

PARTIE II. Etude du taux de cisaillement en réseau d'assainissement unitaire

CHAPITRE 1. Introduction

La majeure partie des particules érodées dans le réseau par temps de pluie, dans le Marais, provient d'une couche organique située à l'interface eau-sédiment (Ahyerre, 1999). Le taux de cisaillement est un critère pertinent pour comprendre les phénomènes de sédimentation et d'érosion des dépôts. Dans le cadre de notre étude, l'évaluation du taux de cisaillement en réseau d'assainissement unitaire doit permettre de mieux comprendre, et à long terme de modéliser, le comportement dynamique de la couche organique.

Les méthodes d'évaluation du taux de cisaillement en égout sont généralement basées sur l'hypothèse d'un écoulement permanent uniforme, ce qui permet d'estimer le taux de cisaillement à partir de mesures relativement simples à réaliser. En effet, les conditions de travail en égouts sont particulièrement dures et les méthodes de laboratoire destinées à évaluer le taux de cisaillement sont difficiles à mettre en œuvre dans des écoulements qui transportent des quantités importantes de MES mais également de gros éléments (papiers, sacs plastiques, etc.) qui perturbent les mesures.

Cependant les incertitudes liées à l'application de ces méthodes pour estimer le taux de cisaillement sont importantes car l'écoulement n'est jamais parfaitement permanent à cause de la variabilité des arrivées latérales, même durant les périodes de temps sec, et l'écoulement n'est jamais réellement uniforme à cause des irrégularités géométriques liées notamment à la pente des collecteurs ou à la présence de dépôts.

L'objectif de ce chapitre est de choisir une méthode d'évaluation du taux de cisaillement qui soit précise et simple d'utilisation. Cette méthode sera appliquée pour définir les critères liés au comportement de la couche organique (constitution, érosion) dans la suite de notre étude.

Nous avons donc testé différentes méthodes pour évaluer le taux de cisaillement local et moyen dans trois collecteurs situés dans le bassin versant du Marais. Dans un premier temps, des expériences ont eu lieu dans les meilleures conditions possibles (temps sec, absence de dépôt) afin de faciliter la comparaison entre les méthodes. Puis, dans un second temps, nous avons réalisé des expériences dans des collecteurs avec du dépôt pour étudier l'influence des reliefs sur le taux de cisaillement.

CHAPITRE 2. Etude bibliographique

1. Ecoulement en régime uniforme permanent

L'écoulement des eaux usées dans le réseau d'assainissement parisien est un écoulement gravitaire. Durant le temps sec, l'écoulement se fait dans la cunette des collecteurs du réseau d'assainissement (cf. Figure II-1) et on peut alors considérer que les collecteurs se comportent comme des canaux à surface libre.

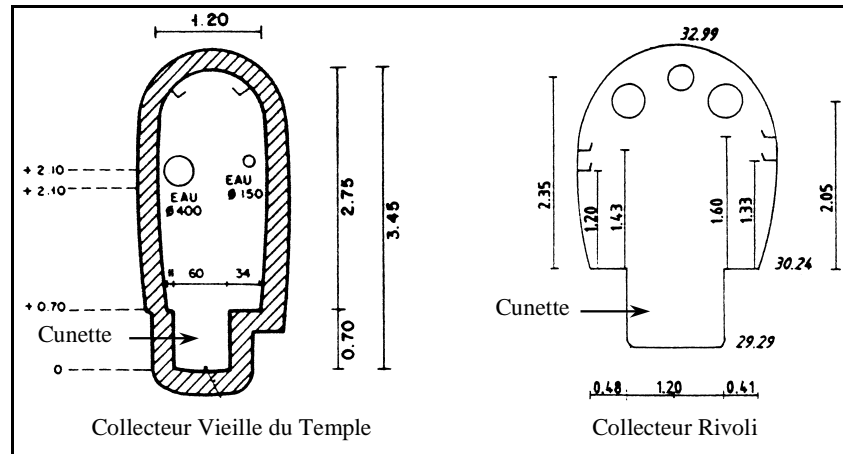


Figure II-1- Exemples de collecteurs dans le réseau d'assainissement du Marais

Le fluide qui s'écoule (de l'eau usée chargée en MES) est assimilable à un fluide newtonien incompressible. La dynamique de l'écoulement est alors décrite par les équations de Navier-Stokes. Dans le cas des écoulements à surface libre, unidirectionnels et graduellement variés, les équations de Navier-Stokes se simplifient en équations de Saint-Venant.

1.1. Equations de Saint-Venant

Les équations de Saint-Venant pour un écoulement unidirectionnel non-permanent et non-uniforme sur un tronçon à faible pente ($J \ll 1$) sont de la forme :

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + g \cdot S \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot S \cdot (J - J_e) \end{cases} \quad \text{Équation II-1}$$

avec J : pente du fond ; S : section de l'écoulement ; Q : débit ; J_e : pente énergétique ; h : hauteur d'eau.

1.1.1. Ecoulement permanent

Pour le cas du temps sec, Gromaire (1998) a pu observer une variabilité horaire des débits à l'exutoire du bassin versant du Marais. Nous avons cependant considéré l'écoulement comme permanent sur des intervalles de temps courts (de l'ordre de 30 minutes).

Dans cette situation (écoulement permanent non-uniforme) les équations de Saint-Venant précédentes se simplifient ainsi (cf. Equation II-2) :

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + g.S. \frac{\partial h}{\partial x} = g.S.(J - J_e) \end{cases} \quad \text{Équation II-2}$$

1.1.2. Ecoulement permanent uniforme

Dans les collecteurs des réseaux d'assainissement on peut observer des changements de pente liés à un changement de pente du radier et à la présence de dépôts grossiers (cf. Figure II-2). Nous avons cependant considéré que l'écoulement possède un comportement uniforme par petits tronçons (de l'ordre de 15 mètres).

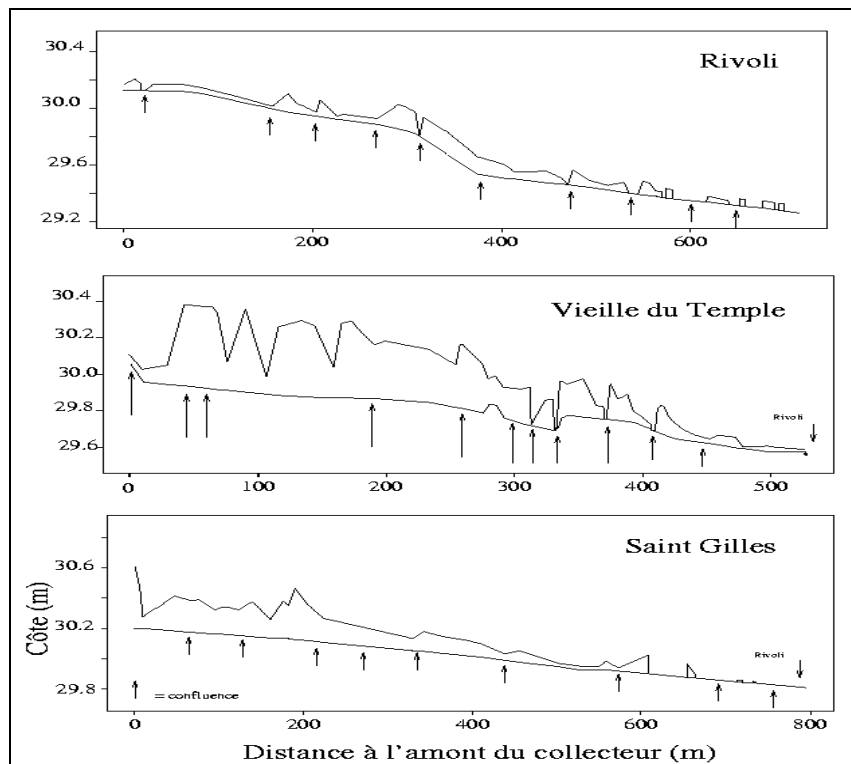


Figure II-2 - Exemples de profils de collecteurs dans les collecteurs du Marais (Ahyerre,1999)

Dans le cas du régime permanent et uniforme, les équations de Saint-Venant se simplifient encore (cf. Equation II-3).

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ J = J_e \end{cases} \quad \text{Équation II-3}$$

La pente énergétique J_e peut être déterminée au moyen de formules du type Weisbach-Darcy, Chézy ou encore Manning-Strickler. Ces formules ne sont strictement valables que pour les écoulements permanents uniformes mais il est en général admis qu'elles sont applicables pour des écoulements non permanents ou non uniformes (Graf & Altinakar, 1996).

- Formule de Weisbach-Darcy (ou encore, équation de Blasius) :

$$J_e = \lambda \frac{1}{4R_h} \frac{U^2}{2g} \quad \text{Équation II-4}$$

avec λ : coefficient de frottement ; U : vitesse moyenne de l'écoulement ; R_h : rayon hydraulique

- Formule de Chezy :

$$J_e = \frac{8g}{C^2} \frac{1}{4R_h} \frac{U^2}{2g} = \frac{1}{C^2} \frac{U^2}{R_h} \quad \text{Équation II-5}$$

avec C : coefficient de Chézy

- Formule de Manning-Strickler :

$$J_e = \frac{1}{K_s^2} \frac{U^2}{R_h^{4/3}} \quad \text{Équation II-6}$$

avec K_s : coefficient de Manning-Strickler

Toutes ces formulations font appel à une représentation de la rugosité du canal grâce au coefficient de frottement λ ou encore au coefficient C ou K_s .

1.2. Structure verticale de l'écoulement

Les parois des collecteurs constituent la limite physique des écoulements : l'écoulement se fait avec une certaine vitesse moyenne mais la vitesse d'écoulement est nulle contre les parois (condition d'adhérence). L'interface entre l'écoulement et les parois est appelée couche limite ou sous-couche visqueuse ou encore couche laminaire. On considère que la hauteur de la couche laminaire δ est de l'ordre de $\delta \geq 2 k_s$ (avec k_s : la rugosité de la paroi). Dans cette couche mince (quelques millimètres), on observe une diminution rapide de la vitesse.

La couche laminaire a une influence sur le frottement de l'écoulement sur la paroi qui est représentée par le coefficient de frottement.

1.3. Les courants secondaires

Dans les écoulements qui ont un rapport largeur sur hauteur faible (rapport inférieur à 5), des phénomènes de re-circulations ont lieu dans la section d'écoulement. On les appelle courants secondaires. Ils influent sur la répartition des vitesses : en présence de courants secondaires, la vitesse maximale ne se manifeste pas à la surface de l'écoulement mais au dessous de la surface libre (à environ 3/4 de la hauteur d'eau).

Ces courants sont générés par la turbulence et le frottement sur les parois. D'après Viollet *et al.* (1996) on distingue deux types de courants secondaires. Le plus facilement observable est causé par le changement de direction de l'écoulement dans les coudes. Le second, d'intensité plus faible, existe en écoulement uniforme et trouve son moteur dans la structure de la turbulence. Il se décompose de manière symétrique dans la section d'écoulement (cf. Figure II-3) et on peut observer, selon McLelland *et al.* (1999), deux cellules de circulation : un grand vortex au niveau de la surface libre et un de taille plus réduite près du fond.

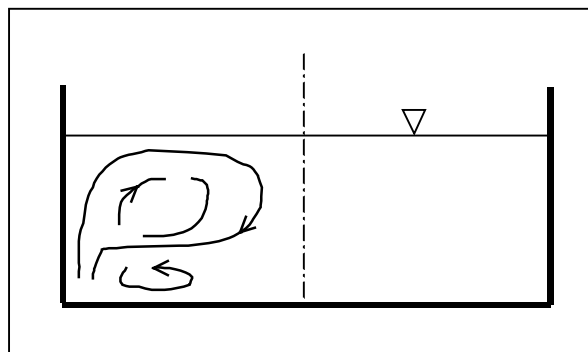


Figure II-3 - Structure des écoulements secondaires (Viollet *et al.*,1998)

McLelland *et al.* (1999) ont mené des expériences sur un matériau faiblement bi-modal ($d_A = 0,812 \text{ mm}$; $d_B = 1,78 \text{ mm}$), obtenu en mélangeant un sable et un gravier. Un écoulement turbulent a été appliqué au-dessus du matériau, dans un canal circulaire, avec un rapport largeur sur hauteur égal à 3. Les auteurs ont observé que les courants secondaires généraient une perturbation au niveau de la distribution du taux de cisaillement dans la section d'écoulement. En effet, durant ces expériences, une partie des sédiments fins sont transportés latéralement par le courant secondaire, à partir des zones à fort cisaillement, et se déposent dans les zones de faible cisaillement. Ils observent ainsi la formation de sillons alternés contenant plus ou moins de fines. Ces sillons se forment suivant les axes de rotation des vortex et la profondeur des sillons est d'environ 1 mm.

Huygens *et al.* (1997) ont observé les effets des courants secondaires sur des dépôts partiellement cohésifs (mélanges de sable et de kaolinite ou de montmorillonite) en canal circulaire. Le rapport largeur sur hauteur est environ égal à 3,7. Des courants secondaires sont

généérés par l'interaction des dépôts et des parois du canal. Ils se traduisent par la formation de dunes et de creux qui augmentent la rugosité du dépôt et entraînent ainsi un cisaillement plus important : à la résistance des particules du dépôt s'ajoute la résistance liée au relief du dépôt. De plus, ces courants donnent naissance à des « erosion spots » sur les parties exposées (dunes, creux) qui se propagent le long du canal.

Nous pouvons donc supposer que les courants secondaires vont avoir une influence sur les caractéristiques hydrauliques (répartition des vitesses, contraintes de cisaillement) dans le cas des petits collecteurs dont l'écoulement présente un faible rapport largeur sur hauteur.

2. Contrainte de cisaillement à la paroi

L'action d'un écoulement sur une paroi est caractérisée par la contrainte de cisaillement à la paroi τ_0 . Elle exprime la force de frottement agissant tangentiellement sur la paroi, par unité de surface.

2.1. Coefficient de frottement

Le coefficient de frottement λ est fonction du nombre de Reynolds, de la hauteur des aspérités k_s (rugosité) et du diamètre hydraulique D_h .

Dans le cas d'une couche laminaire développée, c'est le nombre de Reynolds qui va déterminer le coefficient de frottement (cf. Figure II-4). Dans le cas où la couche laminaire disparaît, c'est la rugosité qui devient le paramètre déterminant pour le frottement.

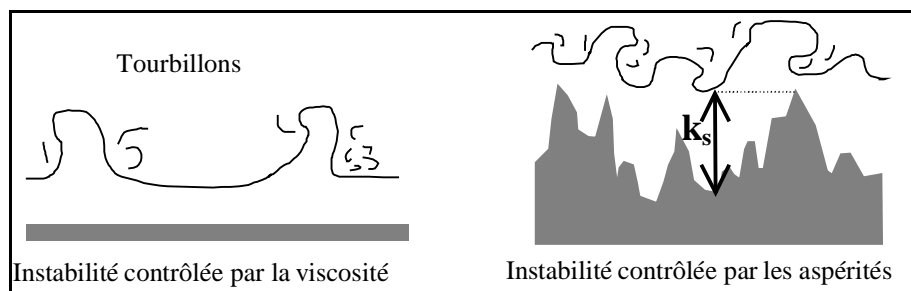


Figure II-4 - Influence de la rugosité sur la couche laminaire

La formation de la couche laminaire est liée à la rugosité des parois. Dans un écoulement turbulent, une rugosité importante amène à la disparition de la couche laminaire car celle-ci ne peut se développer. On distingue ainsi les écoulements turbulents « lisses » où la couche laminaire peut se former et les écoulements turbulents « rugueux » où la couche laminaire ne peut pas se former. Pour les écoulements permanents uniformes, la distinction lisse / rugueux se fait à partir du nombre de Reynolds « de grain » ou « particulière » :

$$Re^* = \frac{u^* \cdot k_s}{\nu} \quad \text{Équation II-7}$$

avec u^* : la vitesse de cisaillement ; ν : viscosité cinématique.

On définit alors les différents régimes d'écoulement :

- lorsque $Re^* < 5$, on est en régime turbulent lisse
- lorsque $Re^* > 70$, on est en régime turbulent rugueux,
- lorsque $5 < Re^* < 70$, on est en régime turbulent de transition.

Dans le cas d'un écoulement turbulent lisse, on utilise les relations de Weisbach-Darcy (Equation II-4) pour déterminer la pente d'énergie J_e . Le coefficient de frottement λ peut alors être déterminé en utilisant la formule de Colebrook (cf. Equation II-8) :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s / D_h}{3,7} \right) \quad \text{Équation II-8}$$

Dans le cas des écoulements turbulent rugueux on considère les relations de Chézy (Equation II-5) ou de Manning-Strickler (Equation II-6) pour déterminer la pente d'énergie J_e .

- Dans le cas de canaux naturels aux parois en granulat non-cohésif, on peut utiliser la relation de Strickler (cf. Equation II-9) basée sur un diamètre représentatif des granulats (d_{50} ou d_{90}) pour déterminer le coefficient de Manning-Strickler K_s :

$$K_s = \frac{21,1}{d_{50}^{1/6}} \quad \text{ou} \quad K_s = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \quad \text{Équation II-9}$$

- Si le fond et les parois ne sont pas de même nature, on peut utiliser par exemple l'expression de Meyer-Peter (cf. Equation II-10) pour le calcul du coefficient de Strickler pour la section d'écoulement (Viollet *et al.*, 1998) :

$$\frac{\chi}{K_s^2} = \frac{\chi_{paroi}}{K_{s\ paroi}^2} + \frac{\chi_{fond}}{K_{s\ fond}^2} \quad \text{Équation II-10}$$

avec χ : périmètre mouillé (m)

Des ordres de grandeur de K_s sont donnés par Viollet *et al.* (1998) :

- $K_s = 70$ à $80 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ pour des fonds revêtus
- $K_s = 30$ à $50 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ pour des fonds naturels
- $K_s = 10$ à $30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ pour des fonds encombrés

2.2. Contrainte de cisaillement à la paroi

Trois méthodes ont été identifiées pour évaluer le taux de cisaillement, dans le cas d'un régime permanent uniforme. Deux d'entre elles permettent d'évaluer le taux de cisaillement local à partir de la distribution de Reynolds et de la distribution logarithmique des vitesses. La troisième méthode permet de calculer le cisaillement moyen sur un tronçon de collecteur.

2.2.1. Contrainte de cisaillement, loi de Reynolds

La contrainte de cisaillement se décompose classiquement en taux de cisaillement laminaire τ_{lam} et en taux de cisaillement turbulent τ_{turb} (encore appelé « tension de Reynolds ») suivant l'Equation II-11 (Yalin,1977) :

$$\tau(z) = \tau_{turb}(z) + \tau_{lam}(z) = -\overline{\rho u'(z)w'(z)} + \mu \frac{d\bar{u}(z)}{dz} \quad \text{Équation II-11}$$

avec ρ : la masse volumique du fluide ; μ : la viscosité dynamique.

L'expression $\overline{u'(z)w'(z)}$ représente la covariance des composantes du vecteur vitesse : $u(z)$ (composante tangentielle) et $w(z)$ (composante verticale) (cf. Figure II-5).

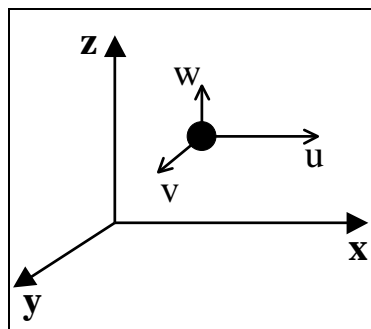


Figure II-5 – Composantes de la vitesse dans l'espace

On définit la vitesse de frottement (ou vitesse de cisaillement) u^* suivant l'Equation II-12 :

$$\tau = \rho u^{*2} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad \text{Équation II-12}$$

Et le taux de cisaillement au fond τ_0 est estimé avec l'Equation II-13 :

$$\tau_0 = \rho u^{*2} \quad \text{Équation II-13}$$

La répartition du taux de cisaillement en régime permanent uniforme turbulent est donnée sur la Figure II-6. Au-dessus de la hauteur de la couche laminaire δ , la contrainte de cisaillement est pratiquement égale à τ_{turb} et au-dessous de δ , la contrainte de cisaillement est presque égale à τ_{lam} .

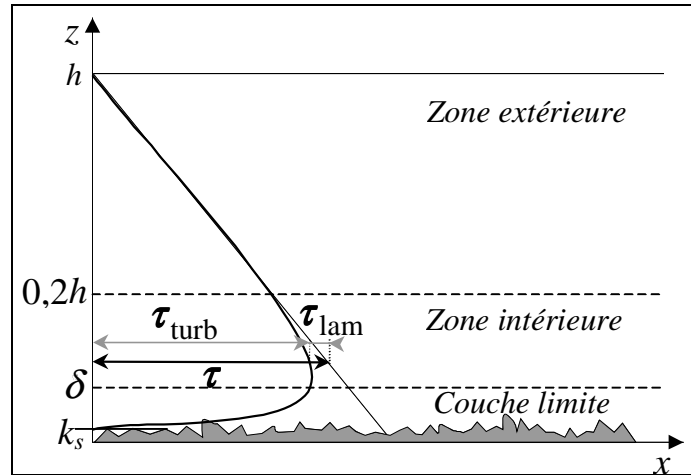


Figure II-6 - Répartition des contraintes de cisaillement avec la profondeur (Yalin,1977)

2.2.2. Contrainte de cisaillement, distribution logarithmique des vitesses

En écoulement permanent uniforme, la répartition des vitesses répond à une relation logarithmique (cf. Equation II-14) :

$$\frac{u(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + B_s \quad \text{Équation II-14}$$

avec k : la constante de Von Karman ($k = 0.41$); k_s : la rugosité ; B_s : dépend du régime de l'écoulement défini par le nombre de Reynolds de grain Re^* (cf. Tableau II-1).

- $Re^* < 5$, écoulement turbulent lisse :	$B_s = 2.5 \ln\left(\frac{u^* k_s}{\nu}\right) + 5.5$
- $5 < Re^* < 7.1$, écoulement transition I :	$B_s = 1.52 \ln\left(\frac{u^* k_s}{\nu}\right) + 6.6$
- $7.1 < Re^* < 14.1$, écoulement transition II :	$B_s = 9.6$
- $14.1 < Re^* < 70$, écoulement transition III :	$B_s = 11.5 - 0.70 \ln\left(\frac{u^* k_s}{\nu}\right)$
- $Re^* > 70$, écoulement turbulent rugueux :	$B_s = 8.5$

Tableau II-1 – Valeurs de B_s pour les différents types d'écoulement (Yalin, 1977 ; Hollingshead et Rajaratnam, 1980)

Cette loi est valable dans la zone intérieure où : $0,01 < z/h < 0,2$. Selon (Graf et Altinakar, 1996), dans un écoulement à deux dimensions, la loi logarithmique peut être étendue à toute la colonne d'eau h quand on ne recherche pas une grande précision dans les calculs. Le taux de cisaillement au fond est déduit à partir de la valeur de u^* en utilisant l'Equation II-13.

2.2.3. Contrainte de cisaillement, équation de mouvement

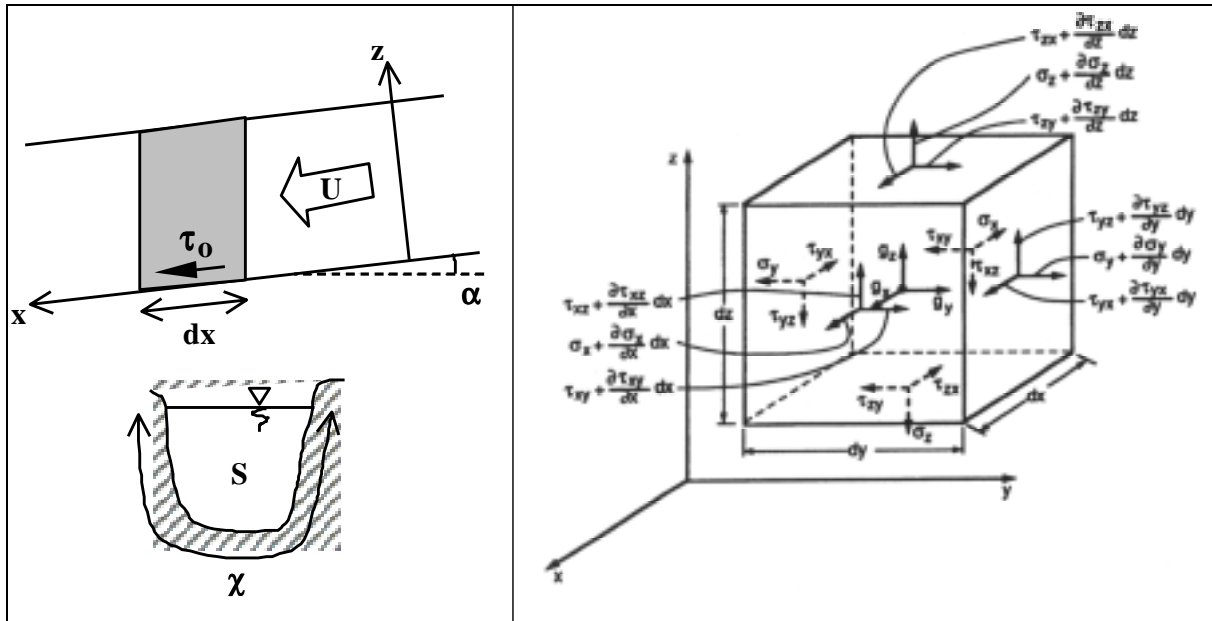


Figure II-7 - Canal prismatique (schéma) et contraintes de surface appliquées sur un élément de fluide (Julien, 1998).

Dans un canal prismatique (cf. Figure II-7), en régime permanent uniforme, les équations de mouvement dans la direction de l'écoulement (axe x) et dans la direction verticale (axe z) peuvent s'écrire sous la forme simplifiée suivante (Julien, 1998):

$$g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} \right) = g_x + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad \text{Équation II-15.a}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{U^2}{2} \right) = g_z + u \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \quad \text{Equation II-15.b}$$

Les hypothèses simplificatrices sont les suivantes :

- les composantes du cisaillement selon xx, yx, yz, zz sont négligeables
- les composantes de la vitesse suivant y et z sont négligeables devant la composante selon x (soit $v \ll u$ et $w \ll u$) et donc u est égal à la vitesse totale de l'écoulement

En considérant une répartition hydrostatique des pressions (soit $\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = 0$), l'équation II-15.b

peut être intégrée sur la hauteur d'eau h et on obtient :

$$P = \rho \cdot g \cdot (h - z) \cos \alpha \quad \text{avec} \quad g_z = -g \cdot \cos \alpha$$

Le taux de cisaillement est obtenu en intégrant l'équation II-15.a, en considérant la vitesse u et la pression P constantes le long de l'écoulement :

$$\tau_{zx}(z) = \rho \cdot g \cdot (h - z) \sin \alpha$$

Le taux de cisaillement au fond s'écrit généralement sous la forme :

$$\tau_o = \rho g \cdot R_h \cdot J \quad \text{Équation II-16}$$

avec R_h le rayon hydraulique et en considérant que la pente du fond J est suffisamment faible ($J \ll 1$) pour écrire : $\sin \alpha = \alpha = J$.

2.3. Evaluation du taux de cisaillement en réseaux d'assainissement

Les trois méthodes identifiées ci-dessus sont utilisées pour évaluer le taux de cisaillement en réseau d'assainissement.

2.3.1. Loi de Reynolds

L'application de la méthode de Reynolds implique une mesure des champs de vitesse très précise, suivant les trois composantes de l'espace (x, y, z).

Ahyerre (1999) a utilisé un Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) pour réaliser ce type de mesures au cours d'expériences d'augmentations de débit en réseau d'assainissement. Cependant cet appareil ne peut pas être utilisé en mesure de routine car il requiert un entretien difficile à mettre en œuvre de manière autonome.

2.3.2. Distribution logarithmique des vitesses

La méthode basée sur la distribution logarithmique des vitesses est fréquemment employée en réseau d'assainissement car les mesures nécessaires peuvent être obtenues avec des appareils simples comme le micro-moulinet ou le vélocimètre. Ashley *et al.*(1994), Ahyerre (1999), Jaumouillie *et al.* (2001) ont utilisé cette méthode pour étudier précisément l'hydraulique de quelques sites.

Elle est également à la base de certains modèles hydrauliques qui évaluent la contrainte de cisaillement au fond, par exemple dans le module Engelund-Hansen de MOUSE-TRAP.

2.3.3. Equation de mouvement

L'équation de mouvement est à la base des méthodes les plus largement utilisées pour estimer le taux de cisaillement en égout dans les modèles hydrauliques du type STSim ou Canoe.

Les mesures nécessaires à l'application de cette méthode (hauteur d'eau, vitesse moyenne) peuvent être obtenues à partir de mesures de routine :

a) mesure de la vitesse moyenne dans la section et de la hauteur d'eau sur un site

Les paramètres sont généralement mesurés simultanément sur un site grâce aux débitmètres que l'on trouve sur le marché et qui fonctionnent, par exemple, avec une sonde à effet Doppler pour la vitesse et un capteur de pression piézométrique pour la hauteur d'eau (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000).

On peut également se contenter d'une mesure de la hauteur d'eau, à condition qu'une loi hauteur-débit ait été déterminée sur le site de mesure. Cette loi permet de retrouver le débit et donc la vitesse d'écoulement à partir de la hauteur d'eau.

Ensuite, le taux de cisaillement au fond est déterminé à partir des relations de Darcy-Weisbach (Equation II-4) ou de Manning-Strickler (Equation II-6) qui sont valables pour les écoulements turbulents rugueux. Cette méthode est la plus fréquemment citée dans la littérature : Ashley *et al.* (1994), Laplace (1991), Hrissanthou et Hartmann (1998), Verbanck (1995), Jaumouillie *et al.* (2001).

b) mesure de la hauteur d'eau en deux points.

Ce système de mesure a été utilisé par Ristenpart et Uhl (1993) et McIlhatton (2001) : la pente de la surface de l'eau est déterminée grâce à deux sonars placés à 80 m l'un de l'autre. Le taux de cisaillement est ensuite déterminé par application directe de l'Equation II-16, en considérant que la pente de la surface de l'eau est égale à la pente d'énergie de l'écoulement.

c) à partir de la pente du radier.

La pente du radier peut être déterminée à partir des plans du réseau d'assainissement. Le taux de cisaillement est ensuite déterminé par application directe de l'Equation II-16, en considérant que la pente du radier ou la pente du (radier + sédiment) est égale à la pente d'énergie de l'écoulement.

2.3.4. Conclusion

On constate que les méthodes mises en œuvre dans les réseaux d'assainissement sont généralement les méthodes basées sur l'application de l'Equation II-16. En effet, cette méthode requiert des données qui peuvent être mesurées de façon routinière et relevées rapidement sur site ou à distance, par liaison modem par exemple.

Il faut préciser ici que les différentes méthodes décrites ci-dessus peuvent être divisées en deux catégories : les mesures destinées à l'étude d'un site particulier et les mesures destinées à alimenter une base de données utilisée dans les modèles hydrauliques. Les modèles hydrauliques destinés à reproduire le fonctionnement d'un réseau d'assainissement utilisent généralement des méthodes simples (généralement basées sur la relation de Manning-Strickler) pour estimer le cisaillement afin d'être efficaces au niveau du temps de calcul.

Cette nuance dans les objectifs de la mesure joue sur les choix méthodologiques mis en œuvre et permet d'expliquer la popularité des méthodes basées sur la pente du radier ou les mesures débitmétriques.

Dans notre étude sur l'interface eau-sédiment, nous allons avoir recours au taux de cisaillement qui est un critère permettant de prévoir la formation et l'érosion de dépôts dans le réseau. Nous avons donc décidé de tester les trois méthodes présentées (loi de Reynolds, profil logarithmique des vitesses et équation de mouvement) sur des sites sans dépôt et avec dépôt .

Cette étude comparative nous permettra de choisir une méthode d'évaluation du taux de cisaillement qui soit précise et simple d'utilisation. Cette méthode sera appliquée pour définir les critères liés au comportement de la couche organique (constitution, érosion) dans la suite de notre étude.

CHAPITRE 3. Expériences réalisées

1. Sites d'étude

1.1. Site en laboratoire

Nous avons testé le matériel utilisé au cours des expériences dans un canal mis à disposition par le Laboratoire d'Hydraulique de l'Université de Gent (cf. Figure II-8). Le canal utilisé a une longueur de 11m et une section rectangulaire de 70cm de largeur.



Figure II-8 – Canal hydraulique de Gent

Dans le canal de Gent nous avons validé notre appareillage en effectuant des mesures dans des conditions d'écoulement stables et bien définies. Le Tableau II-2 reprend la vitesse moyenne d'écoulement (U), la largeur du canal (b), la hauteur d'eau (h) et le nombre de Reynolds (Re) pour les expériences réalisées. Les mesures ont été réalisées dans la zone intérieure de l'écoulement, c'est-à-dire au-dessous de $0,2h$.

Expérience	Gent - 19/04/00	Gent - 18/04/00
U (m/s)	0.28	0.18
h (m)	0.34	0.34
b (m)	0.7	0.7
Re	48.3 E+3	31 E+3

Tableau II-2 – Caractéristiques des écoulements appliqués dans le canal de Gent

1.2. Sites en réseau d'assainissement

Les expériences menées pour évaluer le taux de cisaillement ont été réalisées dans le réseau d'assainissement du Marais, sur trois sites : le collecteur Vieille du Temple, le collecteur Saint-Gilles et le collecteur Rivoli.

1.2.1. Sites sans dépôt

Les tronçons choisis pour l'étude sans dépôt sont situés à l'aval du collecteur Vieille du Temple (pente 0.03%) et à l'aval du collecteur Rivoli (pente 0.09%). Les caractéristiques des écoulements sont différentes d'un site à l'autre : les hauteurs d'eau varient de 20 cm à 30 cm et la vitesse moyenne varie de 0.26 m/s à 0.89 m/s (cf. Tableau II-3).

De plus, les sites choisis diffèrent par leur section d'écoulement : sur le collecteur Vieille du Temple, la cunette (partie du collecteur où s'écoulent les eaux de temps sec) a une largeur de 60 cm et, sur le collecteur Rivoli, la cunette a une largeur de 120 cm. Ainsi, sur Rivoli l'écoulement peut être considéré comme étant bi-dimensionnel car le rapport largeur sur hauteur b/h varie entre 4 et 5 tandis que sur Vieille du Temple le rapport b/h vaut 3, ce qui laisse supposer l'existence de courants secondaires.

1.2.2. Sites avec dépôt

Des expériences ont également été menées dans deux tronçons de collecteur avec des sédiments sur le collecteur Saint-Gilles (pente 0.03%) et sur le collecteur Rivoli (pente 0.09%). Comme dans le cas des sites sans dépôt, les caractéristiques des écoulements varient d'un site à l'autre (cf. Tableau II-3) et les deux sites choisis présentent des rapports largeur sur hauteur $b/h = 3$.

Expérience	Sites sans dépôt			Sites avec dépôts	
	Rivoli (03/03/00)	Rivoli (15/03/00)	Vieille du Temple (29/03/00)	Saint-Gilles (22/08/00)	Rivoli (29/08/00)
U (m/s)	0.34	0.26	0.89	0.4	0.3
h (m)	0.30	0.24	0.20	0.29	0.39
b (m)	1.2	1.2	0.6	0.6	1.2
Re	68 E+3	44.6 E+3	96 E+3	59 E+3	70.9 E+3

Tableau II-3 – Caractéristiques des écoulement étudiés sur les sites sans et avec dépôt

2. Matériel et Méthodes

Nous avons décidé de tester sur site les trois méthodes de mesure suivantes :

- évaluation directe du taux de cisaillement local à partir de la loi de Reynolds,
- évaluation du taux de cisaillement local à partir de la distribution logarithmique des vitesses dans la section de l'écoulement (profils de vitesses),
- évaluation du taux de cisaillement moyen à partir de l'équation de mouvement (pente du fond et pente d'énergie).

Les mesures en réseau d'assainissement ont été réalisées l'après-midi afin de bénéficier d'un régime d'écoulement stable.

2.1. La distribution des tensions de Reynolds

L'ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) a été utilisé pour faire des mesures de vitesse ponctuelles afin d'en déduire le taux de cisaillement ponctuel à partir des tensions de Reynolds. A partir de ces données, nous avons pu observer la distribution du taux de cisaillement dans la partie basse des écoulements.

2.1.1. Matériel : Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

L'ADV est un appareil construit par la société Nortek As. Il est composé d'une sonde munie d'un émetteur acoustique et de trois récepteurs permettant une réception dans les trois directions de l'espace (cf. Figure II-9). Le pilotage de l'ADV est effectué à partir d'un ordinateur.

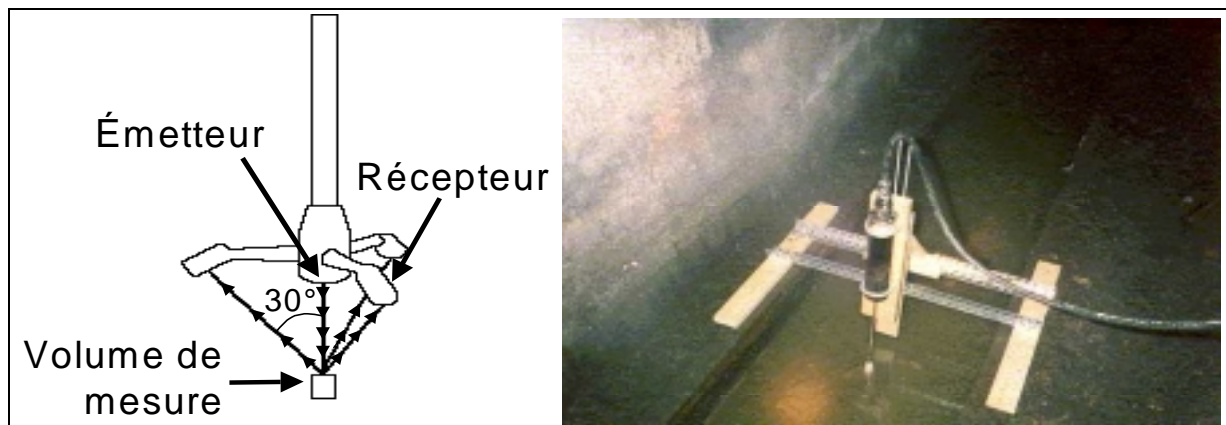


Figure II-9 – Schéma de l'ADV et ADV en place dans le collecteur Vieille du Temple

L'émetteur produit un signal acoustique court et périodique. Quand l'impulsion acoustique traverse la colonne d'eau, les matières en suspension ou les bulles d'air dispersent une fraction de l'énergie acoustique. Les récepteurs détectent l'écho acoustique provenant du volume de mesure à l'intersection des récepteurs et de l'émetteur. La fréquence de l'écho est

modifiée par effet Doppler, en fonction du déplacement relatif des particules dont on suppose qu'elles se déplacent à la vitesse de l'écoulement. Cette modification de fréquence, captée par les trois récepteurs, permet une détermination du vecteur vitesse : il est déterminé à partir des trois projections de la vitesse mesurées par les récepteurs et d'une matrice de transformation qui prend en compte la position géométrique des récepteurs et de l'émetteur.

Pour la mesure de vitesse en un point, les capteurs et l'émetteur sont complètement immergés. La sonde mesure la vitesse 11 cm sous l'émetteur de façon à ne pas perturber l'écoulement au point d'acquisition. Le volume de mesure est de 3 à 9 mm de long et de 6 mm de diamètre. Nous avons choisi de travailler à une fréquence de 25 Hz afin d'avoir des vecteurs représentatifs des composantes de la vitesse et de leurs variations dans le temps. Enfin, une sonde intégrée au capteur ADV permet de connaître la distance entre le point de mesure et le fond.

L'ADV permet d'obtenir beaucoup d'informations sur les évolutions du vecteur vitesse grâce à la fréquence des mesures réalisées. Cependant ce type de matériel est difficile à mettre en œuvre dans les collecteurs à cause de ses caractéristique techniques (mise en place dans le collecteur, commande à partir d'un PC) et des précautions à prendre : l'ADV demande une surveillance constante lors de son utilisation car les flottants et papiers qui s'accrochent dessus empêchent son bon fonctionnement. Il a donc besoin d'être souvent nettoyé manuellement (toutes les 15 minutes). De plus, il faut le manipuler avec beaucoup de précautions en évitant les chocs car les capteurs sont très sensibles. L'ADV ne peut donc pas être utilisé de manière permanente en égout mais ponctuellement. Nous avons choisi cet instrument comme « méthode de référence » pour nos expériences en réseau dans des tronçons sans dépôt.

2.1.2. Méthodologie

L'ADV permet d'obtenir l'enregistrement des vitesses dans les 3 directions (u , v , w) à une fréquence de 25Hz durant des périodes variant de 3 minutes à 5 minutes. Ces mesures ont été effectuées sur 6 à 20 hauteurs différentes z_i dans l'écoulement.

Pour chaque enregistrement, la partie turbulente du cisaillement a été calculée en utilisant l'Equation II-17 sur des pas de temps de 12 secondes (soit 300 mesures de vitesse):

$$\tau_{turb, j}(z_i) = -\rho \times \text{cov}(u_k(z_i), w_k(z_i)) \quad \text{Équation II-17}$$

avec $j - 150 \leq k \leq j + 150$

Cet intervalle de temps est un compromis entre la variabilité observée sur le taux de cisaillement et les limites expérimentales (Berry,2000). Il reste proche des données

bibliographiques : Song (1995) a utilisé des pas de temps de 4 secondes avec des mesures réalisées à 60Hz en laboratoire, Ahyerre (1999) a choisi un intervalle de temps de 10 secondes avec des mesures réalisées à 25Hz en égouts et Saadi (2000) a précisé, à partir d'une étude statistique, que les traitements de données ADV devaient être réalisés à partir d'enregistrements sur 4 minutes à 25 Hz pour avoir une bonne précision sur le taux de cisaillement. A partir de ces résultats, la valeur moyenne du cisaillement turbulent sur la période d'enregistrement a été calculée pour chaque point de mesure z_i :

$$\tau_{turb}(z_i) = \frac{\sum \tau_{turb,j}}{j}$$

La partie laminaire du taux de cisaillement a été évaluée pour chaque point de mesure z_i à l'aide de la relation suivante (cf. Equation II-11):

$$\tau_{lam}(z_i) = \mu \frac{d\bar{u}(z_i)}{dz}$$

Afin de déterminer le terme dérivé $\frac{d\bar{u}(z_i)}{dz}$, nous avons ajusté une régression linéaire sur les mesures expérimentales $u(z_i)$ en fonction de $\ln(z_i)$ avec la méthode des moindres carrés. Finalement, nous avons ajusté la distribution linéaire $\tau(z) = \rho u^{*2} (1 - \frac{z}{h})$ à la somme $\tau(z_i) = \tau_{turb}(z_i) + \tau_{lam}(z_i)$ avec la méthode des moindres carrés afin de pouvoir déterminer le taux de cisaillement au fond.

2.2. La distribution logarithmique des vitesses

Nous avons choisi d'utiliser un micro-moulinet pour mesurer la vitesse de l'écoulement à différentes hauteurs dans la section. A partir des profils de vitesse mesurés nous avons effectué un calage de la distribution logarithmique des vitesses théorique pour déterminer le taux de cisaillement au fond.

2.2.1. Matériel : micro-moulinet

La mesure de la vitesse ponctuelle a été effectuée au moyen d'un moulinet OTT C2 prévu pour la mesure de vitesse de l'eau dans de faibles profondeurs. La mesure est intégrée sur un pas de temps de 30 secondes. La vitesse est calculée directement à partir d'une formule résultant d'un étalonnage en canal :

$$\bar{u} = 0,00587 \times n + 0.019$$

avec n : nombre de tours par seconde ; \bar{u} : la vitesse en m/s.

L'incertitude sur la mesure ponctuelle donnée par le fabricant vaut : $\Delta \bar{u} / \bar{u} = 1\%$. Enfin, les mesures ne sont possibles qu'à partir de $z = 3$ cm car l'hélice a un diamètre de 5 cm.

Pour l'étude en réseau avec dépôts, nous avons utilisé un vélocimètre électromagnétique qui remplit les mêmes fonctions que le micro-moulinet et qui permet une lecture directe de la valeur.

2.2.2. Méthodologie

Pour chaque expérience, $\bar{u}(z_i)$ a été mesurée avec le micro-moulinet sur 6 à 20 points le long de l'axe z . Pour tous les profils de vitesse, la vitesse de cisaillement u^* est déterminée en faisant une régression linéaire à partir des vitesses mesurées et de $\ln(z)$.

$$\bar{u}(z) = A \ln(z) + B$$

$$\text{où : } A = \frac{u^*}{k} \quad \text{et} \quad B = u^* \left(B_s - \frac{1}{k} \ln k_s \right)$$

On déduit u^* à partir du terme A . Le terme B donne des informations concernant le régime d'écoulement. Pour chaque régime, B_s est remplacé par l'équation correspondante (cf. Tableau II-1) et ainsi k_s peut être estimé. Le calcul de Re^* permet de déterminer le type de régime d'écoulement. Enfin, le taux de cisaillement est déterminé à partir de l'Equation II-13.

2.3. Evaluation à partir de l'équation de mouvement

Nous avons calculé τ_0 à partir de l'Equation II-15 en utilisant tour à tour la pente du fond et la pente d'énergie pour le collecteur Rivoli.

2.3.1. A partir de la pente du radier

Les données issues des relevés topographiques réalisés dans le Marais en 1995 ont servi à évaluer la pente du radier J pour déterminer le taux de cisaillement suivant l'Equation II-16.

2.3.2. A partir de la pente d'énergie

La pente d'énergie Je a été estimée à partir de deux méthodes suivantes :

- avec l'équation de Weisbach-Darcy en considérant le coefficient de frottement calculé à partir de la formule de Colebrook simplifiée (Graf et Altinakar, 1996) (cf. Equation II-18)

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = 2.03 \text{Log}(Re \cdot \sqrt{\lambda}) + 0.32 \quad \text{Équation II-18}$$

- avec la formule de Manning (Graf et Altinakar, 1996) avec un coefficient de Strickler $K_s = 80$, ce qui correspond à un béton « lisse ».

CHAPITRE 4. Résultats

1. Analyse du matériel utilisé

1.1. Comparaison des résultats obtenus suivant le matériel utilisé

Nous avons tout d'abord comparé les données obtenues en terme de vitesses, à l'aide de la méthode du profil logarithmique des vitesses. Les résultats obtenus dans le canal de Gent (cf. Figure II-10) montrent que l'ADV et le micro-moulinet sont équivalents pour la mesure des vitesses car les données et les profils théoriques ajustés sont très proches. Sur les hauteurs où les profils ajustés se recouvrent (entre $z/h = 0,15$ et $z/h = 0,25$) on observe un écart relatif sur les vitesses de 1 % entre les deux appareils. Le taux de cisaillement déduit des profils logarithmiques obtenus avec le micro-moulinet et l'ADV vaut $0,14 \text{ N/m}^2$.

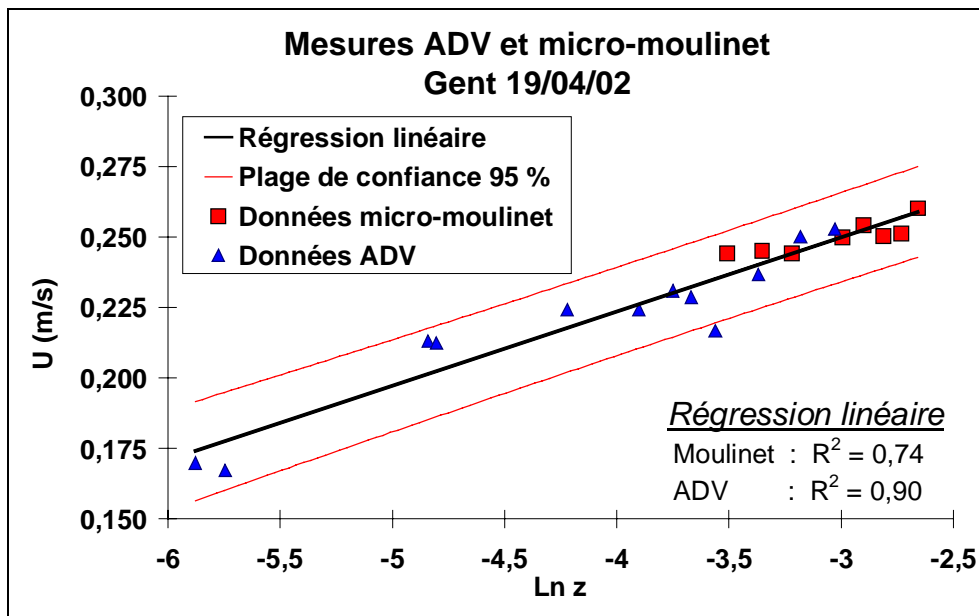


Figure II-10– Résultats obtenus dans le canal de Gent

Nous avons ensuite étudié le taux de cisaillement avec la méthode de Reynolds. L'application de la méthode de Reynolds a permis d'estimer le taux de cisaillement au fond à $0,13 \text{ N/m}^2$. Des fluctuations importantes du cisaillement ont été observées dans la zone $z/h < 0,15$. Comme l'écoulement dans le canal est un écoulement contrôlé nous pensons que la dispersion des valeurs du cisaillement peut être attribuée à des phénomènes de turbulence près du fond ou à une perturbation du signal par les échos du fond.

Ces expériences nous ont permis de montrer que l'emploi de ces différents matériels de mesure donne des résultats similaires, malgré la dispersion des mesures très près du fond.

Nous avons également réalisé une étude sur la variabilité du taux de cisaillement à la paroi dans le canal : des profils au micro-moulinet ont été mesurés au milieu de la section et au quart de la section, dans trois sections espacées d'environ 2 m. Les résultats sont présentés dans le Tableau II-4. On constate que le taux de cisaillement ponctuel ne varie quasiment pas sur les 6 points étudiés. Les courants secondaires, dans le canal de Gent, ne semblent pas avoir d'influence dans la zone étudiée malgré un rapport b/h inférieur à 3,5 .

Repère	largeur / 2	largeur / 4
9,05m	0,06	0,06
7,5m	0,06	0,07
5,5m	0,06	0,06

Tableau II-4 – Valeurs du taux de cisaillement (en N/m^2) en différentes sections (expérience du 18/04/00 à Gent)

Les résultats obtenus dans le canal de Gent vont servir de référence pour les expériences que nous avons réalisées dans le réseau d'assainissement.

1.2. Incertitudes associées aux matériels utilisés

Les incertitudes associées à la mesure sont de plusieurs types : incertitudes liées à l'appareil, incertitudes sur le positionnement de l'appareil, incertitude sur l'uniformité de l'écoulement.

1.2.1. Les incertitudes liées à l'appareil

- Micro-moulinet

Les mesures ont généralement été répétées trois fois pour chaque hauteur. L'erreur relative maximale par rapport à la moyenne de ces mesures est estimée à 4 % dans le canal de Gent. Nous avons également procédé à l'étalonnage du micro-moulinet dans le canal d'étalonnage du laboratoire d'Hydraulique de Gent : l'incertitude calculée sur la mesure ponctuelle vaut $\Delta u / u = 1,5 \%$, ce qui est cohérent avec les valeurs constructeur.

- ADV

Les mesures sont réalisées à une fréquence de 25 Hz et nous utilisons des moyennes glissantes sur plusieurs minutes pour évaluer la vitesse moyenne. Nous avons donc considéré comme négligeable l'erreur relative maximale à la vitesse moyenne.

Nous avons également procédé à l'étalonnage de l'ADV dans le canal d'étalonnage du laboratoire d'Hydraulique de Gent : l'incertitude calculée sur la mesure ponctuelle vaut $\Delta u / u = 3,5 \%$ pour des vitesses supérieures à 0,6 m/s, en deçà l'incertitude est négligeable.

1.2.2. Les incertitudes liées au positionnement de l'appareil

Pour le micro-moulinet, nous avons considéré que l'erreur de positionnement de l'hélice sur la tige de mesure pouvait atteindre 0,5 cm. Cette incertitude va avoir une influence sur le profil de vitesses et donc sur la détermination de la vitesse de cisaillement.

Pour l'ADV, l'appareil fait automatiquement la mesure de la distance entre la sonde et le radier. L'incertitude liée à cette mesure est négligeable.

2. Analyse du calcul du cisaillement sans dépôts

Nous avons réalisé une série d'expériences dans des collecteurs du Marais où il n'y avait pas de dépôt. Ces zones sont situées à l'aval des collecteurs Vieille du Temple et Rivoli.

2.1. Analyse des données ADV

Les mesures ADV permettent de faire un calcul direct du cisaillement. Nous avons réalisé des mesures à partir du fond puis nous avons évalué le cisaillement aux différentes hauteurs. Nous avons ensuite déduit le taux de cisaillement à la paroi en faisant la supposition d'une distribution verticale linéaire du cisaillement (méthode de Reynolds, cf. Equation II-11). Les profils mesurés et les profils déterminés à partir de la méthode de Reynolds pour les expériences en réseau sont dans la Figure II-11.

Pour toutes les expériences, la composante visqueuse du cisaillement $\tau_{lam}(z) = \mu \cdot \frac{d\bar{u}(z)}{dz}$ ne dépasse jamais 2 % de la composante turbulente τ_{turb} , même pour les mesures effectuées près du fond ($z/h < 0,1$). Ceci confirme que les écoulements étudiés correspondent à des écoulements turbulents développés et que les mesures ont été réalisées en dehors de la couche limite visqueuse. On peut donc négliger la composante visqueuse de $\tau(z_i)$ pour la suite des calculs. Une dispersion importante du taux de cisaillement est observée dans la zone $z/h < 0,15$: les variations du cisaillement d'un point à l'autre peuvent atteindre un facteur 6. Afin de déterminer si les variations pouvaient être expliquées par des évolutions de l'écoulement durant les expériences, des mesures ADV ont été effectuées sur 4 périodes successives de 5 minutes à deux hauteurs différentes $z = 2$ cm et $z = 5$ cm. Sur chaque enregistrement, \bar{u} et τ_{turb} ont été calculés. La variation maximale obtenue à ces deux hauteurs atteint 4 % sur $\bar{u}(z)$ et 15 % sur τ_{turb} . Les variations temporelles de la vitesse moyenne ne permettent donc pas d'expliquer la dispersion des données et on vérifie ici que l'écoulement est permanent par périodes.

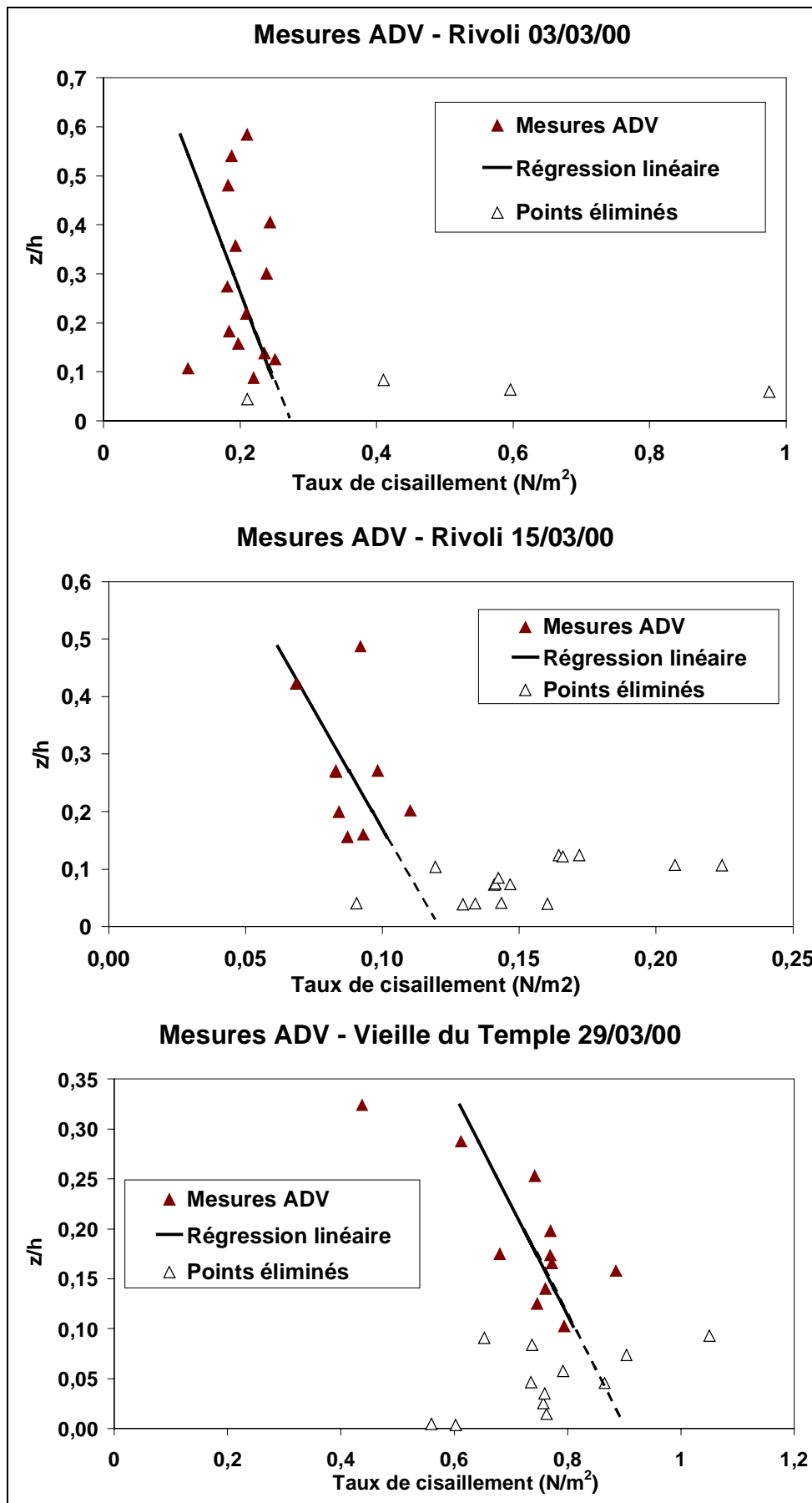


Figure II-11 - Résultats obtenus avec les données ADV en réseau sans dépôt

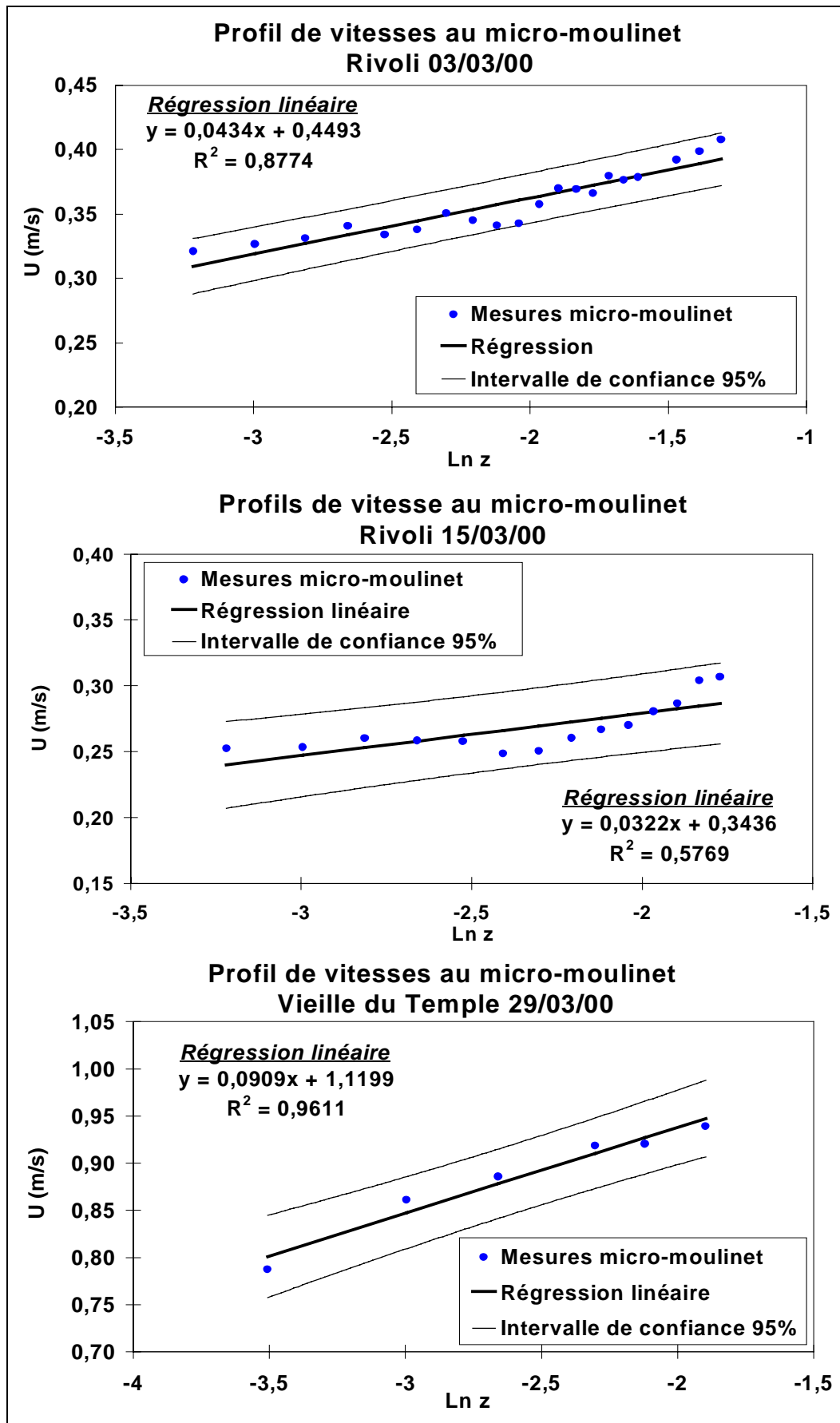


Figure II-12 - Résultats obtenus avec les données micro-moulinet en réseau sans dépôt

Il faut rappeler que la variabilité près du fond a également été observée dans le canal de Gent où les conditions hydrauliques sont stables. Les hypothèses les plus vraisemblables concernent les échos du fond (en béton dans les collecteurs) qui peuvent expliquer une part importante de la dispersion observée ainsi que les turbulences près du fond et les petites perturbations du radier qui peuvent générer des phénomènes turbulents.

A cause de cette importante dispersion, nous avons éliminé les points situés dans la zone $z/h < 0,1$ avant de réaliser le calage de la régression linéaire pour déterminer τ_{local} . L'erreur de lecture ($\pm 0,5$ cm) et la variabilité sur τ_{turb} (± 15 %) ont été appliqués aux données de cisaillement et l'incertitude estimée sur le taux de cisaillement vaut ± 17 %.

Le taux de cisaillement local évalué pour chaque site vaut (cf. Tableau II-5) :

$$\tau_{local,03/03/00} = 0,27 \text{ N/m}^2, \tau_{local,15/03/00} = 0,15 \text{ N/m}^2 \text{ et } \tau_{local,29/03/00} = 0,85 \text{ N/m}^2.$$

Si les points situés sous $z/h = 0,1$ n'étaient pas enlevés on obtiendrait les valeurs suivantes :

$$\tau_{local,03/03/00} = 0,37 \text{ N/m}^2, \tau_{local,15/03/00} = 0,12 \text{ N/m}^2 \text{ et } \tau_{local,29/03/00} = 0,90 \text{ N/m}^2.$$

2.2. Analyse des données de vitesse du micro-moulinet

Pour chaque expérience, les données micro-moulinet ainsi que les profils de vitesse déduits avec la distribution logarithmique sont présentés dans la Figure II-12.

Les régressions linéaires présentent de bons coefficients de corrélation, excepté pour l'expérience Rivoli-15/03/00. La variabilité temporelle de l'écoulement peut expliquer cette mauvaise corrélation. En effet, la réalisation de chaque profil nécessite environ 30 minutes. Nous avons fait un suivi de la variabilité temporelle de la vitesse mesurée avec le micro-moulinet dans Rivoli et Vieille du Temple à deux hauteurs différents sur une période de 20 minutes. Sur ces périodes, la variabilité de la vitesse moyenne $\bar{u}(z)$ atteint ± 10 %. Cette incertitude appliquée aux données des expériences induit une incertitude sur u^* de l'ordre de ± 10 % et de ± 20 % sur le cisaillement.

Il faut ajouter aux incertitudes liées à l'écoulement, l'incertitude liée à la lecture des hauteurs pour le micro-moulinet. L'erreur sur la hauteur a été estimé à $\pm 0,5$ cm. L'incertitude maximale induite sur u^* vaut ± 2 % et ± 4 % sur le cisaillement. Finalement, l'incertitude totale sur le taux de cisaillement au fond vaut ± 24 %.

La détermination des régimes d'écoulement a fait apparaître que les régimes sont « transitionnels » pour toutes les expériences. Le taux de cisaillement au fond vaut $0,17 \text{ N/m}^2$ et $0,30 \text{ N/m}^2$ sur Rivoli et $1,32 \text{ N/m}^2$ sur Vieille du Temple. (cf. Tableau II-5).

Dans le bassin du Marais, les cunettes où circulent les eaux usées sont en béton. Graf (1998) donne différentes valeurs de la rugosité équivalente pour du béton : $0,3 \text{ mm} < k_s < 3 \text{ mm}$. Ces valeurs sont cohérentes avec les valeurs de k_s déterminées à partir des expériences.

Enfin, on observe une bonne concordance pour les taux de cisaillement obtenus à partir des données micro-moulinet et ADV sur le collecteur Rivoli tandis que sur Vieille du Temple on observe un rapport d'environ 1,5 entre les résultats.

	Expérience	Rivoli (03/03/00)	Rivoli (15/03/00)	Vieille du Temple (29/03/00)
Résultats micro-moulinet (profil de vitesses)	Régime	Transitionnel	Transitionnel	Transitionnel
	u^* (m/s)	0,017	0,013	0,036
	k_s	1,2 mm	0,9 mm	0,2 mm
	τ (N/m ²)	$0,30 \pm 0,05$	$0,17 \pm 0,03$	$1,32 \pm 0,32$
Résultats ADV (loi de Reynolds)	τ (N/m ²)	$0,27 \pm 0,05$	$0,15 \pm 0,03$	$0,85 \pm 0,15$

Tableau II-5 – Résultats du calage des profils théoriques de vitesse aux profils mesurés avec le micro-moulinet et taux de cisaillement τ (N/m²).

2.3. Evaluation du taux de cisaillement avec l'équation de mouvement

2.3.1. Pente du radier

Le taux de cisaillement a été calculé sur Rivoli avec la pente du fond lue dans les relevés topographiques établis en 1995 et relatifs au réseau d'assainissement du Marais. Pour Rivoli, on a obtenu : $J = 0.09 \%$ et τ_m calculé est 8 à 11 fois supérieur aux taux de cisaillement calculés à partir de la méthode basée sur le profil logarithmique (cf. Tableau II-6).

2.3.2. Pente d'énergie

La pente d'énergie a été déterminée, à partir de la relation de Darcy-Weisbach et de la formule de Manning-Strickler. Les résultats obtenus avec la pente d'énergie montrent un écart important entre J et J_e et les résultats obtenus à partir de J_e sont proches des valeurs obtenues avec la méthode basée sur les profils de vitesses. Les différences observées entre la pente du fond et la pente d'énergie peuvent s'expliquer par la non-uniformité de l'écoulement et les imprécisions sur la mesure de la pente. En effet, les relevés topographiques ont été effectués tous les 25 m à 50 m et cette distance ne permet pas de prendre en compte certaines déflexions au niveau du radier. De plus, la présence de sédiments peut perturber la mesure topographique dans les égouts : les mesures topographiques sont faites en enfonçant une pige

dans l'écoulement jusqu'à atteindre le radier, si la pige n'est pas bien enfoncée il est possible que les relevés prennent en compte une épaisseur de dépôts.

	Expérience	Rivoli (03/03/00)	Rivoli (15/03/00)
Distribution log. des vitesses	τ_m (N/m ²)	0,30	0,17
Distribution de Reynolds	τ_m (N/m ²)	0,27	0,15
Pente du fond	J (%)	0,09	0,09
	τ_m (N/m ²)	1,77	1,51
Darcy-Weisbach	Je (%)	0,011	0,008
	τ_m (N/m ²)	0,21	0,13
Manning-Strickler	Je (%)	0,017	0,012
	τ_m (N/m ²)	0,33	0,20

Tableau II-6 – Taux de cisaillement Erreur! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme. **sur Rivoli (J: pente du fond, Je: pente d'énergie)**

Les résultats obtenus à partir de la distribution logarithmique des vitesses ou de la loi de Reynolds peuvent être utilisés pour caler les paramètres de rugosité utilisés dans les relations de Manning-Strickler ou de Darcy-Weisbach. Par exemple, en calant le coefficient de Strickler K_s avec les résultats obtenus avec la distribution de Reynolds sur le site de Rivoli, on obtient une valeur moyenne $K_s = 87$. Cette valeur est proche de la valeur initiale choisie pour du béton lisse ($K_s = 80$).

A partir de ce type de calage, on peut éventuellement se contenter de faire des mesures de vitesse moyenne et de hauteur d'eau pour estimer le cisaillement dans un tronçon dont le radier est composé d'un matériau uniforme, c'est-à-dire dans un tronçon sans dépôt.

2.4. Variabilité spatiale du taux de cisaillement au fond

Nous avons étudié la variabilité du taux de cisaillement dans la longueur et la largeur de l'écoulement pour un collecteur du type Saint-Gilles et Vieille du Temple où le rapport b/h laisse supposer un effet des courants secondaires sur les caractéristiques de l'écoulement.

Pour cela, nous avons effectué des mesures en différents points du collecteur Vieille du Temple sur 8m de long, le 09/08/01 (vitesse d'écoulement : 0,45 m/s ; hauteur d'eau : 0,38 m) ainsi que des mesures dans une section transversale, le 29/03/01. Les points de mesure sont présentés schématiquement dans la Figure II-13 : trois profils de vitesse ont été effectués dans une section pour étudier les variations transversales du cisaillement et un profil de vitesse a

été effectué au milieu de la section en cinq points du collecteur situés à 2 m de distance les uns des autres pour étudier les variations longitudinales du cisaillement.

En chaque point nous avons fait un profil de vitesses avec le micro-moulinet et nous avons évalué le taux de cisaillement au fond avec la méthode de la distribution logarithmique des vitesses. Les résultats sont regroupés dans le Tableau II-7 et on constate que :

- les variations longitudinales du taux de cisaillement au fond sont peu importantes (entre $0,21 \text{ N/m}^2$ et $0,25 \text{ N/m}^2$) ce qui permet de conclure que les conditions hydrauliques sont stables sur le tronçon de collecteur étudié.
- dans la section de l'écoulement, les valeurs du cisaillement varient jusqu'à 32 % : ces variations peuvent être liées à la forme « arrondie » du collecteur à la base des parois verticales ainsi qu'aux courants secondaires dans le plan perpendiculaire à l'écoulement.

Une étude plus approfondie permettrait sans doute de mettre en évidence les courants secondaires, mais pour cela il faudrait employer l'ADV car le micro-moulinet ne permet pas de prendre en compte la composante de la vitesse suivant l'axe perpendiculaire à l'écoulement.

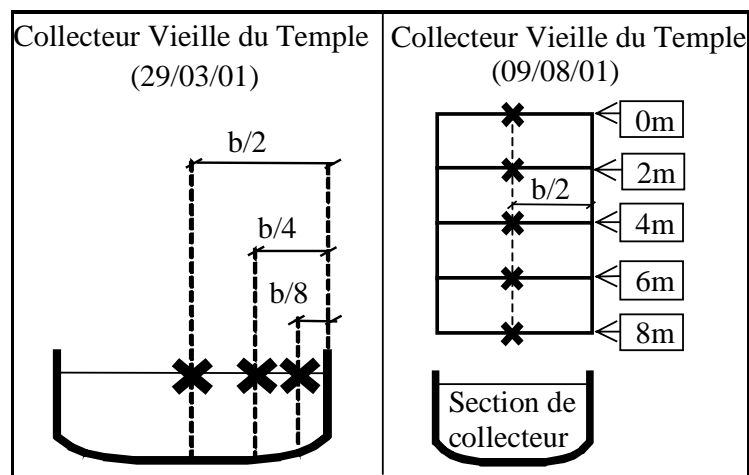


Figure II-13 – Schéma des points de mesure pour les expériences de variabilité spatiale

Variation dans une section (29/03/01)		Variation longitudinale (09/08/01)	
Position	τ au fond (N/m^2)	Distance	τ au fond (N/m^2)
		0m	0,23
b / 2	1,23	2m	0,21
b / 4	0,95	4m	0,21
b / 8	0,83	6m	0,23
		8m	0,25

Tableau II-7 – Variabilité spatiale du taux de cisaillement sur Vieille du Temple

2.5. Discussion : quelle méthode choisir ?

Nous avons constaté que τ_0 estimé à partir de la distribution logarithmique des vitesses est très proche de τ_0 estimé à partir de la méthode de Reynolds quand les points situés dans la zone $z/h < 0,1$ sont éliminés. Le micro-moulinet est d'un emploi plus simple que l'ADV en égout, c'est pourquoi nous utiliserons cette méthode pour des expériences ultérieures en réseau, durant des périodes de temps sec.

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour déterminer quel nombre de mesures était nécessaire à une bonne estimation du cisaillement. Quatre mesures à différentes hauteurs sont nécessaires pour obtenir un profil de vitesse similaire au profil complet et donc pour déduire une valeur correcte du cisaillement. La comparaison entre les résultats à partir du profil mesuré et du profil avec 4 points est présenté dans le Tableau II-8. Les hauteurs choisies pour effectuer les mesures coïncident avec la « méthode des 3 points » qui est décrite par Julien (1998) pour déterminer la vitesse moyenne d'un écoulement à $z = 0.2h, 0.4h$ et $0.8h$, auxquels on ajoute un point proche du fond à $z = 0.15h$ afin de caler plus précisément le profil de vitesse.

Méthode	Rivoli (03/03/00)	Rivoli (15/03/00)	Vieille du Temple (29/03/00)
Profil log. des vitesses « complet »	0,30	0,17	1,32
Profil log. des vitesses à « 4 points »	0,29	0,17	1,28

Tableau II-8 – Comparaison du taux de cisaillement déterminé à partir d'un profil logarithmique complet ou avec 4 points de mesures

Toutefois, la méthode au micro-moulinet ne peut pas être utilisée dans des conditions de régime non permanent. Dans ce cas, la mesure en continu avec l'ADV à une hauteur est une bonne méthode pour estimer l'impact des variations de l'écoulement sur les variations du cisaillement, par exemple dans les expériences d'augmentations artificielles du débit menées par Ahyerre (1999). Au vu de la grande dispersion observée près du fond, il est préférable de choisir le point de suivi hors de la zone $z/h < 0,1$.

Enfin nous avons vu que la méthode classique basée sur la pente du fond peut amener à des erreurs importantes sur le taux de cisaillement calculé. L'utilisation de la pente d'énergie calculée à partir des relations de Darcy-Weisbach ou de Manning-Strickler donne des résultats comparables aux deux autres méthodes. Nous pensons qu'il peut être judicieux d'utiliser les résultats issus des méthodes du type distribution logarithmique des vitesses ou distribution de Reynolds pour valider les termes de rugosité utilisés pour décrire les tronçons de collecteur.

3. Analyse du cisaillement avec dépôts

La présence de dépôt a des répercussions sur l'uniformité de l'écoulement et donc sur l'évaluation du taux de cisaillement. Perrusquia *et al.* (1995) ont noté que la rugosité du fond peut être doublée lorsqu'on passe d'un dépôt plat à un dépôt légèrement perturbé. Nelson *et al.* (1995) ont également constaté que les turbulences au dessus des sédiments ont une influence forte sur les vitesses et que les estimations du taux de cisaillement basées sur l'hypothèse d'un régime permanent uniforme peuvent se montrer insuffisantes pour expliquer l'érosion à l'aval des dépôts, dans les cas où la topographie ou la rugosité ne sont pas uniformes.

Dans notre cas, le stock de matière organique que nous voulons étudier se trouve à l'interface eau-sédiment, c'est-à-dire dans des zones où l'on trouve des dépôts. Nous avons donc procédé à des expériences dans les collecteurs Saint-Gilles et Rivoli, en présence de sédiments, afin d'observer l'impact du dépôt sur le cisaillement et l'application des méthodes d'estimation du taux de cisaillement.

3.1. Caractéristiques des dépôts

3.1.1. Relevé des hauteurs de dépôts sur les sites étudiés

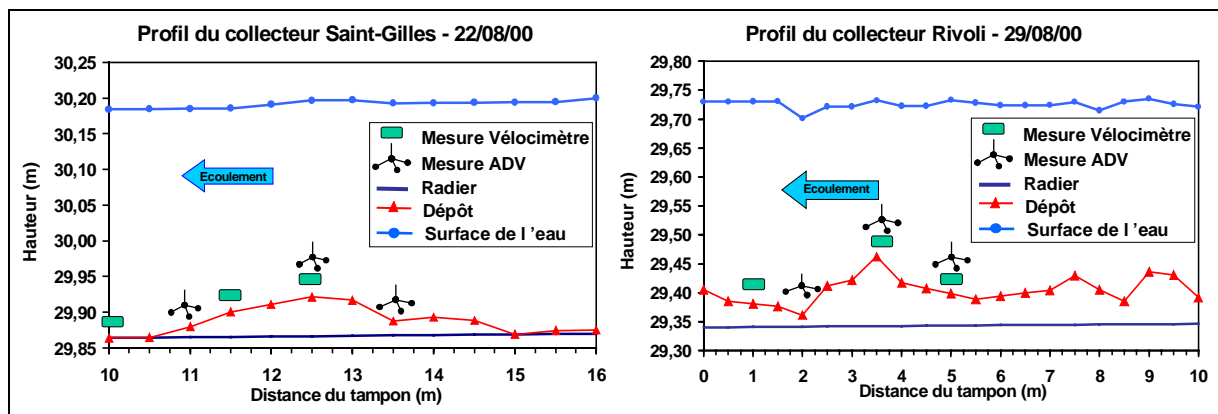


Figure II-14 – Suivi des zones étudiées

Un relevé des hauteurs de dépôts a été effectué sur une dizaine de mètres, toujours au milieu de l'écoulement (cf. Figure II-14), afin de choisir les points de mesure qui permettront d'observer l'impact d'une dune sur le taux de cisaillement au fond du collecteur. Les deux sites choisis présentent un relief d'environ 10 cm de haut (ce qui correspond à près 20 % de la hauteur de l'écoulement sur Rivoli et 30 % sur Saint-Gilles) qui s'étale sur 5 à 6 m de long.

Nous avons réalisé des profils de vitesse avec un vélocimètre électromagnétique en trois points sur chaque site : sur Saint-Gilles à 10 m, à 11,5 m et à 12,5 m du tampon et sur Rivoli

à 1 m, à 3,5 m et à 5 m du tampon. Nous avons également fait une étude avec l'ADV dans la zone intérieure de l'écoulement ($z/h < 0,2$) en trois points sur chaque site : sur Saint-Gilles à 11 m, à 12,5 m et à 13,5 m du tampon et sur Rivoli à 2 m, à 3,5 m et à 5 m du tampon.

Ces points ont été choisis pour permettre d'observer le taux de cisaillement autour de la dune et pour permettre de réaliser les deux types de mesures sur chaque site en une demi-journée.

3.1.2. Analyse granulométrique du dépôt

Une analyse granulométrique sur les dépôts situés dans les tronçons de collecteurs étudiés a été conduite en Août 2000 (cf. Figure II-15). Cette granulométrie permettra de confronter les coefficients de rugosité estimés aux diamètres caractéristiques des dépôts présents sur les sites (cf. Tableau II-9).

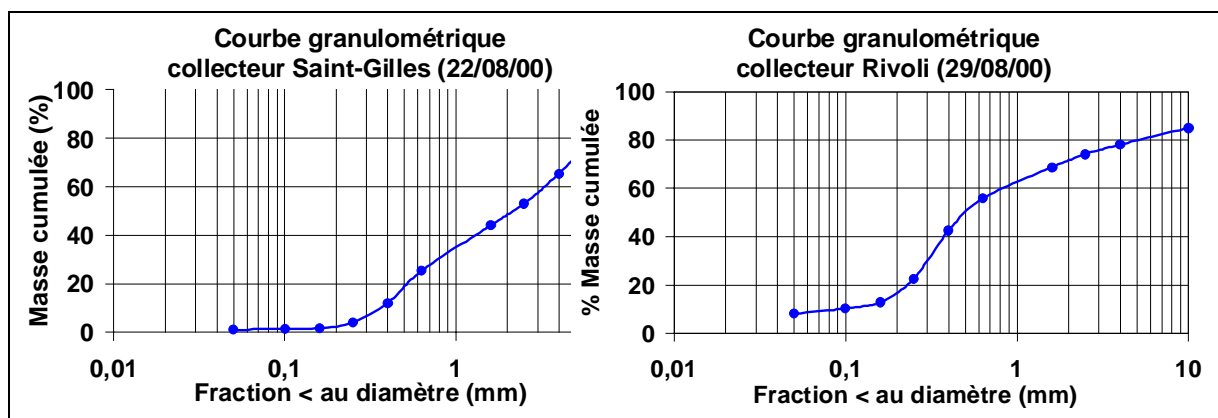


Figure II-15 - Granulométrie du dépôt grossier, dans les deux tronçons étudiés

	d_{20} (mm)	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)
Rivoli	0,2	0,5	--
Saint-Gilles	0,5	2,2	9

Tableau II-9 – Diamètres caractéristiques du dépôt dans les deux tronçons étudiés

3.2. Analyse des données de vitesse

3.2.1. Collecteur Saint-Gilles

Les profils de vitesse mesurés et les profils logarithmiques calés sont présentés dans la Figure II-16. Les résultats issus du calage des profils sont présentés dans le Tableau II-10. Sur le collecteur Saint-Gilles, on constate que l'écoulement est en régime turbulent rugueux.

Pour les points 11,5 m et 12,5 m, la rugosité estimée est de l'ordre de la d_{90} , ce qui assure d'une certaine cohérence entre la méthode employée et les critères physiques. Cette conclusion ne s'applique pas au point 10 m : la rugosité obtenue par calage en ce point ne correspond pas à la rugosité des grains qui est du même ordre de grandeur que la d_{90} des

dépôts grossiers, et elle ne correspond pas à la rugosité des « dunes » qui vaut 4,3 cm selon la définition de Van Rijn (cf. Equation II-19, citée par Viollet *et al.*,1998) :

$$k_s = 1,1H_{dune} \times \left(1 - \exp\left(-25 \times \frac{H_{dune}}{L_{dune}} \right) \right) \quad \text{Équation II-19}$$

en considérant que $H_{dune} = H_{depot} = 10$ cm et que $L_{dune} = L_{depot} = 5$ m .

Il est probable qu'une des hypothèses liées à l'application du profil logarithmique de vitesses ne soit plus vérifiée en ce point à cause de la variation rapide de pente (hypothèse : écoulement uniforme) ou à cause de courants secondaires liés à la géométrie des dépôts (hypothèse : écoulement unidirectionnel).

Enfin, on constate que la valeur du taux de cisaillement aux points 11,5 m et 12,5 m varie du simple au double, ce qui met en évidence la variabilité du cisaillement au-dessus du dépôt.

	Saint-Gilles (22/08/00)			Rivoli (29/08/00)		
	10 m	11,5 m	12,5 m	1 m	3,5 m	5 m
Régime turbulent	rugueux	rugueux	rugueux	transition.	--	transition.
k_s (mm)	98	9	14	140	--	148
u^* (m/s)	0,043	0,046	0,031	0,056	--	0,061
τ (N/m²)	1,2	2,0	0,9	1,6	--	2,2

Tableau II-10 – Résultats de la méthode des profils logarithmiques de vitesses

3.2.2. Collecteur Rivoli

Les profils de vitesse mesurés et les profils logarithmiques calés sont présentés dans la Figure II-16. Les valeurs obtenues grâce au calage des profils sont présentés dans le Tableau II-10.

On constate que le point 3,5 m (en haut de la dune) correspond à un point particulier de l'écoulement avec des vitesses nulles sur quelques centimètres de hauteur : l'application de la méthode des profils logarithmiques ne peut pas être réalisée dans un telle configuration. Ce « comportement » de l'écoulement a été observé sur plusieurs minutes et nous n'avons pas trouvé d'explication à ce phénomène.

Sur les deux autres points autour de la dune, on constate que l'écoulement est en régime turbulent de transition mais les valeurs de rugosité obtenues suite au calage des profils de vitesse sont de l'ordre de 15 cm à 35 cm ce qui ne correspond ni à la taille des grains du dépôt, ni à la rugosité équivalente de la dune (cf. paragraphe ci-dessus). Il est probable que l'hypothèse de régime uniforme ne soit pas vérifiée en ces points.

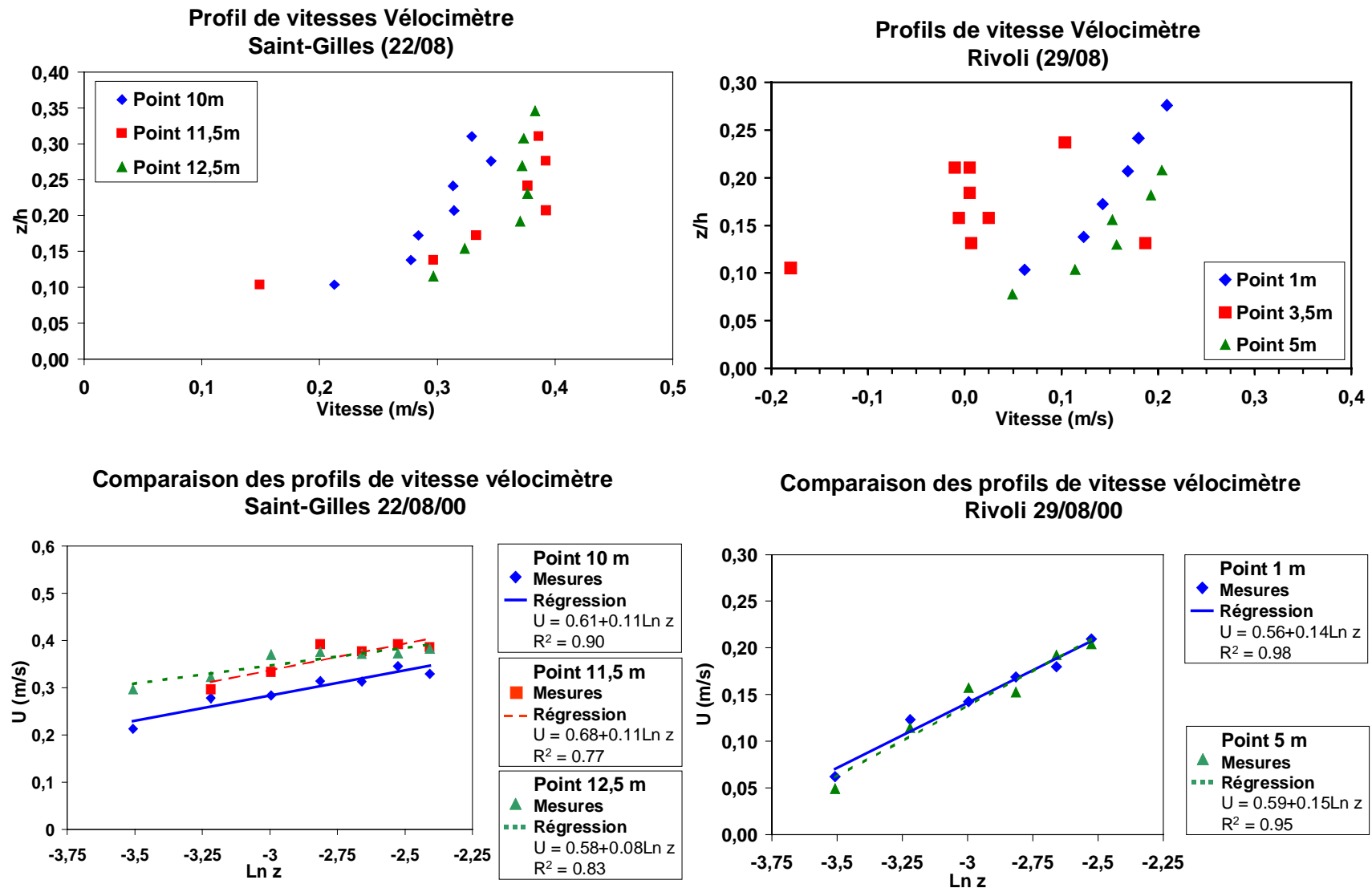


Figure II-16 - Données de vitesse sur Rivoli (29/08/00) et sur Saint-Gilles (22/08/00)

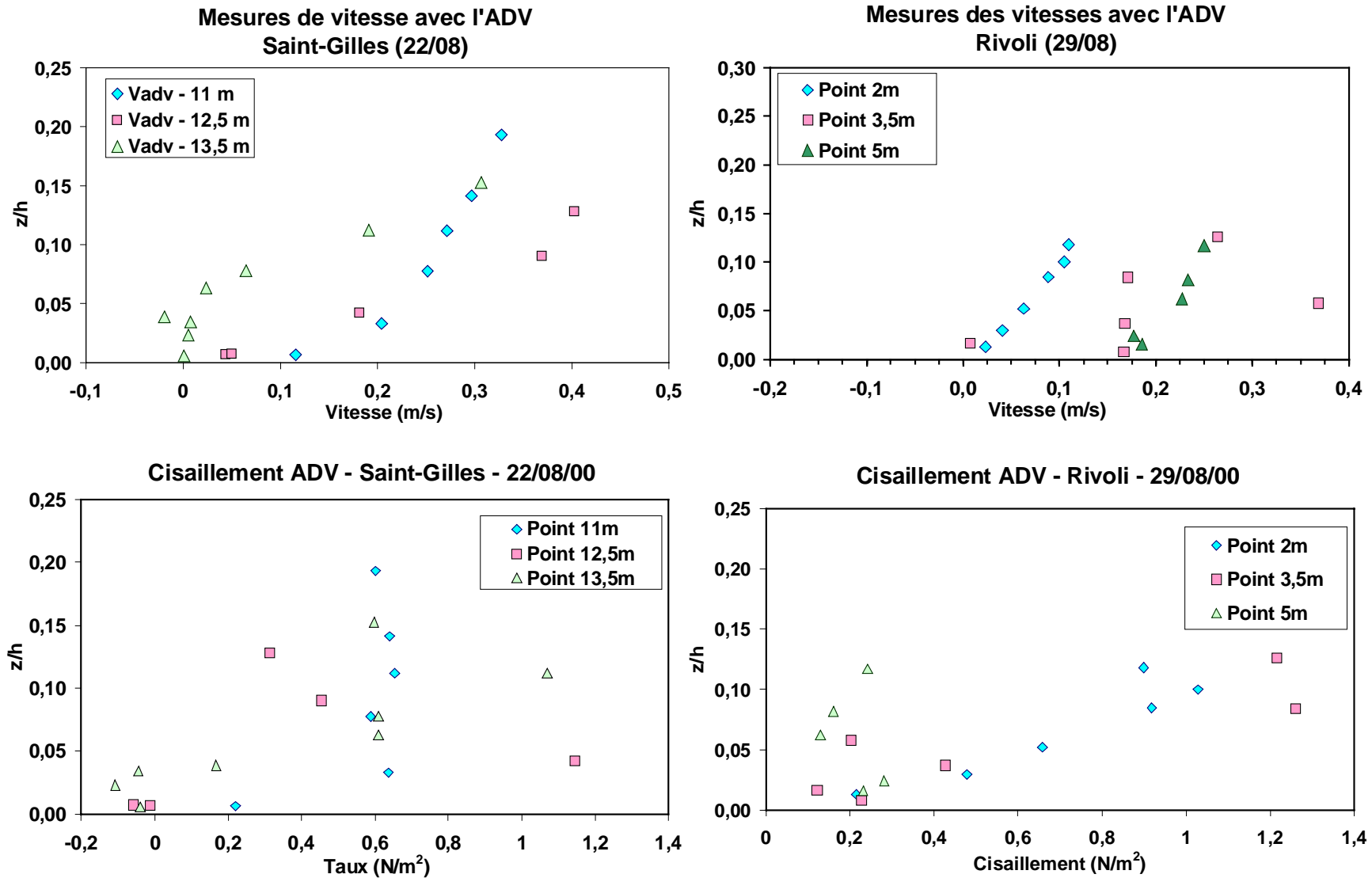


Figure II-17 - Mesures ADV et taux de cisaillement sur Saint-Gilles et sur Rivoli

3.3. Analyse des données ADV

Les observations réalisées avec l'ADV sont présentées dans la Figure II-17 : elles concernent la partie basse de l'écoulement. En effet la tête de l'ADV doit être immergée pour fonctionner et les mesures sont effectuées à 11 cm au-dessous de la tête. Au vu des hauteurs d'eau sur les sites étudiés, les mesures ne peuvent donc pas s'étendre à toute la colonne d'eau.

Les profils de vitesse relevés avec l'ADV mettent en évidence des perturbations des vitesses dans les mêmes zones que le vélocimètre. Les vitesses mesurées sur Saint-Gilles montrent qu'au point 13,5 m il y a une zone morte dans l'écoulement avec une vitesse quasiment nulle ($z/h < 0,07$). Cette observation vient compléter les résultats obtenus avec le vélocimètre et montre qu'après le dépôt on trouve une zone où les vitesses ne se répartissent pas selon un profil logarithmique sur toute la hauteur d'eau. Les vitesses mesurées sur Rivoli font apparaître au point 3,5 m des vitesses très variables dans la zone étudiée.

Les observations que nous avons réalisées avec l'ADV sur Saint-Gilles se rapprochent des résultats présentés par Julien (1998). La Figure II-18 reprend les distributions de vitesse et de contrainte de cisaillement autour d'un obstacle de hauteur Δz dans le cas d'un écoulement fluvial permanent non-uniforme : on peut assimiler le profil de vitesse de la section B au point 13,5 m du collecteur Saint-Gilles.

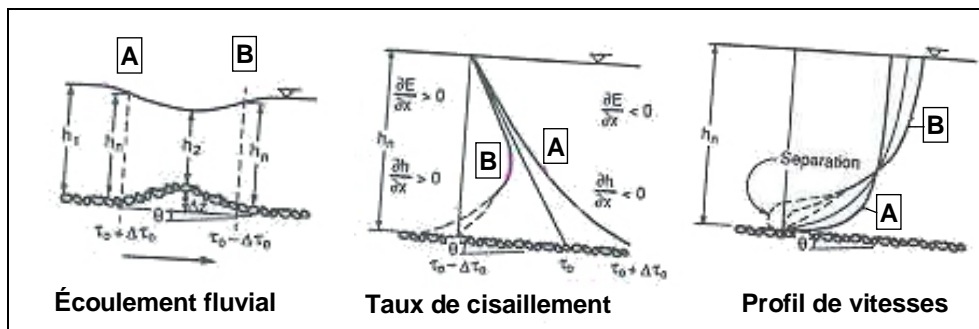


Figure II-18 – Exemples de distribution des vitesses et des contraintes de cisaillement autour d'un obstacle (Julien,1998)

L'obstacle crée une perturbation locale non-uniforme de l'écoulement et la perturbation Δz agit sur le terme d'énergie spécifique, qui est négligé en écoulement uniforme. On constate alors que les profils de vitesse se détachent du profil logarithmique dans les zones proches du fond de l'écoulement et que les valeurs de cisaillement oscillent autour d'une valeur τ_0 qui correspond à la valeur en écoulement uniforme permanent. Dans ce cadre, le taux de cisaillement est plus important sur la face amont de la forme et il est plus faible sur la face

aval de la forme. Ce mécanisme engendre une amplification de la perturbation de départ jusqu'au développement d'une dune qui grandit vers l'aval de l'écoulement.

L'analyse des taux de cisaillement calculés avec la loi de Reynolds montre une grande variabilité du cisaillement sur les points hauts du dépôt. L'étude des données ADV montre que, autour du dépôt, les valeurs de la vitesse transversale moyenne V_y sont du même ordre voire supérieures à la vitesse longitudinale moyenne V_x pour les points « sensibles » (le point 13,5 m sur Saint-Gilles et le point 3,5 m sur Rivoli) mais également pour les points situés très près du fond et dont la vitesse longitudinale est très faible (cf. Figure II-19). Ces phénomènes sont probablement liés aux turbulences engendrées par le dépôt. Une analyse approfondie des théories de la turbulence et des écoulements en 3D permettraient sans doute d'expliquer les résultats obtenus. Nous pouvons cependant noter que, autour du dépôt, les courants transversaux sont susceptibles d'avoir autant d'importance que le courant principal. Dans ce cas, l'écoulement ne peut pas être considéré comme étant unidirectionnel.

Les valeurs du cisaillement obtenues à partir des données ADV sont donc probablement sous-estimées car nous avons effectué le calcul pour le taux de cisaillement appliqué dans le sens de l'écoulement et il faudrait prendre en compte les composantes transversales.

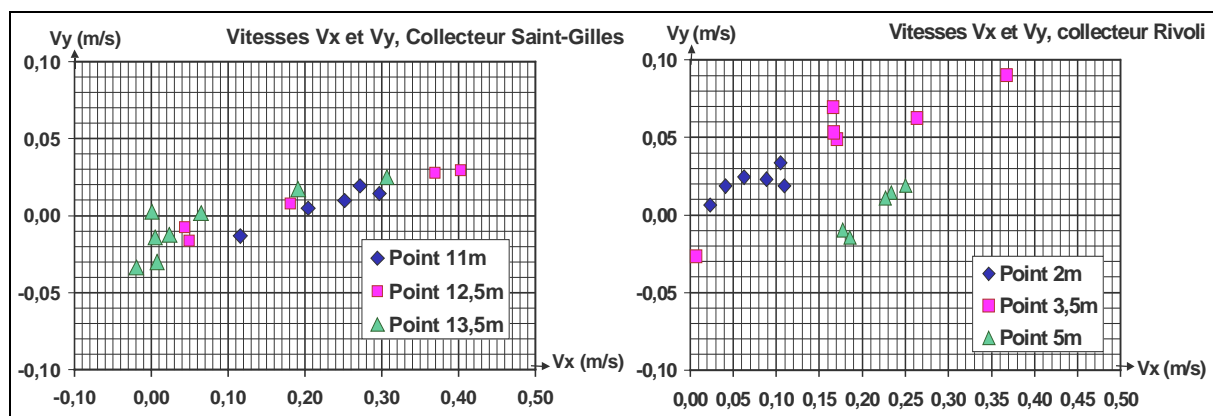


Figure II-19 - Vitesse moyenne longitudinale V_x et transversale V_y mesurées à l'ADV

3.4. Discussion

Les régimes d'écoulement déterminés autour des dunes de dépôt, à partir de la méthode des profils de vitesse, sont des régimes de transition ou rugueux. Perrusquia (1991) a également observé ce type de résultats avec des sédiments dans un canal : il a identifié un régime

turbulent rugueux au-dessus de « dunes » de dépôt et un régime turbulent de transition au-dessus de « rides » de dépôt (les rides sont des éléments de relief plus petites que les dunes). De plus, les mesures effectuées avec l'ADV ont permis de montrer que l'écoulement autour des reliefs de dépôt n'est pas unidirectionnel et que, dans certaines zones, la répartition des vitesses ne suivait pas un profil logarithmique sur toute la hauteur d'eau. Ces observations montrent que les hypothèses simplificatrices utilisées pour les méthodes de calcul du taux de cisaillement ne sont pas valides dans certaines zones du dépôt. Par exemple, la méthode de Manning-Strickler n'est valable que dans un écoulement turbulent rugueux.

Enfin, la détermination du taux de cisaillement ponctuel avec l'ADV, dans une zone de relief, semble également être problématique en canal. Saadi (2000) a procédé à différents essais en canal, avec un ADV à 1 cm au-dessus d'une lit de graviers dont le diamètre caractéristique $d_{50} = 5$ mm. Il a ainsi « quadrillé » une surface et a calculé le cisaillement en appliquant la distribution de Reynolds. Il a observé des variations du cisaillement, allant du simple au double, d'un point à l'autre, alors que les conditions hydrauliques sont stables. Ces variations semblent dues aux phénomènes de turbulence dans la zone proche du fond, et il faudrait considérer l'ensemble des mesures sur une zone pour avoir une estimation correcte du cisaillement moyen. On ne peut donc pas envisager d'utiliser l'ADV de façon ponctuelle pour obtenir une mesure du taux de cisaillement applicable sur un tronçon de collecteur.

On constate donc que toutes les méthodes pour l'estimation du taux de cisaillement ont un champ d'action limitée quand il s'agit de les appliquer à des zones avec du dépôt.

CHAPITRE 5. Conclusions et perspectives

Les expériences que nous avons menées dans les tronçons de collecteurs sans dépôt nous ont permis de définir une méthode pour évaluer le taux de cisaillement en réseau d'assainissement. Cette méthode se base sur l'établissement d'un profil de vitesse avec 4 points de mesures. Elle a été choisie parce qu'elle est simple à mettre en œuvre et qu'elle permet d'obtenir un résultat précis .

Cette méthode peut, par ailleurs, être utilisée pour déterminer ou pour valider les termes de rugosité utilisés pour décrire les tronçons de collecteur dans les modèles hydrauliques classiques (par exemple : coefficient de Strickler).

Les expériences menées en présence de dépôts dans les collecteurs du réseau d'assainissement du Marais ont montré que les dépôts affectent la distribution des vitesses dans l'écoulement. Les profils de vitesse ne suivent pas forcément une distribution logarithmique, illustrant ainsi que les hypothèses simplificatrices telles que « l'écoulement est uniforme » ne sont pas justifiées lorsque des mesures sont réalisées sur du dépôt. De plus les mesures de vitesses avec l'ADV montrent l'importance des courants transversaux dans la zone proche du fond.

De ce fait, l'évaluation du taux de cisaillement au fond, en présence de dépôts, se révèle complexe. Nous pensons qu'il faudrait faire un relevé tri-dimensionnel des reliefs du dépôt sur le tronçon à étudier, avec un petit pas d'espace, avant d'appliquer un modèle hydraulique capable de prendre en compte les phénomènes de re-circulations et de courants secondaires. Si le choix d'un tel modèle peut se justifier à petite échelle (tronçon de collecteur) pour comprendre les phénomènes mis en jeu, il est difficile à gérer à grande échelle (réseau) car c'est une approche gourmande en temps et en calculs.

Pour réaliser la suite de ce travail, nous avons finalement opté pour la technique basée sur le profil de vitesse afin d'étudier l'évolution du cisaillement le long des collecteurs du Marais, tout en sachant que cette méthode est limitée lorsqu'elle est utilisée dans des zones avec du dépôt, parce que c'est une méthode relativement simple à mettre en œuvre qui permet d'obtenir plus de renseignement sur l'écoulement qu'une simple mesure de vitesse moyenne.

