où C est la densité spatiale. La méthode conduit donc à écrire :

$$\frac{1}{2} \rho_f C_d D h u^2 = \tau_* a_x a_y \quad \text{Équation 7}$$

De façon classique τ_* peut être obtenue par l'équation de quantité de mouvement et vaut $\tau_* = \rho_f g h S_f$ dans le cas infiniment large avec S_f le gradient hydraulique à déterminer. L'expression précédente devient :

$$C_d \frac{c}{gD} u^2 = 2 S_f = 2 \frac{-dH}{dx} \quad \text{Équation 8}$$

On retrouve alors l'expression permettant d'établir la relation hauteur-débit dans une passe à macrorugosité émergente [2]. Ici la pente de frottement remplace la pente géométrique utilisée en régime uniforme. L'équation 8 permet alors d'avoir une loi de frottement utilisable pour recalculer une courbe de remous dans la direction longitudinale. L'intégration de cette équation entre x et $x+a_x$ doit être égale à l'équation 6 pour une 1 seule rangée de cylindre. On retrouve ainsi la perte de charge entre les 2 sections avec une expression de Δh représentant le travail de la force de trainée. On peut noter que de façon similaire à la première méthode basée sur des bilans, on peut retrouver l'équation 8 en considérant non pas le principe fondamental mais le théorème de l'énergie cinétique.

Dans le cas de tiges longues et de faible densité, le modèle de passe à poissons donne des coefficients de trainée quasi constant quel que soit la hauteur d'eau. Ainsi l'équation 8 est cohérente avec les mesures donnant un coefficient de perte de charge ($C_d C/D$) ne dépendant que de la densité de tige et mais pas de la hauteur d'eau. De même la figure 4 indique un coefficient de perte de charge total qui varie de façon proportionnel avec le nombre de rangée ce qui est aussi le cas du modèle si on considère une faible variation de vitesse moyenne ($u_i/u_0 \sim 1$) lorsque l'on calcule la perte de charge totale ΔH par intégration de l'équation 8 sur chaque rangée (Equation 9) :

$$\Delta H = \frac{1}{2g} \sum_i^N C_d \frac{c}{D} u_i^2 = \frac{1}{2g} C_d \frac{c}{D} u_0^2 \sum_i^N \frac{u_i^2}{u_0^2} \quad \text{Équation 9}$$

D'où

$$\frac{\Delta H}{N} \approx \frac{1}{2g} C_d \frac{c}{D} u_0^2 \quad \text{Équation 10}$$

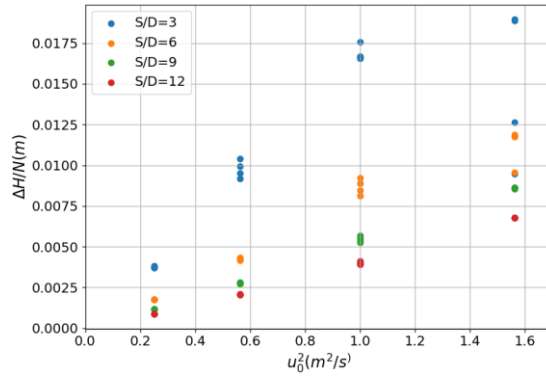


Figure 7 : Perte de charge par rangée calculée à partir du modèle de passes à poissons pour les configurations expérimentales.

La figure 7 montre bien une évolution quasi linéaire de la perte de charge par rangée en fonction de l'énergie cinétique. Cependant la dispersion due à la variation de la vitesse moyenne par rangée implique des écarts empêchant une bonne prédiction.

Le principal avantage de cette approche est de pouvoir prendre en compte le cas de tige submergée suite à leur flexion. En effet, le modèle de passe à poisson permet de calculer la modification du profil de vitesse dans l'équation 8. La force due au frottement turbulent au sommet des tiges est alors ajoutée au bilan et redistribuée avec la traînée sur le fond dans l'équation 7. Dans cette première étude, le couplage complet entre l'écoulement et la flexion de la tige n'est pas réalisé. On va supposer une flexion proche de celle observée afin de montrer l'influence possible de l'écoulement au-dessus des tiges. D'après la figure 3, un abaissement de la première de tige de 5 cm va être testée avec 2 configurations limites :

- configuration 1 : toutes les tiges sont abaissées de 5cm
- configuration 2 : la dernière tige est supposée émergente et l'évolution entre les 2 est linéaire comme le montre la figure 8.

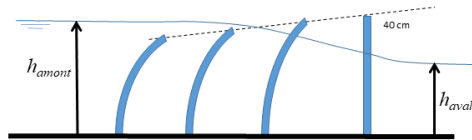


Figure 8 : schéma des hypothèses sur la flexion des tiges.

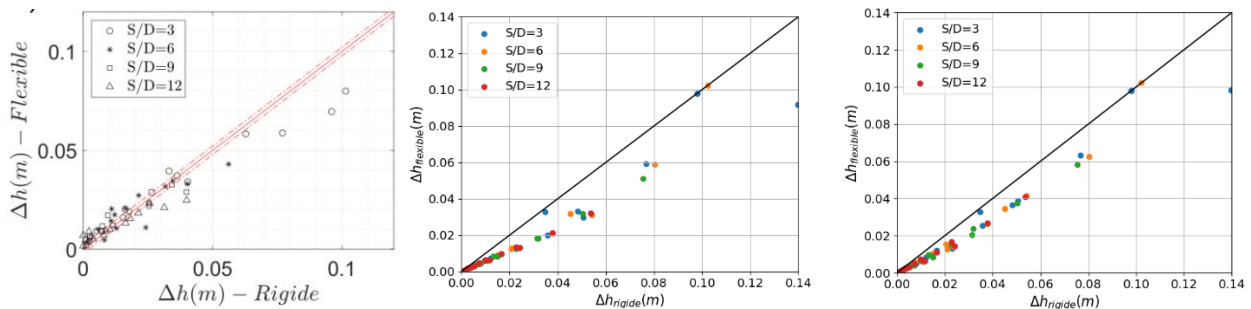


Figure 9 : Comparaison des pertes de charges expérimentales, avec la configuration 1, la configuration 2 par rapport aux pertes de charges avec des tiges rigides [4].

On observe sur la figure 9 que quelle que soit la configuration testée, le passage d'un écoulement au-dessus des tiges diminue la perte de charge dans des ordres de grandeurs proches de ceux mesurées. Cela semble indiquer que l'ajustement des constantes du paramètre de reconfigurations prennent implicitement en compte ce phénomène.

4. Conclusion

Les pertes de charge causées par la présence d'un faisceau de structures flexibles ont été étudiées. Les essais ont impliqué l'étude de 3 paramètres, la vitesse d'écoulement, le nombre de rangées implantées et la densité d'implantation. Les résultats expérimentaux ont mené à l'analyse des pertes de charge et du coefficient de pertes de charge en fonction de ces paramètres. On remarque que les coefficients de pertes de charge ont tendance à évoluer linéairement par rapport au nombre de rangées.

Les résultats ont permis d'élaborer des modèles empiriques qui caractérisent la perte de charge en connectant, les nombres de Cauchy, la densité des tiges, le nombre de rangées, les caractéristiques intrinsèques de la canopée et la nature des écoulements.

Remerciements

Ce travail est supporté par le Groupement d'Intérêt Scientifique HED2 : "Hydraulique pour l'Environnement et le Développement Durable"

Références

- [1] Blevins R. D. Applied fluid dynamics handbook. Florida, USA, Krieger publishing company. 1984
- [2] Cassan L. and Laurens P. Design of emergent and submerged rock-ramp fish passes. Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst., (417) :45, 2016.
- [3] Chagot, L., Moulin, F.Y. & Eiff, O. Towards converged statistics in three-dimensional canopy-dominated flows. Exp Fluids 61, 24. 2020
- [4] Larrieu T., Étude numérique et expérimentale des structures flexibles au sein d'écoulements turbulents. Thèse de doctorat. l'Université de Poitiers. 2022
- [5] Nepf H. M. (1999). Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. WATER
- [6] Nepf H. M. (2012). Flow and Transport in Regions with Aquatic Vegetation. Annual Review of Fluid Mechanics, 129-134.