

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب - البلدية 1-

UNIVERSITE SAAD DAHLEB - BLIDA 1 –

Faculté de Technologie

Département des Sciences de l'Eau et Environnement



## MÉMOIRE DE MASTER

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Ressources Hydrauliques**

Thème :

**Modélisation des champs des vitesses dans un canal prismatique  
sous diverses rugosités**

Présenté par :

**Mohamed KAMLI**

Soutenu le : / /2020

Devant le jury composé de :

- Mr. B. REMINI	Professeur, U. de Blida	Président
- Mme. S. TAÏBI	Docteur, U. de Blida	Examinatrice
- Mr. A. AMMARI	Docteur, ENSH.de Blida	Promoteur
- Mr. A. ZEROUAL	Docteur, ENSH.de Blida	Co-promoteur

Promotion 2019/2020

# Remerciements

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous exprimons notre respect au président du jury ainsi qu'aux membres du jury d'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.*

*Je tiens à remercier mon promoteur Monsieur Ammari pour sa disponibilité, ses aides précieuses et ses conseils judicieux, ainsi que pour sa patience dont il a fait preuve à mon égard et qui m'a permis de mener à terme ce travail.*

*Je tiens à remercier également mon co-promoteur Monsieur Zeroual pour son soutien, sa patience et surtout son accompagnement pendant tout le travail.*

*Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce travail, de près ou de loin.*

## المستخلص:

يتعلق هذا البحث بالدراسة التجريبية لمحات السرعة في قناة موشورية مستطيلة ذات ميل متغير ، وقد أجريت القياسات باستخدام عدة مسطحات خشنة لمقارنة نموذجين لتوزيع سرعة الجريان ؛ نموذج هيدروديناميكي (قانون لوغاريتمي) وآخر احتمالي (نموذج إنتروبي). أظهرت النتائج ميزة طفيفة للنموذج الاحتمالي في تقدير سرعات وسط الجريان. أظهرت أيضا دراسة الارتباط بين خشونة القناة وانحدارها بالإضافة إلى معامل الانتروبيا ارتباطاً ممتازاً أدى إلى نموذج ارتداد قوي لتقييم خشونة مانينغ وفقاً للمعاملات السابقة الذكر. فيما عدا أن نموذج الخشونة كدالة لمعامل الإنتروبيا وحده وجد أنه أقل كفاءة من الأول.

**الكلمات المفتاحية:** الجريان الحر، الانتروبيا، النموذج اللوغاريتمي، خشونة القناة، سرعة الجريان.

## Résumé :

La présente recherche concerne l'étude expérimentale des profils des vitesses dans un canal prismatique rectangulaire à fond variable, les mesures ont été effectuées en utilisant plusieurs fond rugueux afin de comparer deux modèles de répartition des vitesses dans une section d'écoulement ; un modèle hydrodynamique (loi logarithmique) et un autre probabilistique (modèle entropique). Les résultats ont dévoilé un léger avantage du modèle probabilistique dans l'évaluation des vitesses au milieu de l'écoulement. L'étude de la corrélation entre la rugosité et la pente du canal ainsi que le paramètre entropique a démontré une excellente corrélation qui s'est traduite par un modèle régressif robuste d'évaluation de la rugosité de Manning en fonction des deux paramètres suscités. Sauf que le modèle de la rugosité en fonction du seul paramètre entropique s'est révélé moins robuste que le premier.

**Mots clés :** Ecoulement à surface libre, entropie, loi logarithmique, rugosité, vitesse d'écoulement.

## Abstract:

The present research concerns the experimental study of velocity profiles in a rectangular prismatic channel with variable slope, the measurements were carried out using several rough bottoms in order to compare two models of velocity distribution profiles in a flow section; the hydrodynamic model (logarithmic law) and the probabilistic one (entropic model). The results showed a slight advantage of the probabilistic model in estimating mid-flow velocities. The study of the correlation between the roughness, slope of the channel and the entropy parameter illustrated an excellent correlation between them which resulted in a robust regressive model for the evaluation of Manning's roughness according to the two parameters cited above. Except that the roughness model as a function of the single entropy parameter was found to be less robust than the first.

**Key words:** Open channel flow, entropy, logarithmic law, roughness, flow velocity.

## Table des matières

Remrciements .....	
Résumé.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction générale.....	1
I.1 Introduction.....	2
I.2 Rappel théorique sur l'écoulement a surface libre.....	2
I.2.1 Ecoulement uniforme et non uniforme .....	3
I.2.2 Ecoulement permanent et non permanent.....	3
I.2.3 Ecoulement Laminaire et Turbulent .....	3
I.2.4 Ecoulement Fluviale, Critique et Torrentielle.....	4
I.3 Calcul des écoulements permanents uniformes .....	4
I.5 Définition de la turbulence.....	5
I.5.1 Notion de couche limite turbulente.....	6
I.6 Lois de Distribution de vitesse.....	10
I.6.1 Loi logarithmique.....	10
I.6.2 Méthode de Fenton .....	12
I.6.3 Méthode de Yang .....	14
I.6.4 Méthode de Chui.....	14
I.7 Conclusion .....	15
II.1 Introduction .....	17
II.2 Description des instruments de laboratoire.....	17
II.2.1 Canal rectangulaire a pente variable.....	17
II.2.2 Installation expérimentale et moyen de mesure.....	18
II.2.3 Composantes du canal et leurs utilisations .....	18
II.2.3.1 Réservoir d'eau avec couvert .....	18
II.2.3.2 Pompe à eau.....	19
II.2.3.3 Débitmètre .....	19
II.2.3.4 Elément d'entrée :.....	19
II.2.3.5 Section de mesure .....	20
II.2.3.6 Elément de sortie avec vanne .....	20
II.2.3.7 Coffret de commande .....	21
II.2.3.8 Système d'ajustage de l'inclinaison .....	22
II.3 Limmimètre .....	22
II.4 Micro-moulinet.....	22
II.5 Protocole expérimentale .....	23

II.5.1 Mode de préparation de la rugosité .....	23
II.5.2 Description du protocole expérimental :.....	25
II.6 Conclusion .....	26
III.1 Introduction .....	28
III.2 Profils des vitesses .....	28
III.2.1 Rugosité artificielle en pierre poreuse (RA.PP) .....	28
III.2.2 Rugosité artificielle en pierre poreuse (R. G25-50) .....	31
III.2.3 Rugosité artificielle en pierre poreuse (R. G15-25): .....	34
III.3 Analyse des erreurs .....	35
III.4 Modélisation de la rugosité : .....	38
III.4.1 Corrélation entre le Manning n, Coefficient entropique M et la pente i .....	38
III.4.1 Corrélation entre le Manning n et Coefficient entropique M : .....	41
III.5 Conclusion.....	42
Références bibliographiques .....	43

## LISTE DES FIGURES

<b>FIG.I.1</b>	Ecoulement Uniforme .....	<b>3</b>
<b>FIG.I.2</b>	Apparition des tourbillons lors du passage d'un écoulement laminaire à turbulent.....	<b>6</b>
<b>FIG.I.3</b>	Décomposition d'un écoulement à surface libre.....	<b>7</b>
<b>FIG.II.1</b>	Canal à pente variable.....	<b>18</b>
<b>FIG.II.2</b>	Réservoir d'eau.....	<b>18</b>
<b>FIG.II.3</b>	Pompe à eau .....	<b>19</b>
<b>FIG.II.4</b>	Débitmètre.....	<b>19</b>
<b>FIG.II.5</b>	Elément d'entrée .....	<b>20</b>
<b>FIG.II.6</b>	Elément d'entrée (Clapet).....	<b>20</b>
<b>FIG.II.7</b>	Section de mesure .....	<b>20</b>
<b>FIG.II.8</b>	Interrupteur .....	<b>21</b>
<b>FIG.II.9</b>	Armoire de commande .....	<b>21</b>
<b>FIG.II.10</b>	Système d'ajustage de l'inclinaison .....	<b>22</b>
<b>FIG.II.11</b>	Limnimètre .....	<b>22</b>
<b>FIG.III.12</b>	Micro-moulinet .....	<b>23</b>
<b>FIG.III.13</b>	Courbes des analyses granulométrique .....	<b>24</b>
<b>FIG.II.14</b>	Différents types de rugosité .....	<b>24</b>
<b>FIG.II.15</b>	Canal avec de rugosité artificielle .....	<b>24</b>
<b>FIG.II.16</b>	Canal avec de rugosité préparée .....	<b>25</b>
<b>FIG.III.17</b>	Mise en marche de dispositif .....	<b>26</b>
<b>FIG.III.1</b>	Profils des vitesses (RA. PP, $i=0.1\%$ ) .....	<b>29</b>
<b>FIG.III.2</b>	Profils des vitesses (RA. PP, $i=0.75\%$ ) .....	<b>30</b>
<b>FIG.III.3</b>	Profils des vitesses (R.G 25-50, $i=0.5\%$ ) .....	<b>32</b>
<b>FIG.III.4</b>	Profils des vitesses (R.G 25-50, $i=0.75\%$ ) .....	<b>33</b>
<b>FIG.III.5</b>	Profils des vitesses (R.G 15-25, $i=0.1\%$ ) .....	<b>35</b>
<b>FIG.III.6</b>	Profils des vitesses (R.G 15-25, $i=0.75\%$ ) .....	<b>36</b>
<b>FIG.III.6</b>	Vitesse mesurée / Vitesse modélisée .....	<b>38</b>
<b>FIG.III.7</b>	Coefficients de régression normalisée (Intervalle de confiance 95%) .....	<b>40</b>
<b>FIG.III.8</b>	Relation entre les valeurs réelles et estimées du coefficient de Manning $n=f(i,M)$ .....	<b>40</b>
<b>FIG.III.9</b>	Relation entre les valeurs réelles et estimées du coefficient de Manning $n=f(M)$ .....	<b>41</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>TAB-I-1</b>	Valeurs de $\Pi$ proposées dans la littérature .....	9
<b>TAB-III-1</b>	Mesure des vitesses ponctuelles sur fond rugueux (pente $i=0.1\%$ ) ...	28
<b>TAB-III-2</b>	Mesure des vitesses ponctuelles sur fond rugueux R.G 25-50 (pente $i=0.5\%$ ).....	31
<b>TAB-III-3</b>	Mesure des vitesses ponctuelles sur fond rugueux R.G 15-25 (pente $i=0.1\%$ ).....	34
<b>TAB-III-4</b>	Moyennes des erreurs d'estimation des vitesses .....	37
<b>TAB-III-5</b>	Paramètres statistiques de la série de mesures.....	38
<b>TAB-III-6</b>	Paramètres statistiques de la série de mesures .....	39
<b>TAB-III-7</b>	Test de Fisher .....	39

### **Introduction générale**

La mesure de débits dans les cours d'eau et canaux se fait principalement par la prospection du champ de vitesses, qui est l'empilement des profils des vitesses dans les verticales aux sens de l'écoulement. Cette exploration se fait des fois difficilement surtout en temps de crue, c'est pour cela que les modèles de représentation des profils constituent une alternative qui permet plus d'efficacité dans l'estimation du champ de vitesses et plus de précision dans les mesures.

Les profils des vitesses ont fait l'objet de plusieurs recherches, surtout après les grands travaux de Von Karman sur la couche limite qui conditionne la contrainte de frottement du fond (et des parois), les travaux les plus importants se sont focalisés sur des modèles logarithmiques basés sur une approche hydrodynamique, ce qui entraîne forcément des hypothèses et restrictions dans la mise en œuvre. Ces restrictions ont favorisé l'émergence d'autres approches dont celle développée par [Chiu \(1987\)](#) basée sur la théorie de l'information de [Shannon \(1948\)](#).

L'approche entropique suppose un paramètre entropique exprimé en fonction du rapport entre la vitesse moyenne et celle maximale dans une section d'écoulement, cette dernière est généralement constante dans les cours d'eau et les canaux.

Ce travail vise à effectuer des expérimentations de laboratoire sur un canal prismatique long, les vitesses seront mesurées sur divers fonds rugueux pour diverses pentes afin de comparer les vitesses mesurées et les modèles probabiliste et logarithmique. Ainsi que l'étude de la relation de la rugosité avec les paramètres facilement mesurable et constant tels que la pente et le paramètre entropique. Le document est scindé en trois parties ; la première concerne l'état de l'art, une synthèse bibliographique concernant la thématique étudiée, la deuxième traitera du matériel et méthodes et la troisième synthétisera les résultats obtenus et la discussion et interprétation de ces derniers.



## I.1 Introduction

La mesure de la vitesse est non seulement une préoccupation de l'ingénieur mais aussi celle du chercheur car celle-ci peut se révéler compliquée à mettre en œuvre dans certains cas. Afin de prendre une mesure de vitesse dans une section d'un écoulement à surface libre, l'écoulement doit présenter un aspect uniforme ou du moins stable afin que la mesure prenne sens et ne varie ni dans le temps ni dans l'espace. Cela peut être possible dans des conditions de laboratoire avec un canal suffisamment long pour que le régime pleinement développé puisse s'établir et des conditions amont et aval bien maîtrisées afin que l'écoulement ne soit ni perturbé ni influencé par les dispositifs d'entrée et de sortie du canal. Cependant, en rivière, il est toujours difficile de retrouver ce cas de fait. En effet, les géométries complexes que présentent les rivières (canaux composés, méandres, jonctions, coudes...) ainsi que les conditions hydrauliques très souvent perturbées (présence par exemple de déversoir, de chutes, de seuils ou encore des barrages) engendrent des écoulements non-uniformes, turbulents et très instables où la mesure est souvent difficile à prendre ou à interpréter. Ainsi, la mesure de la vitesse dans les rivières passe par la bonne connaissance du champ de vitesse et ce quelles que soient la géométrie du canal ou les conditions hydrauliques de l'écoulement. Plusieurs chercheurs (Von Karman, (1930), Prandtl, (1932), Sellin, (1964), Chiu (1987), Tominaga & Nezu, (1991), Hearshy, (1995), Chang Chen (1998), Chiu et Chen, (1999), Fenton, (1999), Ning Chien Tung (2001), Yang (2004), Wormleaton et al., (2004) et Ardiclioglu (2005)) se sont intéressés à l'étude du champ de vitesse dans les canaux. Dans ce chapitre une revue de littérature sur la naissance de la turbulence dans un écoulement à surface libre et son influence le profil des vitesses. Aussi, les différentes équations dédiées aux profils de distribution des vitesses seront présentées.

## I.2 Rappel théorique sur l'écoulement a surface libre

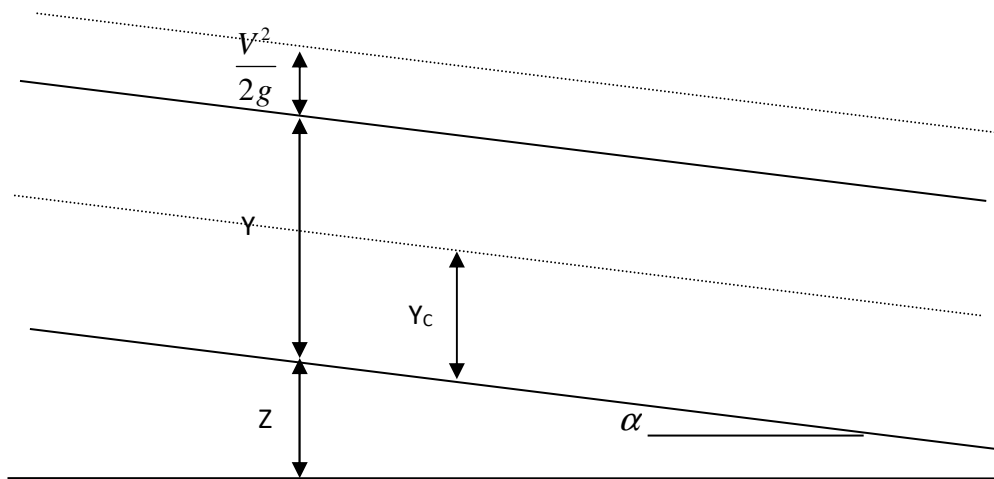
Les écoulements à surface libre sont classés en différents types :

### I.2.1 Ecoulement uniforme et non uniforme

L'écoulement est uniforme si pour une longueur donnée du canal, la vitesse, la profondeur, la pente et la section du canal restent constantes :

$$\frac{\partial V}{\partial X} = 0 \quad , \quad \frac{\partial Y}{\partial X} = 0$$

Dans ce cas la ligne de charge, la surface d'eau ainsi que le radier sont parallèles (Fig. I.1).



**Fig. I.1.** Ecoulement Uniforme

### I.2.2 Ecoulement permanent et non permanent

Si les caractéristiques de l'écoulement (Vitesse, profondeur, débit) restent constantes dans une section du canal, et ne change pas par rapport au temps, l'écoulement est dit permanent.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad , \quad \frac{\partial Y}{\partial t} = 0$$

### I.2.3 Ecoulement Laminaire et Turbulent

L'écoulement est dit laminaire si le nombre de Reynolds est inférieur à 500 ou 600.

$$R_e = \frac{\rho \times V \times R}{\mu}$$

R : Rayon hydraulique  $R = \frac{A}{P}$

A : Section de l'écoulement

P : périmètre mouillé.

### I.2.4 Ecoulement Fluviale, Critique et Torrentielle

L'écoulement est supposée fluvial si le nombre de Froude  $F = \frac{V}{\sqrt{g \times D}}$  est inférieur à 1.

D : Profondeur hydraulique  $D = \frac{A}{T}$

A : section de l'écoulement

T : largeur de la surface d'eau au sommet du canal.

Si : ( F=1 ), l'écoulement est Critique :

Pour un canal rectangulaire :  $D = \frac{A}{T} = Y$  donc  $F = \frac{V}{\sqrt{g \times Y}} = 1$

D'où :  $\frac{V^2}{g \times Y} = \frac{Q^2}{g \times L \times Y_{3c}^3} = 1$

De cela :  $Y_c = \left( \frac{Q^2}{L^2 \times g} \right)^{\frac{1}{3}}$  , (  $\frac{Q}{L} = q$  )

$$Y_c = \left( \frac{q^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (I.1)$$

Si : ( F>1 ) l'écoulement est Torrentiel

### I.3 Calcul des écoulements permanents uniformes

Il existe plusieurs formules de calcul de débits pour les régimes uniformes, les plus répondus sont :

a- Formule de Chézy :

La formule de Chézy est de la forme :

$$Q = A \times C \sqrt{R \times i} \quad (\text{I.2})$$

A : section de l'écoulement

C : coefficient de Chézy ;

R : rayon hydraulique ;

i : pente du radier.

b - Formule de Manning :

L'expression du coefficient de Chézy dans cette formule est :

$$C = \frac{1}{N} \times R^{\frac{1}{6}} \quad (\text{I.3})$$

N : coefficient de Manning qui caractérise la nature du canal.

Donc :

$$Q = \frac{1}{N} \times A \times R^{\frac{2}{3}} \times i^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.4})$$

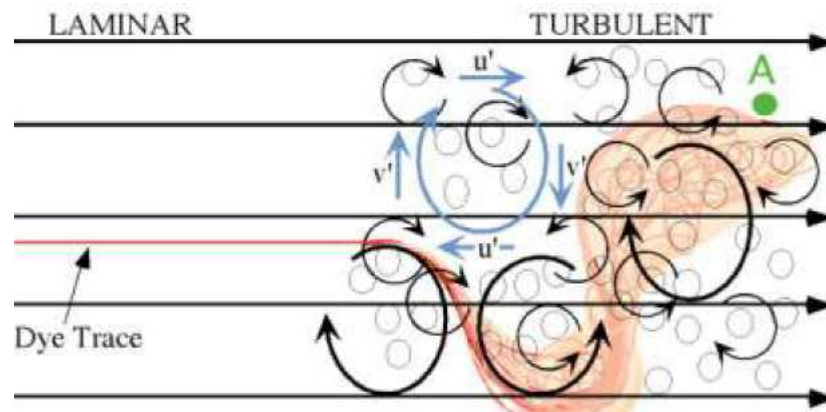
### I.5 Définition de la turbulence

La turbulence est un phénomène difficile à expliquer bien qu'elle soit omniprésente. Métais, (2004) a défini la turbulence avec quatre caractéristiques :

- Mise en jeu de phénomènes instationnaires.
- Écoulement imprévisible d'un point de vue déterministe.
- Mise en jeu d'une grande gamme d'échelles spatiales et temporelles.
- Propriétés de mélange accrues par rapport à la diffusion moléculaire.
- La turbulence se manifeste par un grand désordre qui conduit à une dissipation de l'énergie et crée un mélange.

Dans une conduite lisse, un écoulement laminaire se décrit comme la superposition de lames d'eau parallèles glissant les unes sur les autres. Lorsqu'une perturbation n'est plus amortie par l'écoulement, celle-ci prend son énergie de l'écoulement laminaire et commence à grandir. Le fluide entame alors sa transition vers la turbulence. L'écoulement turbulent se caractérise

par un mouvement tourbillonnaire présentant une large gamme de dimensions de tourbillons et de vitesses de rotation (Figure 1.2).



**Fig. I.2** Apparition des tourbillons lors du passage d'un écoulement laminaire à turbulent

### I.5.1 Notion de couche limite turbulente

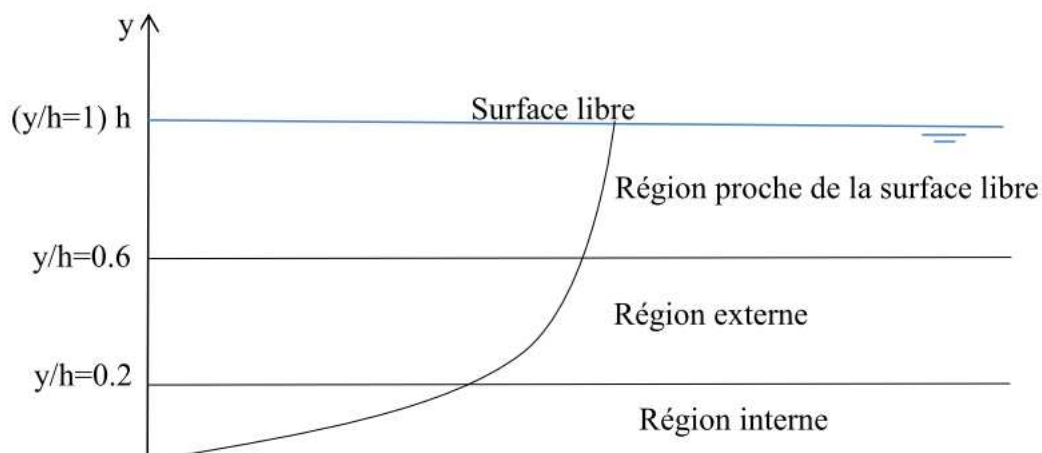
Lorsqu'un écoulement rencontre une paroi, la condition de non glissement le force à ralentir. Il y a ainsi naissance de tourbillons qui sont alors diffusés, transportés et amplifiés. Une fois que les tourbillons sont générés, une partie de l'écoulement va continuer son développement en l'absence des parois pendant qu'une autre partie longera la paroi et évolue sous son influence. Il s'agit des couches limites de l'écoulement. La couche limite est définie comme la région à la surface d'un corps où la vitesse est inférieure à 1% de la vitesse loin du corps et où les effets de la viscosité et de la rugosité sont importants. Dans une couche limite les vitesses passent d'une valeur nulle, contre les parois, à des valeurs du même ordre que la vitesse moyenne. L'épaisseur de cette couche limite va augmenter au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée pour atteindre le niveau de la surface libre au bout d'une distance «  $L_e$  » que l'on nommera Longueur d'établissement. Au-delà de «  $L_e$  », le profil de vitesse ne varie plus longitudinalement, on dit que l'écoulement est développé.

Une première estimation a été donnée par [Rouse \(1946\)](#). Ce dernier a indiqué que cette longueur se situe à 50 fois le diamètre de la conduite, elle peut donc être prise à  $200R_h$  où  $R_h$  est le rayon hydraulique.

Raju, Asawa, & Mishra, (2000) ont quant à eux étudié l'écoulement dans un canal rectangulaire et ont proposé une valeur expérimentale allant de 50 à 100h où h est la hauteur d'eau, ils ont effectué leur étude sur un canal avec différents coefficients d'aspect Ar (=largeur à la surface/hauteur d'eau) compris entre 6 et 16 et en ont déduit que pour un écoulement constant une longueur minimum de 60h est nécessaire.

Selon (Nakagawa & Nezu, 1993) et Balachandar, Blakely, Tachie, & Putz, 2001), un écoulement à surface libre peut être divisé en trois zones (Figure I.3) :

- La région interne : zone proche parois telle que  $y/h < 0.2$
- La région externe telle que  $0.2 < y/h < 0.6$
- La zone proche de la surface libre telle que  $0.6 < y/h < 1$



**Fig. I.3** Décomposition d'un écoulement à surface libre

La région interne est plus petite que la région externe. Son épaisseur est d'environ 10 à 20% de l'épaisseur totale (Cebeci & Smith, 1974). À l'inverse de la couche externe, l'écoulement dans la couche interne dépend principalement des conditions à la paroi (rugosité de la surface en particulier). La loi de la vitesse dans cette zone est appelée « loi de paroi ». Dans cette région, l'énergie cinétique turbulente produite à partir de l'écoulement moyen est supérieure au taux de dissipation de cette même énergie. Cette zone est composée de trois régions :

**1. Une sous-couche visqueuse collée à la paroi** : Celle-ci est le lieu des effets visqueux. Dans cette zone il n'y a pas de fluctuation turbulente mais uniquement des contraintes visqueuses importantes.

**2. Une région intermédiaire de transition :** Dans cette zone, plus on s'éloigne de la paroi plus les contraintes turbulentes augmentent. Elles évoluent d'une valeur nulle à l'interface sous-couche visqueuse/zone de transition jusqu'à la région entièrement turbulente.

**3. Une région entièrement turbulente :** Dans cette région les contraintes sont à la fois visqueuses et turbulentes. La distribution de la vitesse longitudinale est déterminée par la loi logarithmique suivante (d'après (d'après (Von Karman, 1930) et (Prandtl, 1932))) :

$$\frac{U}{u_*} = A \ln \frac{u_* x}{\nu} + B \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$A = \frac{1}{K}$ , K étant la constante de Von Karman (indépendante de la nature de la paroi) ;

B : Constante dépendante de la nature de la paroi.

$u_* = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}}$  Avec  $\rho$  est la masse volumique et  $\tau_p$  est la contrainte de cisaillement de la paroi.

### *Région externe*

Cette zone est caractérisée par une taille de tourbillon proportionnelle à l'épaisseur de la couche limite ( $\delta$ ). La distribution de la vitesse dans cette région est donnée par la loi de déficit de vitesse selon :

$$\frac{U_{\max} - U}{u_*} = -\frac{1}{k} \ln \left( \frac{x}{\delta} \right) \quad (\text{I.4})$$

Coles, (1956) propose une correction de la formule précédente afin d'évaluer la distribution de la vitesse dans la partie turbulente entièrement développée ainsi que dans les régions internes et externes :

$$\text{Paroi lisse : } \frac{U}{u_*} = A \ln \frac{u_* x}{\nu} + B + \frac{\pi \pi}{k} 2 \sin^2 \left( \frac{\pi x}{2\delta} \right) \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Paroi rugueuse : } \frac{U}{u_*} = A \ln \frac{u_* z}{k_s} + B_s + \frac{\Pi}{k} 2 \sin^2 \left( \frac{\pi z}{2B} \right) \quad (\text{I.6})$$

Avec  $z$  : la distance à la paroi ;  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$  ;  $\Pi$  et  $B$  c'est des paramètres.

Différentes valeurs ont été proposées pour les paramètres  $B$  et  $\Pi$ . Le tableau suivant résume les différentes valeurs de  $\Pi$  :

**Tableau I.1** Valeurs de  $\Pi$  proposées dans la littérature

Auteurs	Valeur de $\Pi$
Coles, (1956)	0.55
Nezu & Rodi, (1986)	0.2
Kirkgöz, (1989)	0.1
Cardoso et al., (1989)	0.08 pour $0.2 < \frac{z}{h} < 0.7$
Pollert & Bares, (2002)	0.31

De même, il existe une multitude de méthodes dans la littérature pour estimer la distribution de vitesse dans une section d'écoulement. Les approches logarithmiques traditionnelles décrivent des profils de vitesse en employant des équations avec un nombre limité de paramètres qui peuvent être déterminés sur la base des points de vitesse prélevés le long de chacune des verticales. En particulier, ces approches ont besoin d'un certain nombre de mesures de vitesse égal ou plus grand que les paramètres supposés, avec la position des points de vitesse prélevés. [Fenton \(2002\)](#) a présenté un procédé modifié des trois points traditionnels pour estimer la vitesse moyenne le long d'une verticale, En fait, pour le procédé proposé (l'entropie), le prélèvement a été effectué seulement à un seul point. D'autres approches intéressantes ont été développées par [Yang \(2004\)](#) et [Ardiclioglu \(2005\)](#). Ils ont présentés un facteur de Dip-correction pour rendre en compte le phénomène d'immersion de la vitesse (les équations ne représentent pas la distribution près de lit rugueux et près de la surface libre lorsque la vitesse maximale ne se trouve pas atteinte à la surface libre). Dans la partie suivante, les différentes méthodes d'estimation de la distribution de vitesse dans une section d'écoulement seront présentées.



## I.6 Lois de Distribution de vitesse

### I.6.1 Loi logarithmique

La distribution de vitesse dans l'écoulement uniforme d'un canal deviendra stable quand la couche limite sera entièrement développée. Dans la couche limite turbulente, la distribution peut écrire [Chow \(1959\)](#) :

$$\tau = \rho l^2 \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (\text{I-7})$$

Où le  $\rho$  : masse volumique, où  $w$  est le poids spécifique du fluide et  $g$  : est l'accélération de la gravité,  $l$  : une longueur du mélange ;  $\frac{dv}{dy}$  : gradient de vitesse à la distance normale  $y$  de la surface libre.

Avant d'obtenir une expression de la répartition de vitesse à partir de l'équation différentielle (I.7), il paraît utile d'introduire quelques hypothèses quant à la longueur du mélange,  $l$ , et la répartition des tensions de frottement,  $\tau$ . (2) que la longueur du mélange est proportionnel à  $y$ . (3) On admettra que la tension de frottement,  $\tau$ , est constante à travers tout l'écoulement ce qui n'est certainement juste, mais nécessaire selon Prandtl et qu'elle est égale à sa valeur à la paroi,  $\tau_0$ , depuis l'effort de cisaillement à la surface du canal est égal à l'unité de la force tractive, la deuxième prétenction donne le  $\tau = \tau_0$ . De ces deux suppositions, l'Equation (I-7) devient comme suite :

$$dv = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \frac{dy}{y} \quad (\text{I.8})$$

Où  $k$  est constant pour la proportionnalité entre  $l$  et  $y$ . la valeur de  $k$  a été déterminée par beaucoup d'expérience pour être environ 0,4. L'intégration de l'équation (I-8) donne :

$$v = 2.5 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln \frac{y}{y_0} \quad (\text{I.9})$$

Où  $y_0$  est la constante de l'intégration. De l'équation (I.7) et  $w = \rho g$ , on peut écrire que

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{gRI} = V_f \quad (\text{I.10})$$

La quantité représentée par  $V_f$  est les dimensions d'une vitesse. Cette quantité varie avec le  $\tau_0$  (vitesse de cisaillement). Ainsi, l'équation (I-9) peut être écrite comme suit :

$$v = 2.5V_f \ln \frac{y}{y_0} \quad (\text{I.11})$$

Cette équation indique que la vitesse dans la région turbulent est une fonction logarithmique de la distance  $y$ . Cette équation est connue comme la loi universelle de Prandtl Von Karman de la distribution de vitesse.

Cette loi a été vérifiée par plusieurs expériences. Les résultats indiquent une similitude surprenante entre la distribution observée et calculée et, en conséquence, elle offre la justification raisonnable pour l'usage de cette loi logarithmique dans des problèmes pratiques. Quand la surface est lisse, la constante  $y_0$  dans l'Equation (I-11) a été trouvé dépendante seulement de la vitesse de frottement et la viscosité cinématique

$$y_0 = \frac{m\nu}{V_f} \quad (\text{I.12})$$

Où  $m$  est une constante égale environ 1/9 aux surfaces lisses. Pour les surfaces onduleuses, la valeur de  $m$  dépendra de la forme des surfaces de vagues. La valeur de  $m$  dépendra de la forme des profils des vagues. En substituant l'équation (I-12) pour  $y_0$  dans l'Equation (I-11) et la simplification,

$$v = 5.75V_f \log \frac{9yV_f}{\nu} \quad (\text{I.13})$$

Cette équation donne la distribution de vitesse dans les surfaces lisses d'un écoulement turbulent. Quand la surface est rugueuse, la constante  $y_0$  est trouvé dépend de la taille de rugosité ( $K$ ) ; c'est-à-dire,

$$y_0 = mk \quad (\text{I.14})$$

Où  $m$  : est égal approximativement à  $1/30$ . Substituant l'équation (I-14) pour  $y_0$  en l'équation (I-11) et par simplification :

$$v = 5.75V_f \log \frac{30y}{k} \quad (\text{I.15})$$

Cette équation donne la distribution des vitesses dans un écoulement turbulent à travers des surfaces rugueuses. On devrait noter que la taille de rugosité ( $k$ ) dans cette équation est le diamètre moyen des grains de sable employés par Nikuradse ; on le connaît spécifiquement comme la rugosité  $d$ .

En l'ensemble le profil des vitesses logarithmique suit le modèle suivant qui est considérée comme modèle généraliste (Bonakdari,2006) :

$$v = \frac{U_*}{k} \log \frac{y}{y_0} \quad (\text{I.16})$$

Où :

$U_*$  : Vitesse de frottement

$k$  : Paramètre universel de Von Karman

$y_0$  : profondeur relative à la valeur nulle de la vitesse , ou plus précisément ; paramétré qui vise à stabiliser et affiner le modèle logarithmique.

$y$  : Profondeur du point dont on veut déterminer la vitesse.

### I.6.2 Méthode de Fenton

Pour présenter la possibilité que le profil de vitesse écarte de la forme logarithmique et qu'il peut présenter à une valeur maximale à un certain point sous la surface de l'eau, une limite additionnelle peut être ajoutée à l'équation de Von Karman. En particulier, [Fenton \(2002\)](#) a proposé l'expression (I.7) :

$$U(y) = \frac{U_*}{K} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) + a_1 \frac{y}{D} \quad (\text{I.17})$$

Avec :

$a_1$  : coefficient inconnu, ayant la même unité que la vitesse

$D$  : profondeur verticale.

Si trois points de vitesse,  $u_1$ ,  $u_2$  et  $u_3$ , sont prélevées en différentes positions  $Y_1$ ,  $Y_2$  et  $Y_3$ , toutes les trois quantités ( $u^*/k$ ,  $Y_0$  et  $a_1$ ) inconnues dans l'équation (I.8), peuvent être estimée par la procédure de calibrage.

L'équation (I.16) peut être intégrée pour obtenir la valeur de la vitesse moyenne d'écoulement le long de la verticale :

$$\bar{u} = \int_0^D U(y) dy = \frac{U_*}{K} \ln\left(\frac{D}{y_0} - 1\right) + \frac{a_1}{2} \quad (\text{I.18})$$

Fenton (2002) a présenté une limite quadratique additionnelle dans l'équation (I.16) pour reproduire mieux la courbure du profil des vitesses, rapportant :

$$U(y) = \frac{U_*}{K} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) + a_1 \left(\frac{y}{D}\right) + a_2 \left(\frac{y}{D}\right)^2 \quad (\text{I.19})$$

Où :

$a_2$  : coefficient inconnu additionnel estimé à partir des mesures de vitesse. Dans ce dernier cas, le prélèvement de quatre points de vitesse à différentes positions le long de chacune des verticales est nécessaire.

### I.6.3 Méthode de Yang

Yang et al (2004) ont proposé une loi logarithmique modifiée (dip modified logarithmic) pour la distribution des vitesses dans l'écoulement uniforme lisse dans un canal ouvert, basé sur deux profondeurs logarithmiques : le lit ( $\ln(y/y_0)$ ) et la surface de l'eau ( $\ln(1-y/D)$ ) :

$$U(y) = U_* \left( \frac{1}{K} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) + \frac{\mu}{K} \ln\left(1 - \frac{y}{D}\right) \right) \quad (\text{I.20})$$

" $\mu$ " : Facteur de correction (dip-correction), dépendant seulement de la profondeur relative de l'endroit de la vitesse maximale  $Y_{\max}$ , et de la profondeur d'eau  $D$ ,  $\mu$  peut être estimé en utilisant l'équation (I.10) égalisant  $du/dy$  à 0, en obtenant :

$$\mu = \frac{D - y_{\max}}{y_{\max}} \quad (\text{I.21})$$

Trois points de vitesse, prélevés à des distances différentes du lit, sont nécessaires pour décrire par l'équation (I.10) le profil entier des vitesses le long de la verticale. Cette méthode est physiquement basée et dérivée d'une expression approximative de la distribution d'effort de cisaillement de Reynolds pour les écoulements uniformes dans un canal rectangulaire.

### I.6.4 Méthode de Chui

En raison de la présence d'une surface libre et du frottement le long du lit du canal, la vitesse d'écoulement dans une section transversale du canal n'est pas uniformément distribuée. Les modèles de distribution de vitesse existants tels que la loi de puissance et la loi universelle de Prandtl-Von Karman peuvent représenter uniquement les profils de distribution, où la vitesse augmente avec la profondeur.

Il est également bien connu que les modèles existants sont inapplicables au voisinage du lit du canal et à la surface de l'eau. Par conséquent, un modèle utile de distribution de vitesse est nécessaire tel que l'équation de distribution de la vitesse de Chui. Elle est capable de représenter un profil de vitesse pour la profondeur de l'eau entière même quand la vitesse maximale se produit au-dessous de la surface de l'eau.

Chiu (1987) a proposé un lien entre le domaine de la probabilité et de la physique. Il a dérivé des expressions de la fonction de répartition de probabilité cumulée en termes de coordonnées dans l'espace physique. La fonction de densité de probabilité de la vitesse a été alors obtenue en appliquant le principe d'entropie maximum (Chiu, 1987, 1988, 1989 ; Barbé et als, 1991). L'expression de Chui est donnée par la formule suivante :

$$\frac{u_m}{u_{\max}} = \frac{1}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{\bar{\xi} - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (\text{I.22})$$

Ou :

$$\frac{u}{u_{\max}} = \frac{1}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{\xi}{\xi_{\max 0}} \right] \quad (\text{I.23})$$

Avec :  $u_m$  est la vitesse moyenne,  $u$ , vitesse ponctuelle,  $u_{\max}$  : la vitesse maximale,  $M$  paramètre d'entropie,  $\xi_0$  est la valeur de  $\xi$  quand  $u=0$  et  $\xi_{\max}$  est la valeur de  $\xi$  quand  $u$  est la vitesse maximale.

Et avec:

$$\zeta = \frac{y}{D - y_0} \text{Exp} \left[ 1 - \frac{y}{D - y} \right] \quad (\text{I.24})$$

Où :

$D$  : profondeur de l'écoulement,  $y_0$  : paramètre de réglage du modèle.

A partir de cette formulation probabiliste, la vitesse moyenne ( $U_{\text{moy}}$ ) peut être exprimée comme une fonction linéaire de la vitesse maximale ( $U_{\text{max}}$ ) par un paramètre d'entropie "M" sans dimensions (Chiu, (1991), Chiu and Chen (1999)). Cette relation est la suivante :

$$\phi = \frac{\bar{u}}{u_{\max}} = e^M (e^M - 1)^{-1} - \frac{1}{M} \quad (\text{I.25})$$

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes méthodes utilisées dans la littérature pour décrire les profils de vitesses dans un écoulement à surface libre. Dans notre travail,

uniquement les équations de distribution de vitesse de Von Karman (logarithmique) et celle de Chui seront utilisées.

## **II.1 Introduction**

Dans un travail expérimental, la réussite de ce dernier à atteindre ces objectifs est tributaire du matériel de laboratoire utilisé et de l'efficacité du protocole expérimental suivi ; dans ce qui suit les détails des différents dispositifs expérimentaux et de matériels utilisés durant ce travail seront présentés à savoir : Canal rectangulaire à pente variable, limnimètre, micro- moulinet et les plaques de rugosité en plexiglass.

## **II.2 Description des instruments de laboratoire**

Pour la réalisation de nos expériences on a utilisé les instruments de laboratoire ci-après :

### **II.2.1 Canal rectangulaire à pente variable**

Le canal hydraulique **HM162** est un canal à pente variable, ses parois latérales transparentes permettent de visualiser l'écoulement sur toute la longueur de la veine de longueur 12.5m, de section rectangulaire de 309 x450 mm<sup>2</sup>, à pente variable et fonctionnant en circuit fermé. Le déversement est contrôlé par un coffret de commande et une pompe centrifuge qui assure la circulation de l'eau du réservoir aval vers le réservoir amont par une conduite unique. La conduite d'amenée est équipée d'un débitmètre électromagnétique permettant la mesure du débit, variateur de pente et quatre réservoirs de 1000 litre (**Fig. II.1**). Ce canal peut être utilisé pour réaliser différentes expériences, à savoir :

- Influence de la rugosité sur l'écoulement
- Identification des différents régimes d'écoulement : torrentiel, critique et fluvial.
- Etude des profils des vitesses.
- Ressaut hydraulique
- Ecoulement non stationnaire
- Déversoirs à paroi mince, à seuil épais, à crête déversoirs et à crête siphon.
- Transport des sédiments.
- Vagues.
- Ecoulements au-dessus de différents types de seuils : à bord mince, épais, déversoir triangulaire.
- Mesures de débit dans une section critique.
- Etudes des courbes de remous.





**Figure II.1** : Canal à pente variable

### **II.2.2 Installation expérimentale et moyen de mesure**

Le canal **HM162** est réalisé sur toute sa longueur en verre épais présentant une bonne visibilité des phénomènes hydrauliques à l'intérieur du canal, de rugosité de fond uniforme et très lisse, il est assemblé par un montage spécial qui lui assure des parois parallèles et une section constante.

### **II.2.3 Composantes du canal et leurs utilisations**

Notre canal est composé des éléments suivant :

#### **II.2.3.1 Réservoir d'eau avec couvert**

Le remplissage des quatre réservoirs du canal se fait manuellement par un tuyau



**Figure II.2** Réservoir d'eau

### II.2.3.2 Pompe à eau

La pompe est composée d'une plaque de base pour permettre le bon positionnement et la fixation au sol. La pompe avec moteur à courant triphasé et un clapet d'arrêt est installée sur la pompe. La pompe est à vitesse variable ce qui permet le contrôle du débit sans vannage ce qui permet de garder un rendement optimal de cette dernière.



**Figure II.3** Pompe à eau

### II.2.3.3 Débitmètre

Un débitmètre électromagnétique est installé dans la conduite entre la pompe à eau et l'élément d'entrée, ce débitmètre joue aussi le rôle de compteur qui indique le volume total d'eau pompée dans le canal. En plus de ce débit mètre ; il est possible de lire les mesures des débits directement sur le tableau de commande sur l'afficheur du régulateur de vitesse, ce qui donne la possibilité d'une double vérification du débit d'écoulement.

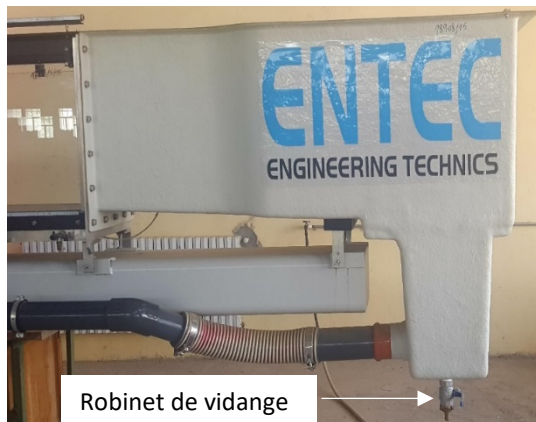


**Figure II.4** Débitmètre

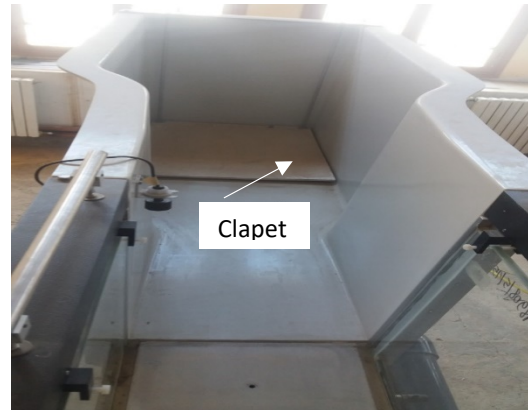
### II.2.3.4 Élément d'entrée :

L'eau qui rentre dans l'élément d'entrée s'écoule à travers un redresseur d'écoulement

- Une plaque d'amortissement qui flotte à la surface d'eau dans l'élément d'entrée.
- L'élément d'entrée peut être purgé avec un robinet.



**Figure II.5** Elément d'entrée



**Figure II.6** Elément d'entrée (Clapet)

### II.2.3.5 Section de mesure

La section de mesure permet d'avoir une longueur de travail de 12.5m ce qui permet de visualiser divers phénomènes hydraulique d'une manière efficace, avec un fond qui permet de le montage de plaques de rugosité artificielle qui permettront de varier les coefficients de rugosité du fond. La largeur de la section de mesure est de 309mm (**Fig. II.7**).



**Figure II.7** Section de mesure

### II.2.3.6 Elément de sortie avec vanne

Un clapet est installé dans l'élément de sortie. Il permet de régler les différents niveaux d'eau dans la section de mesure de canal. Un dispositif anti débordement à **flotteur** est

installé dans l'élément de la sortie dont le rôle est le déclenchement automatique de l'arrêt de la pompe lorsque le niveau d'eau atteint 450 mm par rapport au fond de la section de mesure.

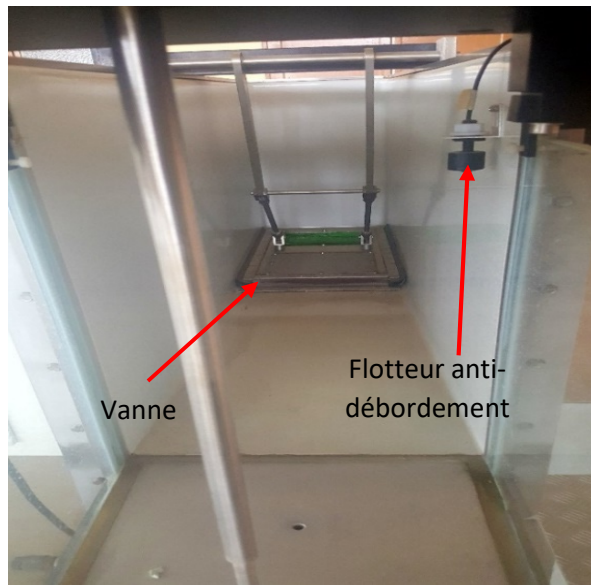


Figure II.8 : Interrupteur

II.2.3.7 Coffret de commande

L'armoire de commande permet de contrôler l'ensemble des fonctions du canal, elle permet de régler le débit d'écoulement avec précision de 0 à 134 m<sup>3</sup>/s. Elle permet aussi la commande du canal par ordinateur avec un logiciel adéquat.

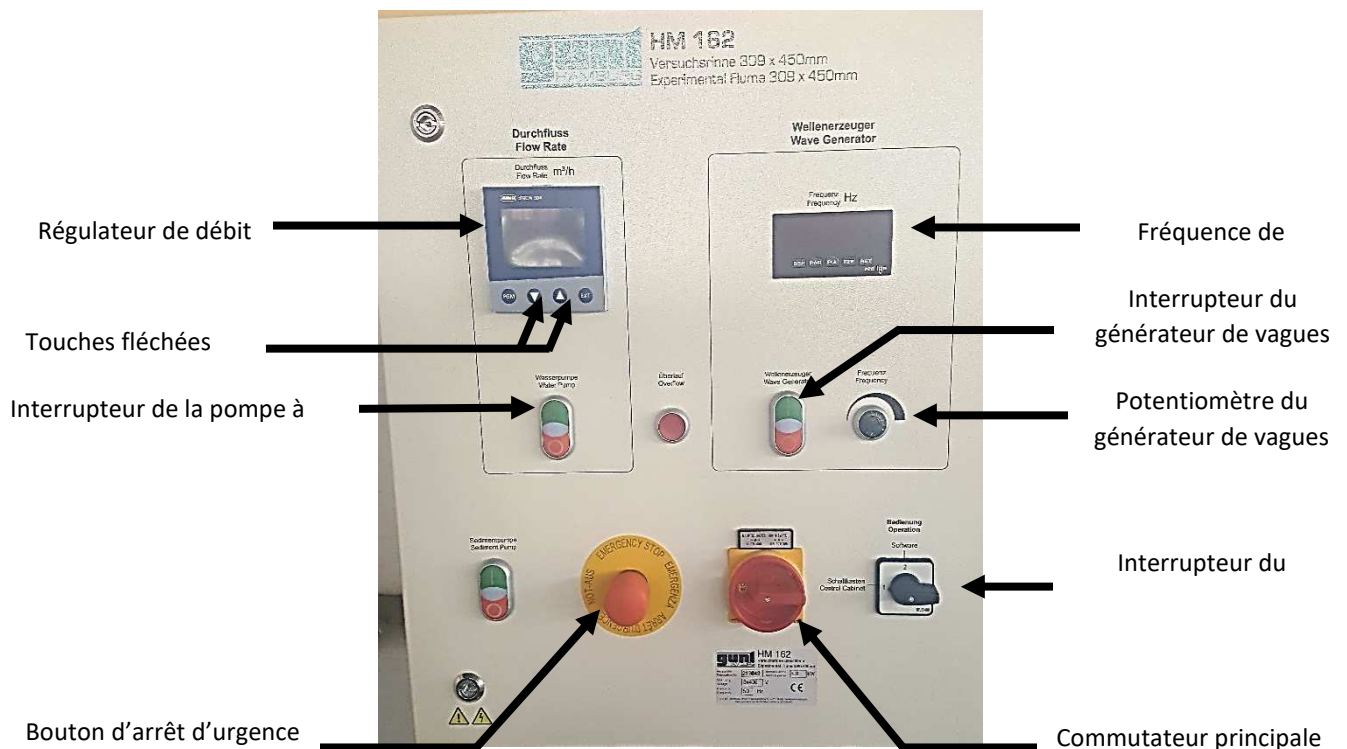


Figure II.9 : Armoire de commande



### II.2.3.8 Système d'ajustage de l'inclinaison

Le système électrique de de l'inclinaison est un accessoire disponible en option sur le coffret de commande du canal d'essai. Le canal d'essai peut être incliné en continu dans le sens de longueur de -0.5% jusqu'au +2.5%.



**Figure II.10** : Système d'ajustage de l'inclinaison

### II.3 Limnimètre

La mesure des hauteurs d'eau se fait par un limnimètre. Il est composé d'un support et une règle métallique graduée sur deux faces. La précision de lecture sur ce limnimètre est de l'ordre de  $\pm 0.1$  mm.



**Figure II.11** : Limnimètre

### II.4 Micro-moulinet

Le Micro-moulinet est utilisé pour mesure la vitesse d'écoulement dans le canal dont l'intervalle de mesure allant de 0,04 à 5 m/s.



Figure II.12 : Micro-moulinet

## II.5 Protocole expérimentale

### II.5.1 Mode de préparation de la rugosité

Nous avons monté des granulats en gravier de granulométrie différents sur des plaques en plastique plexiglas pour créer des fonds de différentes rugosités. Pour déterminer la granulométrie du gravier avons procédé comme suit :

- Tamisage du gravier de granulométrie différant ce fait au niveau de laboratoire de Béton (ENSH).
- Les gammes choisis varient entre (15-25mm) et (25- 50mm) voir courbe des analyses granulométriques.

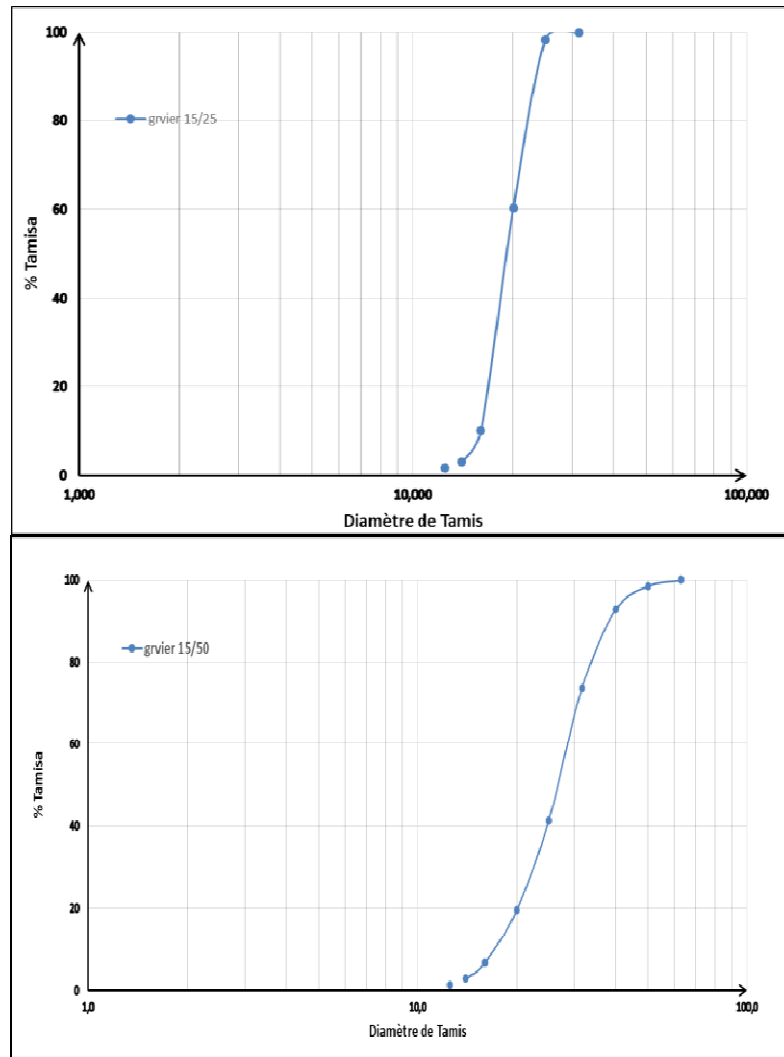
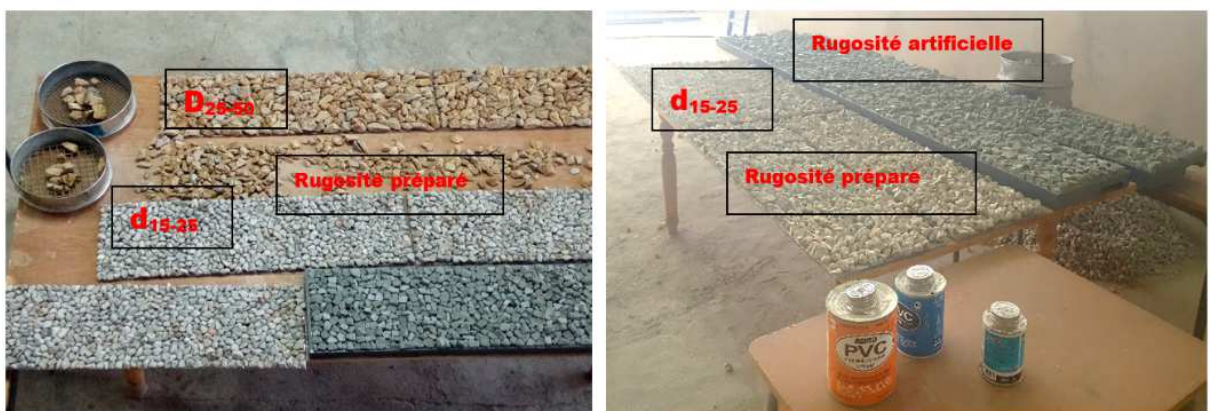


Figure II.13 Courbes des analyses granulométrique

- Les particules obtenues sont ensuite uniformément réparties et coller sur les plaques suite par une colle forte pour PVC

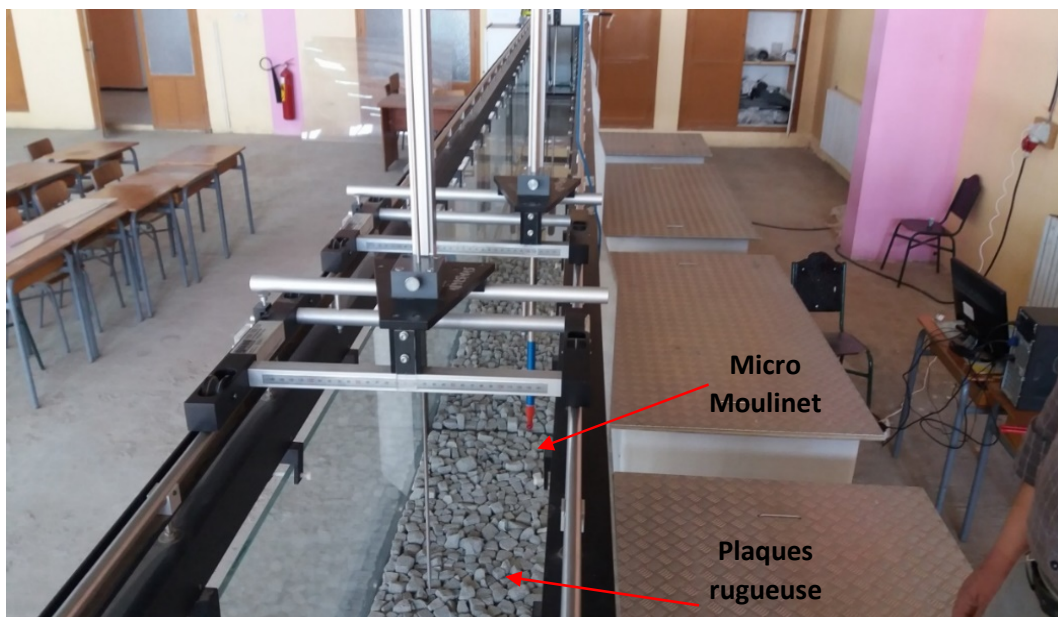


• Figure II.14 : Différents types de rugosité

**II.5.2 Description du protocole expérimental :**

Les expérimentations sont faites sur le canal prismatique rectangulaire a pente variable (figure II.1). les etapes à suivre sont classés dans l'ordre chronologique suivant :

1. Fixer la pente du canal à 0.1%, 0.50% ou 0.75% respectivement .
2. Placer les plaque de rugosité (0mm (fond lisse), 15.25mm, 25.50mm et rugosité artificielle (piérrres poreuses fournies avec le canal)) pour chaque essai (Figure I.14)



**Figure II.15 :** Canal avec de rugosité artificielle



**Figure II.16 :** Canal avec de rugosité préparée.





**Figure II.17 :** Mise en marche de dispositif

3. Pour chaque débit, les mesures des vitesses se font pour chaque verticale à cinq profondeurs différentes. On veillera à ce que l'ouverture de la tête du micromoulinet soit perpendiculaire au sens de l'écoulement.
4. Trois sections en travers (verticales) ont été choisies ; à savoir le centre du canal, 50 mm et 100 mm de l'axe de l'écoulement.
5. La mesure de la profondeur de l'écoulement se fait grâce au limnimètre pour chaque débit.
6. La mesure du débit s'effectue par le régulateur de débit (armoie de commande ) et par le débitmètre électromagnétique afin de garantir une meilleur précision.
7. Les profiles des vitesses peuvent être tracés directement sur la base des mesures de vitesses effectuées.

## II.6 Conclusion

Le laboratoire d'hydraulique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique nous a offert l'ensemble des équipements qui nous ont permis de mener à bien ce travail, le canal est très bien équipé et grace à ça longueur de travail importante on a pu réaliser les expérimentations sur des sections d'écoulements uniforme au milieu du canal, ce qui a permis de respecter l'hypothèse du parallélisme des lignes de courant et de la distribution hydrostatique des pressions afin d'appliquer les lois hydrauliques de l'écoulement uniforme avec un max de précision. Dans ce qui va suivre ; on procédera à la

présentation des résultats et leurs discussion et interprétation ainsi qu'a l'application des modèles de description des profiles des vitesses.

**III.1 Introduction**

Dans ce qui suit ; on résumera les résultats expérimentaux obtenus des profils des vitesses et des coefficients de rugosité, les résultats obtenus seront comparé avec les modèles cités dans la partie état de l’art. De même que l’étude du coefficient de rugosité de Manning, afin de dégager une relation de ce dernier avec le paramètre entropique et la pente du canal.

**III.2 Profils des vitesses**

La mesures des profils des vitesses a été faites pour trois rugosités différentes, pour chaque pente du canal on a pris quatre débits d’écoulement, pour chaque débit on a mesuré les profils des vitesses au niveau de trois (03) verticales ; une verticale axiale au niveau de l’axe du canal et deux autre à 50mm et 100mm de l’axe pour voire l’influence des parois du canal sur l’évolution des profils.

**III.2.1 Rugosité artificielle en pierre poreuse (RA.PP)**

Cette rugosité a pour but de créer une grande résistance à l’écoulement vue ça texture rugueuse, ces fonds rugueux ont été livrés avec le canal pour les besoins des TP d’hydraulique à surface libre.

Un aperçue sur ces résultats est synthétisé sur le tableau ci-après :

**Tableau III.1** Mesure des vitesses ponctuelles sur fond rugueux (pente  $i=0.1\%$ )

Q(m <sup>3</sup> /h)	H <sub>t</sub> (mm)	X = 0 mm		X = 50 mm		X = 100 mm	
		Y( mm)	V (m/s)	Y (mm)	V (m/s)	Y (mm)	V(m/s)
115	200	57	0,24	57	0,53	57	0,38
	200	100	0,75	85	0,72	85	0,76
	200	125	0,76	115	0,73	115	0,7
	200	150	0,77	135	0,77	135	0,71
	200	170	0,73	155	0,74	155	0,68
	200	195	0,63	180	0,6	180	0,56
100	185	57	0,34	57	0,50	57	0,4
	185	85	0,69	85	0,62	85	0,62
	185	115	0,70	115	0,68	115	0,68
	185	135	0,70	135	0,69	135	0,69
	185	155	0,72	155	0,68	155	0,65
	185	180	0,63	180	0,53	180	0,47
80	170	57	0,16	58	0,45	59	0,33
	170	80	0,57	80	0,59	80	0,58
	170	105	0,59	105	0,60	105	0,59
	170	125	0,65	125	0,65	125	0,62
	170	150	0,66	150	0,62	150	0,58
	170	165	0,50	165	0,46	165	0,42
60	155	57	0,22	46	0,33	55	0,34
	155	75	0,49	75	0,51	75	0,47

	155	95	0,52	95	0,54	95	0,55
	155	115	0,59	115	0,58	115	0,54
	155	135	0,59	135	0,54	135	0,50
	155	150	0,39	150	0,34	150	0,28

$H_t$  : la profondeur de l'écoulement,  $y$  : position du point de mesure par rapport au fond,  $X$  : distance entre la verticale de mesure et l'axe du canal.

La rugosité de Manning moyenne estimée pour ce fond rugueux est de 0,023.

A première vue en remarque que l'outil de mesures des vitesses (micro-moulinet) n'est pas bien adapté à la mesure en surface et proche du fond, vue que le gradient des vitesses dans ces deux zones sont assez importants, de ce fait lors de la comparaison des modèles des profils des vitesses on se focalisera plus sur les vitesses au milieu de la section d'écoulement.

Les profils des vitesses sont illustrés dans les figures ci-après, les profils entropiques sont ceux déduit à partir de l'équation (I.23) relative au modèle entropique des profils des vitesse, celle logarithmiques correspond à l'équation (I.16) :

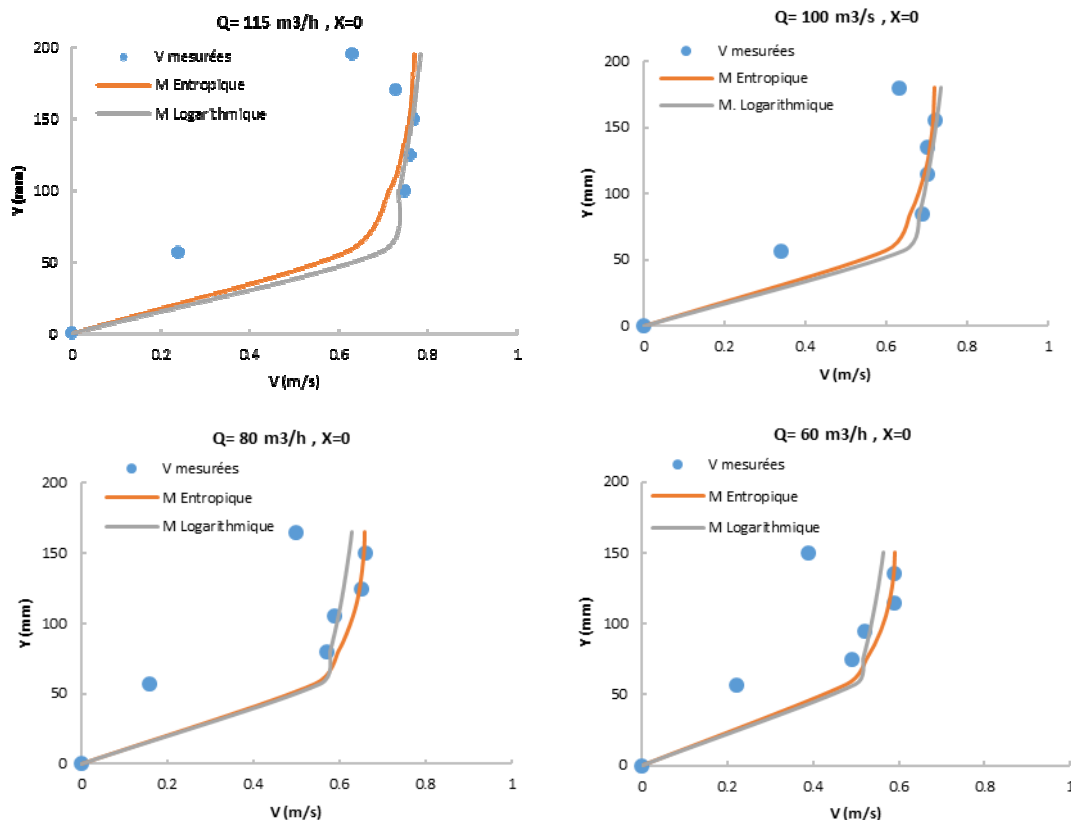


Figure III.1 Profils des vitesses (RA. PP,i=0.1%)

On remarque sur les graphiques un rapprochement entre les profils relatifs au modèle entropique et ceux du modèle logarithmique, sauf que visuellement les vitesses mesurées sont plus proches du modèle entropique. Dans la partie qui suivra ; on fera une comparaison en se basant sur une étude statistique des erreurs.

Pour étudier l'influence de la pente sur le développement des profils des vitesses, on a utilisé deux autres pentes ( $i=0.5\%$  ,  $i=0.75\%$ ), ci-après les figures relatives à la pente  $0.75\%$ .

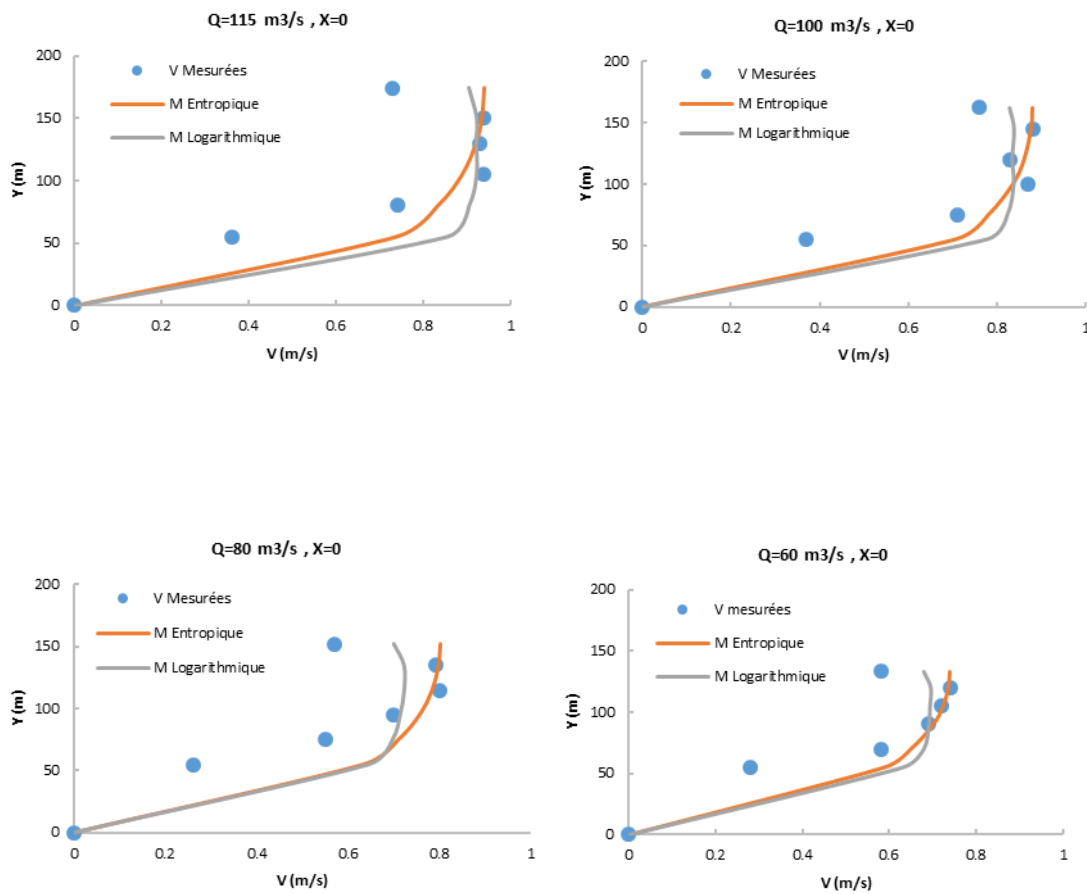


Figure III.2 Profils des vitesses (RA. PP,  $i=0.75\%$ )

On remarque clairement une nette augmentation de la vitesse suite à l'augmentation de la pente, on observe aussi que par rapport au premier cas l'écart entre le modèle logarithmique et celui entropique se creuse, car le dernier n'est pas tributaires des hypothèses et restrictions hydrodynamiques comme le modèle logarithmique, ce dernier nécessitera des corrections qui ont été introduites par plusieurs travaux de recherche tels que (Bonakdari et al,2009). Dans ce cas ; la couche limite turbulente se développe plus influence le profil des vitesses, ce qui n'est pas le cas du modèle entropique qui est

totalemment indépendant et ne dépend que des conditions hydraulique réels (Vitesse maximale, vitesse moyenne et profondeur de l'écoulement).

Il est a signalé que le point (0,0) des vitesses mesurées est une supposition afin de voir l'allure seulement du profile des vitesses réel.

**III.2.2 Rugosité artificielle en pierre poreuse (R. G25-50)**

Dans ce deuxième set d'expérimentation, on a utilisé des fonds rugueux élaboré par du gravier 25-50, moins rugueux que le premier afin de voir l'influence de la rugosité sur les profiles des vitesses et essayer de lier le paramètre entropique M (équation I.25) à la rugosité de Manning en fin de chapitre.

Le tableau ci-après illustre une partie des mesures faites pour ce fond rugueux (R.G 25-50) :

**Tableau III.2** Mesure des vitesses ponctuelles sur fond rugueux R.G 25-50 (pente  $i=0.5\%$ )

Q m <sup>3</sup> /h	H <sub>T</sub> (mm)	X=0 mm		X=50 mm		X= 100 mm	
		Y (mm)	V (m/s)	Y (mm)	V (m/s)	Y (mm)	V (m/s)
115	164	35	0,56	35	0,32	28	0,50
	164	60	0,75	60	0,68	60	0,76
	164	85	0,86	85	0,86	85	0,77
	164	115	0,87	115	0,85	115	0,82
	164	140	0,86	140	0,85	140	0,79
	164	156	0,66	156	0,55	156	0,59
100	157	35	0,50	28	0,26	28	0,46
	157	60	0,70	60	0,57	60	0,69
	157	85	0,75	85	0,71	85	0,72
	157	110	0,77	110	0,77	110	0,74
	157	135	0,79	135	0,74	135	0,70
	157	150	0,60	150	0,58	150	0,59
80	138	35	0,49	31	0,31	27	0,43
	138	55	0,59	55	0,50	55	0,60
	138	75	0,67	75	0,59	75	0,67
	138	95	0,66	95	0,65	95	0,69
	138	115	0,70	115	0,68	115	0,64
	138	136	0,54	136	0,57	136	0,46
60	123	35	0,42	24	0,25	30	0,43
	123	50	0,48	50	0,47	50	0,53
	123	70	0,58	70	0,57	70	0,63
	123	90	0,62	90	0,58	90	0,63
	123	105	0,62	105	0,60	105	0,56
	123	120	0,43	120	0,43	120	0,33

H<sub>t</sub> : la profondeur de l'écoulement, y : position du point de mesure par rapport au fond, X : distance entre la verticale de mesure et l'axe du canal.

La rugosité de Manning moyenne estimée pour ce fond rugueux est de 0,020.

On remarque qu'il y a plus ou moins une augmentation de la vitesse par rapport au premier cas, car la rugosité a diminué.

Les figures suivantes illustrent les profiles des vitesses mesurées et modélisées.

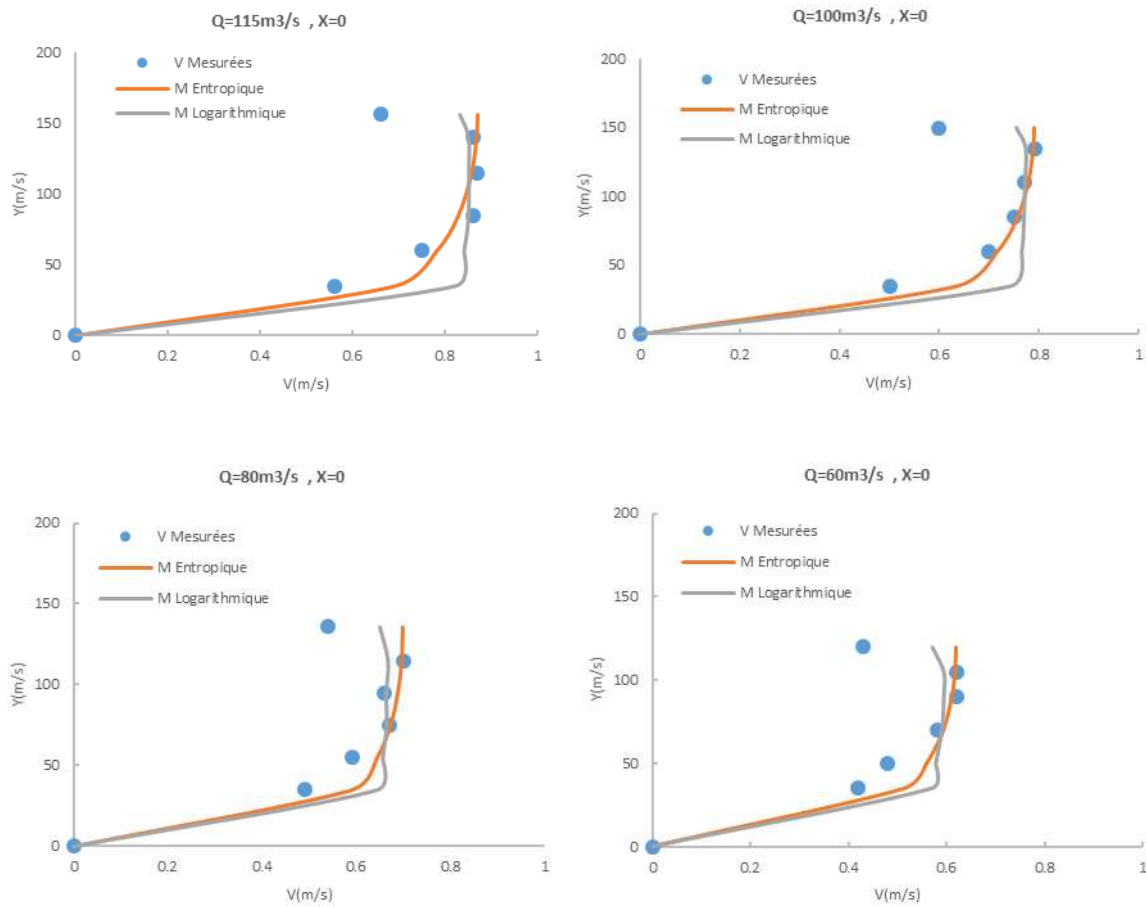


Figure III.3 Profils des vitesses (R.G 25-50 ,i=0. 5%)

De même que le cas de rugosité précédent, on remarque ici aussi que le profile entropique décrit mieux le profil des vitesses que celui logarithmique, l'avantage du modèle entropique est visuellement claire, aussi en remarque les vitesses proches du fond sont mieux évaluées, on suppose que la turbulence accrue prêt du fond influence considérablement la vitesse mesurée.

Ci-après les profils correspondants à la pente 0.75% :

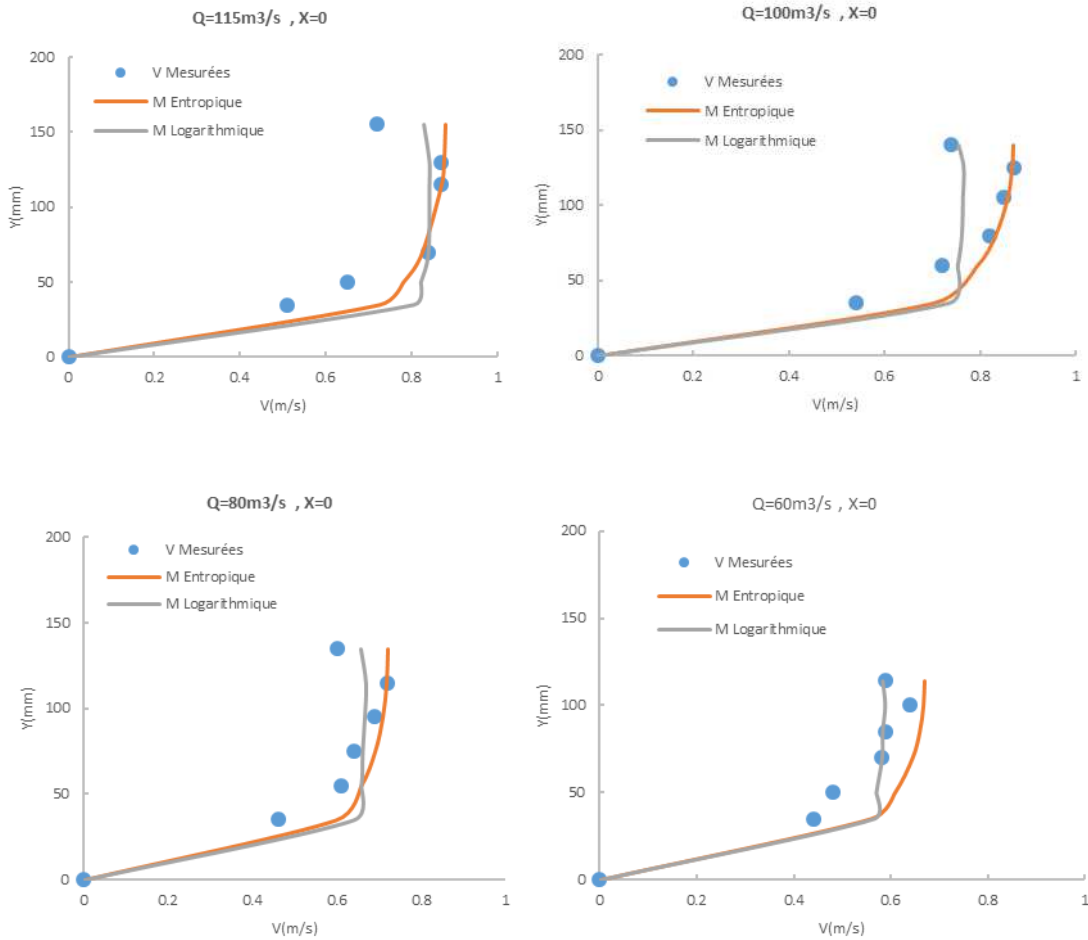


Figure III.4 Profils des vitesses (R.G 25-50,  $i=0.75\%$ )

On remarque que même avec l’augmentation de la pente, et par conséquent la vitesse, le profil en tropique décrit le mieux la répartition de la vitesse au niveau de la section d’écoulement, le profil logarithmique est caractérisé par un aplatissement au niveau du corps de l’écoulement, ce qui s’explique par le fait que ce dernier se base sur des fondements hydrodynamiques qui favorise l’uniformisation de la vitesse au milieu de l’écoulement. Une turbulence bien développée en suppose que la quantité de mouvement s’uniformise par le mélange de la matière donc la vitesse tend à être plus ou moins uniforme comme dans le cas des écoulements turbulent dans les conduites en charge (white,2010), ce qui n’est pas forcément la réalité, et les résultats le prouvent.



**III.2.3 Rugosité artificielle en pierre poreuse (R. G15-25):**

Dans ce troisième set d'expérimentation ; on utilise une rugosité plus fine (gravier 15-25), ce qui a donné un coefficient de Manning moyen plus petit ( $n_{R.G15-25} = 0.017$ ) que les deux précédents ( $n_{R.G25-50} = 0.020$  et  $n_{R.A PP} = 0.023$ ).

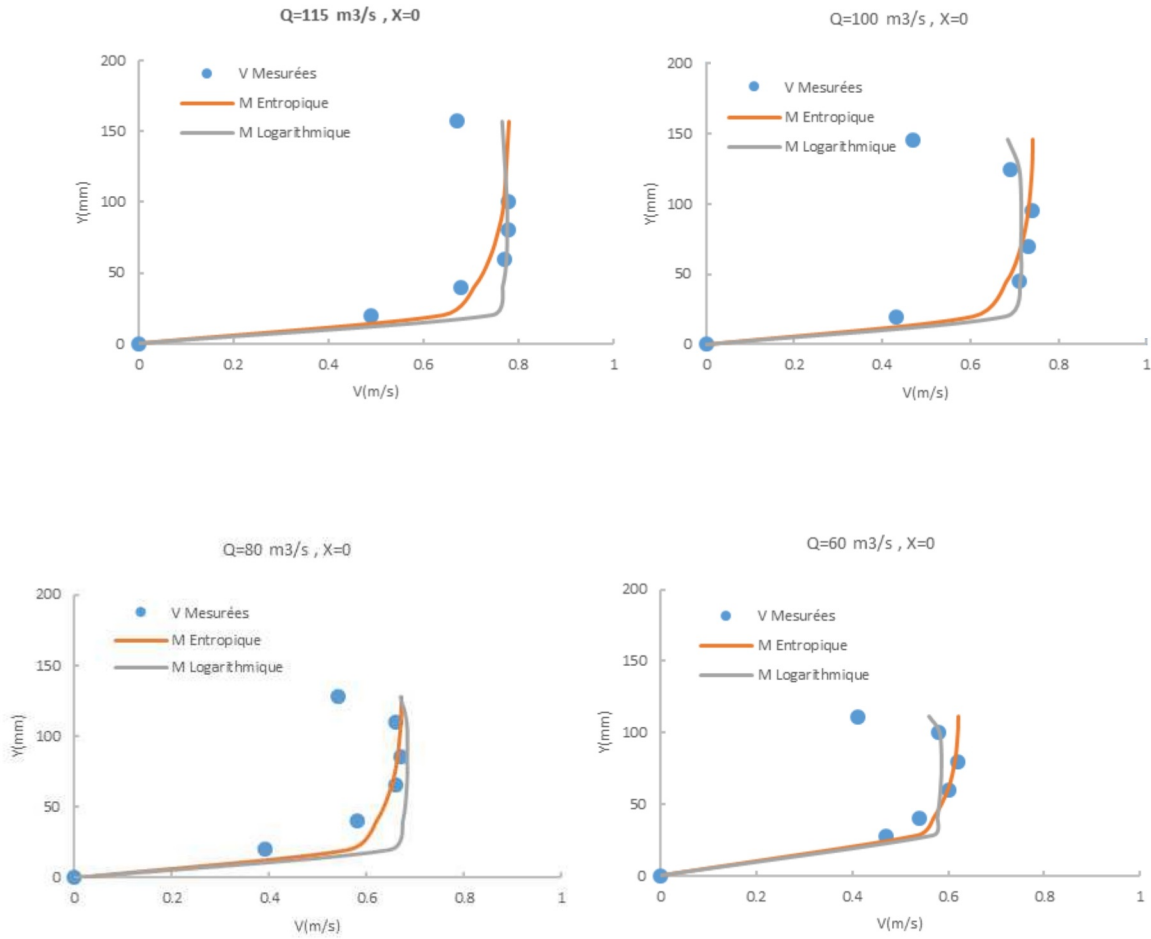
Le tableau ci-après illustre une partie des mesures faites pour ce fond rugueux (R.G 15-25) :

**Tableau III.3** Mesure des vitesses ponctuelles sur fond rugueux R.G 15-25 (pente  $i=0.1\%$ ) :

Q m <sup>3</sup> /h	H <sub>T</sub> (mm)	X= 0 mm		X= 50 mm		X=100 mm	
		Y (mm)	V (m/s)	Y (mm)	V (m/s)	Y (mm)	V (m/s)
115	160	20	0,49	23	0,49	25	0,50
	160	40	0,68	40	0,75	40	0,61
	160	60	0,77	60	0,76	60	0,71
	160	80	0,78	80	0,78	80	0,75
	160	100	0,78	100	0,78	100	0,77
	160	157	0,67	157	0,67	157	0,64
100	149	20	0,43	17	0,35	22	0,38
	149	45	0,71	45	0,66	45	0,59
	149	70	0,73	70	0,72	70	0,68
	149	95	0,74	95	0,73	95	0,70
	149	125	0,69	125	0,72	125	0,68
	149	146	0,47	146	0,44	146	0,54
80	131	20	0,39	22	0,39	22	0,36
	131	40	0,58	40	0,59	40	0,50
	131	65	0,66	65	0,66	65	0,62
	131	85	0,67	85	0,67	85	0,66
	131	110	0,66	110	0,67	110	0,64
	131	128	0,54	128	0,53	128	0,52
60	113	28	0,47	23	0,4	22	0,31
	113	40	0,54	40	0,53	40	0,47
	113	60	0,60	60	0,6	60	0,55
	113	80	0,62	80	0,62	80	0,59
	113	100	0,58	100	0,58	100	0,55
	113	111	0,41	111	0,42	111	0,43

Il est évident qu'il y a eu une nette augmentation des vitesses par rapport aux deux précédents car la rugosité a diminué.

Les figures suivantes illustrent les profils des vitesses mesurées ainsi que les modèles entropiques et logarithmiques.



**Figure III.5** Profils des vitesses (R.G 15-25 ,  $i=0.1\%$ )

On remarque, de même que les observations précédentes, que le modèle entropique s’adapte mieux aux profils des vitesses mesurées, surtout au milieu de la verticale, où les points s’alignent bien avec la ligne du profil logarithmique.

Les figures suivantes illustrent les profils des vitesses pour une rugosité R.G 15-25 suivant une pente de  $0.75\%$  qui est considérée comme une pente importante.

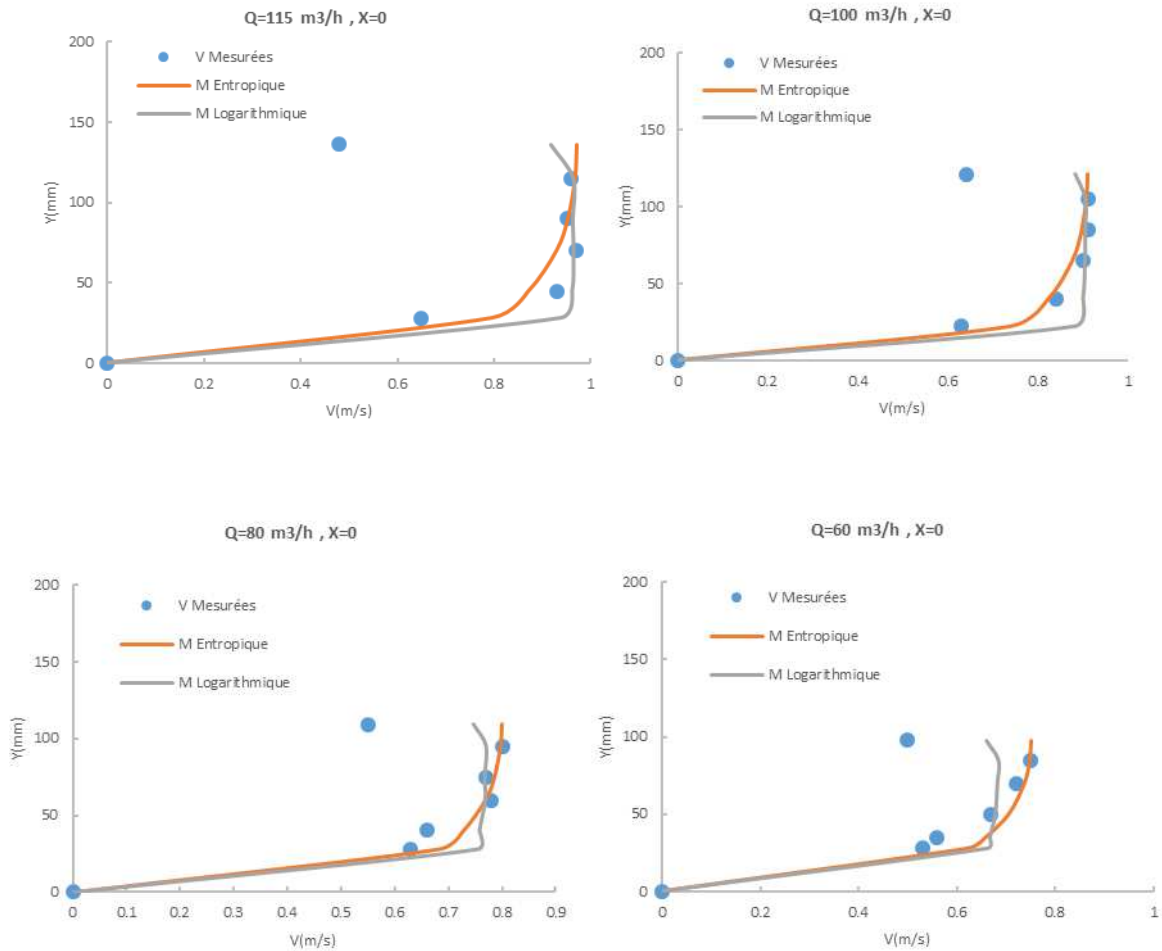


Figure III.5 Profils des vitesses (R.G 15-25 , i=0. 75%)

On remarque une nette augmentation de la vitesse, le modèle entropique est toujours celui qui décrit le mieux le profil des vitesses mesurées, la courbure du modèle est acceptable est typique d'un profil des vitesses dans les écoulements à surface libre. De ce fait ; et vue ce qui a été cité ci-dessus, on peut dire que le modèle entropique a prouvé une capacité de décrire le profil des vitesses dans ce cas d'écoulement dans les canaux prismatiques. Dans ce qui suit une description statistiques des erreurs entre les différents modèles et les vitesses mesurées.

### III.3 Analyse des erreurs

L'analyse des erreurs d'estimation entre les modèles de profils des vitesses étudiés et les valeurs mesurées est capitale pour se prononcer sur le modèle qui décrit le mieux la répartition des vitesses dans les sections d'écoulement à surface libre.

$$\Delta V = \frac{V_{mesurée} - V_{modèle}}{V_{mesurée}} \quad (III.1)$$

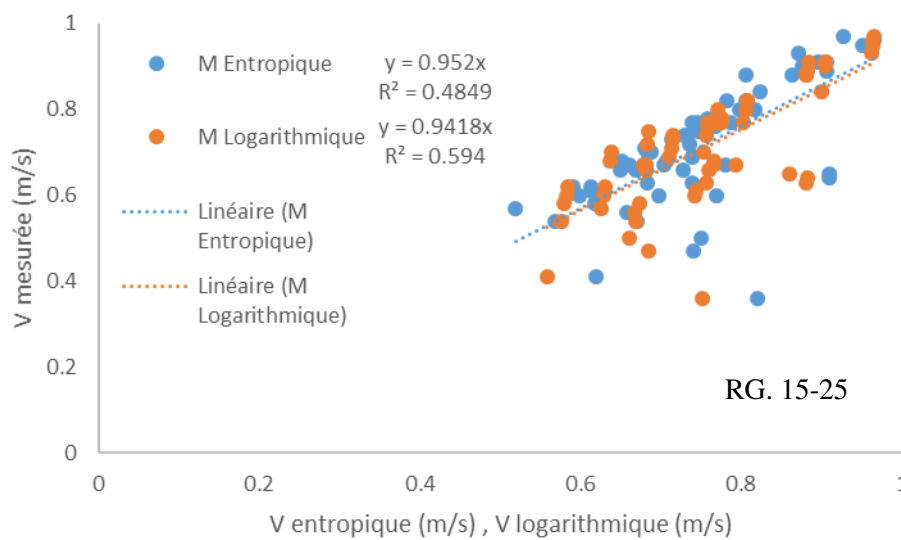
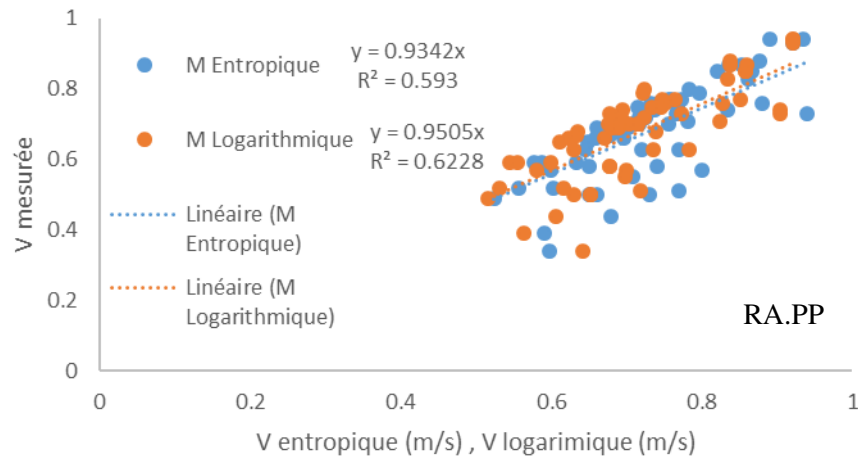
Le tableau suivant résume l'analyse des erreurs moyennes :

Tableau III.4 Moyennes des erreurs d'estimation des vitesses

	RA.PP	R.G 25-50	R.G 15-25
%Erreur Modèle Entropique	4.49	4.73	3.34
%Erreur Modèle Logarithmique	5.63	4.90	4.75

De l'analyse des erreurs moyennes on remarque un léger avantage du modèle entropique dans la description des vitesses dans les écoulements à surface libre.

Les figures ci-après donne un aperçu visuel sur la relation entre les vitesses mesurées et celles modélisées par les deux modèles de l'étude.



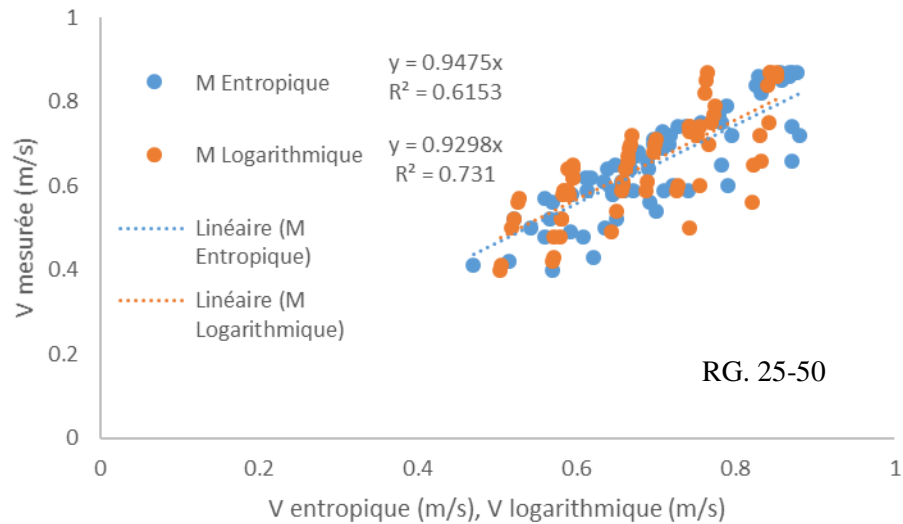


Figure III.6 Vitesse mesurée/Vitesse modélisée

On remarque que la pente de la droite de tendance est proche de l'unité, ce qui est un signe que les deux modèles peuvent prétendre à décrire les vitesses dans une section d'écoulement à surface libre, mais il est difficile de juger l'avantage d'un modèle par rapport à l'autre sauf en se basant sur l'analyse visuelle des profils et la moyenne des erreurs pour favoriser le modèle entropique par rapport à celui logarithmique.

III.4 Modélisation de la rugosité :

Le modèle entropique de description des profils des vitesses est basé sur le paramètre entropique M (I.22), dans ce qui suit on essaiera de vérifier si ce paramètre peut décrire la rugosité de Manning d'un écoulement seul ou avec un autre paramètre facilement mesurable qui est la pente.

III.4.1 Corrélation entre le Manning n, Coefficient entropique M et la pente i

Un échantillon de 36 mesures a été pris des observations relatives aux trois rugosités (RA. PP, R.G 25-50 et R.G 15-25), une analyse statistique de corrélation a été élaborée afin de voir de degrés de corrélation entre les paramètres :

Tableau III.5 Paramètres statistiques de la série de mesures

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
n	36	0,009	0,036	0,020	0,007
i%	36	0,100	0,750	0,450	0,272
M	36	0,680	6,750	3,360	1,520

La matrice de corrélation a été établie entre les trois paramètres suscités.

**Tableau III.6** Paramètres statistiques de la série de mesures

Variables	i%	M	n
i%	<b>1,000</b>	-0,307	0,852
M	-0,307	<b>1,000</b>	-0,659
n	0,852	-0,659	<b>1,000</b>

On remarque une excellente corrélation entre le coefficient de Manning, la pente est le paramètre entropique M. Le coefficient de Manning est inversement corrélé avec le Coefficient entropique M, ce qui est visible sur toutes les séries de mesures. La corrélation avec i peut s’expliquer par le fait que les plaques rugueuses couvre le fond du canal seulement pas les parois en verre très lisses, de ce fait avec la variation de la pente, le tirant d’eau varie donc la rugosité équivalente de la section d’écoulement varie aussi.

Essayons de voir s’il y a une expression de corrélation linéaire qui peut se dégager entre les différents paramètres. Une régression linéaire simple permet de dégager l’expression suivante :

$$n = 0,018341 + 0,01973 * i - 0,002159 * M \quad (III.2)$$

Où :

**n** : Coefficient de Manning

**i** : Pente du canal(%)

**M** : Paramètre entropique.

Ce modèle a été déduit avec un R<sup>2</sup> =0.901 ce qui est très intéressant pour un modèle régressif.

Le test de Fisher permet de vérifier l’adéquation du modèle régressif :

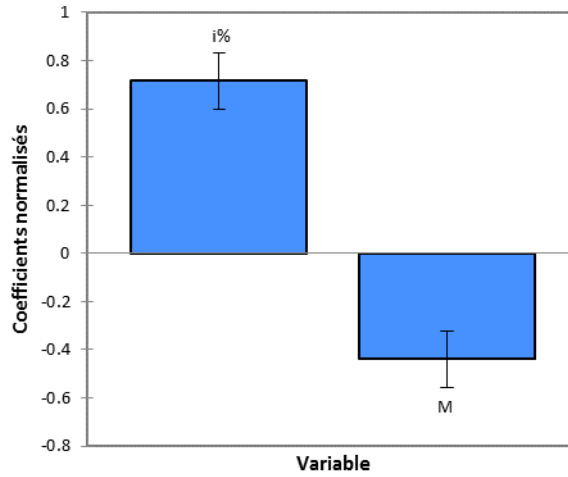
**Tableau III.7** Test de Fisher

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,002	0,001	149,686	< 0,0001
Erreur	33	0,000	0,000		
Total corrigé	35	0,002			

DDL : degré de liberté

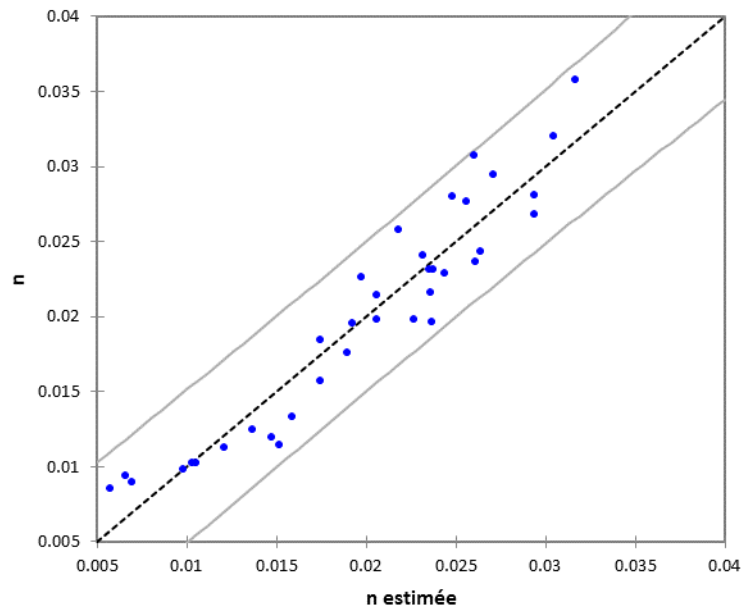
La Probabilité associée au paramètre de Fisher F est inférieure à 0.01% , donc on admet une probabilité de non adéquation de 0.01%. Donc on peut dire que le modèle regressif décrit « n » en fonction de « i » et « M ».

La figure suivante montre les coefficients de régression standardisés ou coefficients «  $\beta$  » :



**Figure.III.7** Coefficients de régression normalisée (Intervalle de confiance 95%)

En admettant un intervalle de confiance de 95% ; on peut visualiser la relation entre les valeurs du coefficient de Manning réelles et estimées.



**Figure III.8** Relation entre les valeurs réelles et estimées du coefficient de Manning.

$$n=f(i, M)$$

La figure montre clairement que l'ensemble des valeurs du coefficient de Manning sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95%, ce qui prouve la validité du modèle régressif d'estimation du coefficient de Manning en fonction de la pente et du paramètre entropique pour divers cas de rugosité.

**III.4.1 Corrélation entre le Manning n et Coefficient entropique M :**

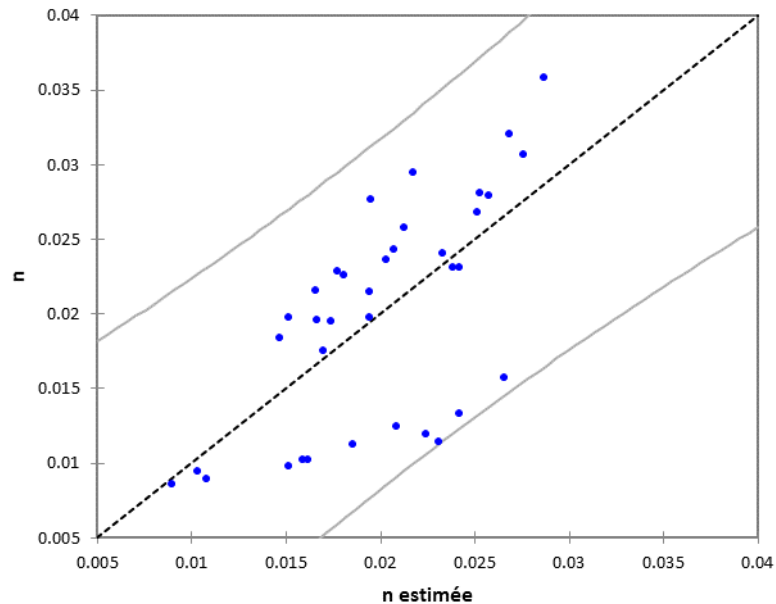
Il serait très intéressant de voir la possibilité d'exprimer le coefficient de Manning « n » en fonction du paramètre entropique « M » décrit comme constant pour les sections de contrôle (Chiu et Chen (1999), Moramarco et al, (2004), Ammari et al, (2010)).

Une régression linéaire a été réalisé entre le coefficient de Manning « n » et le coefficient de entropique « M », le coefficient de corrélation  $R^2=0.435$ , ce qui est moins que la corrélation précédente mais représentatif d'après le test de Fisher.

L'expression de corrélation est la suivante :

$$n = 0,030857 - 0,00324 * M \tag{III.3}$$

La relation entre les valeurs estimées est observées du coefficient de Manning est représenté dans la figure ci-après :



**Figure III.9** Relation entre les valeurs réelles et estimées du coefficient de Manning.

$$n=f(M)$$



Il est clair que le nuage de points est plus diffusé dans ce cas comparativement au premier, car la corrélation du Manning avec la pente du canal est beaucoup plus prononcée que celle avec le paramètre entropique  $M$ .

### **III.5 Conclusion**

L'analyse des profils des vitesses mesurées et leur comparaison avec les modèles entropique et logarithmique nous a permis de conclure que le modèle entropique probabilistique avait l'avantage d'être plus facile à mettre en œuvre, il décrit mieux la courbure des profils des vitesses surtout au milieu de l'écoulement, malheureusement, le matériel de mesure n'a pas permis de bien mesurer les vitesses à la surface et proche du fond là où les modèles logarithmiques présentent des insuffisances. L'analyse des erreurs a révélé un rapprochement entre les modèles entropique et logarithmique.

L'analyse de la rugosité de Manning a démontré une très bonne corrélation entre le «  $n$  » de Manning et la pente «  $i$  » ainsi que le paramètre entropique «  $M$  » qui est considéré comme l'identité hydraulique de la section d'écoulement. Cette corrélation a été traduite par un modèle régressif de la rugosité de Manning en fonction de la pente et du paramètre entropique, un autre modèle a été déduit en fonction du paramètre entropique seulement mais il est moins robuste que le premier.

**Conclusion Générale :**

La mesure des débits dans les écoulements à ciel ouvert est basé pour la plupart des techniques sur l'exploitation du champs de vitesses, de ce fait la réalisation de ce travail expérimental nous a permis de comparer des mesures réelles avec un modèle hydrodynamique de répartition des vitesses et un autre probabilistique basé sur la théorie de l'information qui est le modèle entropique. Les observations ont démontré que le modèle entropique a tendance à mieux décrire la répartition des vitesses dans une section d'écoulement car il est libre des hypothèses et contraintes hydrodynamiques, bien que d'après l'étude des erreurs, les deux modèles paraissent très proches car la mesure des vitesses à la surface et au fond s'est avérée très difficile avec le matériel disponible. Le modèle entropique peut décrire facilement le champs des vitesses en utilisant des mesures localisées de la vitesses maximales, facilement localisable et mesurable car elle se situe le plus souvent au voisinage direct de la surface, ce qui représente un gain très appréciable de temps et d'effort surtout pour les section de rivières et oueds où un jaugeage peut s'avérer une opération très laborieuse surtout en période de crue.

L'approche régressif de la rugosité de Manning en fonction de la pente du canal et du paramètre entropique a démontré une très bonne corrélation, et le modèle régressif a été obtenue avec un  $R^2=0.9$ , ce qui est excellent et permet de déduire facilement le Manning en fonction de constantes qui sont la pente et le paramètre entropique. Le modèle reliant le coefficient de Manning au paramètre entropique est moins robuste que le premier, mais il prouve qu'il y a une partie de l'information relative à la rugosité contenue dans le paramètre entropique dont la source n'est autre que l'entropie équivalente à la densité de probabilité.

Cette étude expérimentale ouvre la voie à plus d'investigation entre les paramètres hydrauliques dans les cours d'eau naturels et le paramètre entropique qui est considéré comme constant dans les portions de cours d'eau.

## Références bibliographiques

- Ammari, A., & Remini, B. (2010).** Estimation of Algerian rivers discharges based one Chiu's equation. *Arabian Journal of Geosciences*, 3(1), 59-65.
- Bonakdari H., (2006),** Modélisation des écoulements en collecteur d'assainissement -Application à la conception de points de mesures., Thèse de doctorat, Université de Caen -Basse Normandie, 263 pages.
- Ardiclioglu, M., De Araújo, J. C., & Senturk, A. I. (2005).** Applicabilité des Equations de Distribution de Vitesses dans les Ecoulements en Canal Ouvert à fond rugueux. *La Houille Blanche*, (4), 73-79.
- Balachandar, R., Blakely, D., Tachie, M., & Putz, G. (2001).** A study on turbulent boundary layers on a smooth flat plate in an open channel. *Journal of fluids engineering*, 123(2), 394-400.
- Chow V.T (1959)** "Hydraulics of open channels". McGraw- Hill Book Co. NY.
- Cebeci, T., & Smith, A. M. O. (1974).** Analysis of turbulent boundary layers. New York.
- Carlier, M. (1980).** *Hydraulique générale et appliquée* (pp. 158-269). Paris: Eyrolles.
- Chiu, C.L, (1987).** Entropy and probability concepts in hydraulics, *Journal of hydraulic engineering*. ASCE, vol.133, n° 5, p. 583-600.
- Chiu, C.L., (1988).** Entropy and 2-D velocity distribution in open channels, *Journal of hydraulic engineering*. ASCE, vol. 114, n° 7, p. 738-756.
- Chiu, C.L., (1989).**Velocity distribution in open channel flow, *Journal of hydraulic engineering*, vol.115, n° 5, p.576-594.
- Chiu, C.L., Abidin Said, C.A., (1995).** Maximum and mean velocities and entropy in open channel flow, *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, vol. 121, n° 1, p. 26-35.
- Chen, Y. C., 1998.** An efficient method of discharge measurement. Ph. D. thesis. University of Pittsburgh.
- Chiu, C.L., Chen Y.C., (1999).** Efficient methods of measuring discharges and reservoir sediment inflow, in: *The international workshop of risk analysis in Dams safety assessment*, Taipei, Taiwan, p. 97-116.
- Chiu, C.L., Hsu, S.M., (2006).** Probabilistic approach to modelling of velocity distributions in fluid flows, *Journal of Hydrology*. Elsevier, vol. 316, p. 28-42.
- Fenton, J. D., 2002.** The application of numerical methods and mathematics to hydrography, *Proc. of the 11th Australasian Hydrographic Conference*, Sydney, 3-6.
- Moramarco T, Saltalippi C, Singh VP (2004)** Estimation of mean velocity in natural channels based on Chiu's velocity distribution equation. *J Hydraul Eng (ASCE)* 9(1):42-50
- Ning-Chien, T., 2001.** Characteristics of velocity distribution in open channel flow and their applications. Ph. D. thesis. University of Pittsburgh.
- Prandtl, L. (1932).** "Zur turbulenten Strömung in Röhren und langs Platten." *Ergebn. Aerodyn. Versuchsanst, Gottingen*, 4, 18-29 (in German).

- Raju, K. G. R.,** Asawa, G. L., & Mishra, H. K. (2000). Flow-establishment length in rectangular channels and ducts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(7), 533-539.
- Rouse, H. (1946).** Elementary fluid mechanics: Wiley, New York.
- Sellin, R. H. J. (1964).** A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. *La Houille Blanche*(7), 793-802.
- Tominaga, A., & Nezu, I. (1991).** TURBULENT STRUCTURE IN COMPOUND OPEN CHANNEL FLOWS. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 117(1), 21-41.
- Von Kármán, T. (1930).** Mechanische Ähnlichkeit und turbulenz. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1930, 58-76. (in German).
- White F.M. (2010).** Fluid mechanics. Seventh edition. **McGraw Hill**.
- Wormleaton, P. R.,** Sellin, R. H. J., Bryant, T., Loveless, J. H., Hey, R. D., & Catmur, S. E. (2004). Flow structures in a two-stage channel with a mobile bed. *Journal of Hydraulic Research*, 42(2), 145-162.
- Yang, S. Q.,** Tan, S. K., & Lim, S. Y. (2004). Velocity distribution and dip-phenomenon in smooth uniform open channel flows. *Journal of hydraulic engineering*, 130(12), 1179-1186.