

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Evaluation d'un modèle d'écoulement à surface libre par HEC-RAS sur canal expérimental.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0034-16

APA Citation (APA توثيق):

Ben Sidi Ahmed, L'hachimi (2016). Evaluation d'un modèle d'écoulement à surface libre par HEC-RAS sur canal expérimental[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بنمّين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، دوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

OPTION : Conception des systèmes d'assainissement

THEME :

Evaluation d'un modèle d'écoulement à surface libre par
HEC-RAS sur canal expérimental.

Présenté par :

M^r : BEN SIDI AHMED L'hachimi

DEVANT LES MEMBRES DU JURY

	Nom et Prénom	Grade	Qualité
M ^r	SALAH.B	Professeur	Président
M ^r	HACHEM.I.A	MAA	Examineur
M ^{me}	MOKRANE.O	MAA	Examinatrice
M ^{me}	TAFAT.L	MAA	Examinatrice
M ^r	BOUKHELIFA.M	MAB	Promoteur

Juin 2016

A ma mère

A toutes les mères du monde,

Un grand respect pour tous les membres du jury, qui me feront l'honneur de corriger ce présent travail le jour de la soutenance ;

Toute ma gratitude envers mon promoteur Mr Mustapha Boukhelifa, qui a tracé les grandes lignes de ce thème, pour m'avoir donné confiance que ça soit dans le travail expérimental ou bien dans le travail de recherche ainsi que sa disponibilité permanente et ses orientations pertinentes ;

Un grand merci pour Mr Ammari pour son soutien et ses conseils précieux au laboratoire ;

Un remerciement spécial pour Mr Kameli Md qui a été pour nous un très bon guide au cours des manipulations ;

Sans oublier mes très chers amis : Salem, Abdeslam, Moh, Ali, Faouzi, Idris, pour leur aide et leur présence.

Je voudrais remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à l'élaboration de ce travail ainsi ceux qui en feront un bon usage.

Hachimi BSA

Juin 2016

ملخص

يشتمل هذا العمل نمذجة مجموعة من التجارب على قناة اختبار 12.5 متر في الطول على البرنامج HEC-RAS لكي تتم المقارنة بين النتائج المخبرية و الحسابية. أما الهدف النهائي من هذا العمل هو تحديد وتقييم البرنامج لأنه يقوم على عملية حسابية ذات بعد واحد مع عدد من التبسيطات.

Résumé

Ce présent travail consiste en la modélisation sur le logiciel HEC-RAS d'un ensemble de cas d'écoulement effectués au laboratoire sur un canal expérimental de 12.5 m de longueur. Le but ultime de ce travail est de pouvoir identifier et évaluer le logiciel HEC-RAS ce dernier est basé sur un processus de calcul unidimensionnel qui comporte un certain nombre de simplification et engendre une certaine incertitude.

Abstract

The present work involves modeling the HEC-RAS software of a set of event flow in the lab on a test channel of 12.5 m in length. The ultimate goal of this work is to identify and assess the HEC-RAS software which is based on a one-dimensional calculation process with a number of simplifications and creates uncertainties.

Table des matières

Dédicace I
Remerciement..... II
Abstract III
Tables des matières IV
Liste des figures VII
Liste des tableaux IX
Introduction générale..... XI

Chapitre I : Présentation du logiciel HEC-RAS et du matériel expérimental.

Introduction 2
1. Présentation du logiciel HEC-RAS : 2
 1.1 Vue d'ensemble des capacités hydrauliques : 2
 1.1.1 Calcul de la ligne d'eau en écoulement uniforme : 2
 1.1.2 La simulation en écoulement non uniforme : 3
 1.1.3 Calcul du transport solide : 3
 1.1.4 Analyse de la qualité des eaux : 3
 1.2 Les équations de base de calcul sur HEC-RAS en écoulement uniforme : 3
 1.2.1 Calcul de la ligne d'eau et de la ligne de charge: 3
 1.2.2 Calcul de débitance : 4
 1.2.3 Estimation de la valeur du coefficient de Manning composé : 5
 1.2.4 Evaluation de l'énergie cinétique moyenne : 5
 1.2.5 Evaluation des pertes par frottements : 6
 1.2.6 Evaluations des pertes dues aux élargissements et rétrécissements : 7
 1.3 Le mode de fonctionnement de HEC-RAS : 7
 1.3.1 Les fichiers constituant un projet HEC-RAS : 8
 1.3.2 Les données géométriques : 9
 1.3.3 Les données de débit en écoulement uniforme : 10
 1.3.4 La simulation en écoulement uniforme : 11
 1.4 Extensions et programmes associés : 11
2. Présentation du matériel expérimental : 11
 2.1 Le canal d'essai : 11

Table des matières

2.2	Le tableau de commande :	13
2.3	Les différents accessoires du dispositif :	14
2.4	Les accessoires utilisés :	14
2.4.1	Piles de pont :	15
2.4.2	Plaques rugueuses :	15
Conclusion.....		15

Chapitre II : Construction du modèle d'écoulement à surface libre sur HECRAS.

Introduction.....		18
1.	La démarche suivie pour la mise en œuvre de la simulation :	18
1.1	Introduction des données géométriques :	18
1.1.1	Sections en travers :	18
1.1.2	Les piles de pont :	19
1.1.3	Les plaques rugueuses :	20
1.2	Les données de débits :	20
1.3	Lancement des simulations :	20
2.	Résultats des simulations et discussion:.....	21
2.1	Simulation d'écoulement sur canal simple :.....	21
2.1.1	Tableaux et graphiques de résultats :	22
2.1.2	Discussion et interprétation :.....	25
2.2	Simulation d'un écoulement sur canal avec des piles de pont :.....	25
2.2.1	Tableaux et graphiques de résultats :	25
2.2.2	Discussion et interprétation :.....	30
2.3	Simulation d'un écoulement sur canal avec plaques rugueuses :.....	30
2.3.1	Tableaux et graphiques de résultats :	31
2.3.2	Discussion et interprétation des résultats :.....	35
Conclusion.....		35

Chapitre III : Mise en œuvre des écoulements sur canal expérimental et mesures.

Introduction.....		37
1.	Les étapes du procédés expérimental :	37
2.	Les manipulations au laboratoire :.....	37

Table des matières

2.1	Mesures sur canal simple :	38
2.2	Mesures sur canal avec piles de pont :	41
2.3	Mesures sur canal avec plaques rugueuses :	46
3.	Interprétation et discussion des résultats :	51
3.1	Canal simple :	51
3.2	Canal avec piles de pont :	51
3.3	Canal avec plaques :	52
	Conclusion.....	52

Chapitre IV : Evaluation de l'incertitude, calage et validation des simulations d'écoulements à surface libre sur HECRAS.

	Introduction.....	55
1.	Structure du modèle hydraulique :	55
2.	Calage des paramètres :	55
3.	La démarche suivie pour le calage :	56
3.1	Choix du critère de comparaison de valeurs :	56
3.2	Correction du paramètre de rugosité :	57
4.	Le calage des simulations :	58
4.1	Evaluation des simulations d'écoulement selon le critère de Nash-Sutcliffe :	58
4.1.1	Cas du canal simple :	59
4.1.2	Canal avec piles de pont :	60
4.1.3	Cas du canal avec plaques rugueuses :	61
4.2	Ajustement des coefficients de Manning :	62
5.	Relance des simulations :	64
6.	Interprétation et discussion des résultats :	64
6.1	Une vue générale de l'étude :	64
6.2	Fiabilité des résultats issus du logiciel :	65
	Conclusion.....	65
	Conclusion générale.....	66
	Références bibliographiques.....	68
	Annexes.....	69

Liste des figures

Chapitre I:

Figure I.1 : Représentation des termes de l'équation d'énergie.....	4
Figure I.2: Section à parois hétérogène.....	5
Figure I.3 : Calcul de l'énergie moyenne.....	6
Figure I.4 : Schéma de fichiers constituant un projet sur HEC-RAS.....	8
Figure I.5 : Exemple de section en travers sur HEC-RAS.....	10
Figure I.6: Schéma d'un réseau de cours d'eaux.....	11
Figure I.7 : Schéma du canal d'essai HM 162.....	12
Figure I.8 : Canal d'essai HM 162.....	12
Figure I.9 : Tableau de commande du canal d'essai HM 162.....	14
Figure I.10 : Piles de ponts utilisés.....	16
Figure I.11 : Plaques rugueuses.....	16

Chapitre II:

Figure II.1 : Section en travers du canal expérimental sur HEC-RAS.....	19
Figure II.2: Représentation des piles de pont sur HEC-RAS.....	20
Figure II.3: Profil en long du fond du canal avec plaques.....	20
Figure II.4 : Vue en 3D du canal sur HEC-RAS.....	22
Figure II.5 : Profil en long pour canal simple $I = 0\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$	24
Figure II.6 : Profil en long pour canal simple $I = 1.0\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	24
Figure II.7 : Profil en long pour canal simple $I = 1.5\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$	25
Figure II.8 : Profil en long pour canal simple $I = 2.0\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	25
Figure II.9 : Vue en 3D du canal avec piles de pont sur HEC-RAS.....	26
Figure II.10 : Profil en long pour canal avec piles de pont $I = -0.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$	28
Figure II.11 : Profil en long pour canal avec piles de pont $I = 0\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$	29
Figure II.12 : Profil en long pour canal avec piles de pont $I = 1.0\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$	29
Figure II.13 : Profil en long pour canal avec piles de pont $I = 1.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$	30
Figure II.14 : Profil en long pour canal avec piles de pont $I = 2.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$	30
Figure II.15 : Distribution des vitesses le long du canal pour différents débits $I = 0.5\%$	31
Figure II.16 : Vue en 3D du canal avec plaques rugueuses sur HEC-RAS.....	32
Figure II.17 : Profil en long pour canal avec plaques $I = -0.5\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	34
Figure II.18 : Profil en long pour canal avec plaques $I = 0\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	34
Figure II.19 : Profil en long pour canal avec plaques $I = 0.5\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	34
Figure II.20 : Profil en long pour canal avec plaques $I = 2.0\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	35
Figure II.21: Distribution des vitesses le long du canal pour différents débits $I=2.0\%$	36

Chapitre III:

Figure III.1 : La ligne d'eau pour différents débits canal avec piles $I=0.5\%$	52
Figure III.2: Le changement de régime à travers la singularité	52
Figure III.3: Jet au niveau de la pile.....	53
Figure III.4 : Canal avec plaques	53
Figure III.5: Changement de régime à la fin des plaques.....	54

Chapitre IV:

Figure IV.1: Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = -0.5\%$	59
Figure IV.2 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = -0.5\%$	59
Figure IV.3 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 1 \%$	60
Figure IV.4 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = -0.5 \%$	61
Figure IV.5 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 1 \%$	61
Figure IV.6 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 1.5 \%$	61
Figure IV.7 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = -0.5 \%$	62
Figure IV.8 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 0\%$	62
Figure IV.9 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 0.5 \%$	63
Figure IV.10 : Représentation graphique de Manning estimés et calés	65

Liste des tableaux

Chapitre II :

Tableau II.1 : Simulations lancées sur HEC-RAS

Tableau II.2 : Caractéristiques d'écoulement sur canal simple $I = -0.5\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.3 : Caractéristiques d'écoulement sur canal simple $I = 0\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.4 : Caractéristiques d'écoulement sur canal simple $I = 0.5\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.5 : Caractéristiques d'écoulement sur canal simple $I = 1.5\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.6 : Caractéristiques d'écoulement sur canal simple $I = 2.0\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.7 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = -0.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.8 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 0\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.9 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 0.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.10: Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 1.0\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.11 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 1.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.12 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 2.0\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.13 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 2.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau II.14 : Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I = -0.5\%$

Tableau II.15:Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I=0\%$

Tableau II.16: Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I = 0.5\%$

Tableau II.17: Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I=1.0\%$

Tableau II.18: Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I = 1.5\%$

Tableau II.19: Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I=2.0\%$

Chapitre III :

Tableau III.1a: Mesures et caractéristiques hydrauliques calculées pour canal simple

Tableau III.1b : Mesures et caractéristiques hydrauliques calculées pour canal simple

Tableau III.2a : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

Tableau III.2b : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

Tableau III.2c : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

Tableau III.2d : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

Tableau III.2e : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

Tableau III.2f : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

Tableau III.3a : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec plaques

Tableau III.3b : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec plaques

Tableau III.3c : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec plaques

Tableau III.3d : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec plaques

Tableau III.3e : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec plaques

Chapitre IV :

Tableau IV.1: Coefficients de Nash-Sutcliffe cas du canal simple

Tableau IV.2: Coefficients de Nash-Sutcliffe cas du canal avec piles de pont

Tableau IV.3 : Coefficients de Nash-Sutcliffe cas du canal avec plaques rugueuses

Tableau IV.4: Valeurs corrigées Manning canal simple $I = 0.5$, $I = 1.0\%$



Introduction générale

La modélisation numérique est devenue ces dernières décennies, indispensable pour la compréhension des phénomènes physiques puisqu'elle permet de les étudier à partir d'un laboratoire de recherche, elle permet même de modéliser différents scénarios d'une rivière en crue, toutefois ces outils restent intimement liés à la mesure sur terrain et nécessitent en continu des mises à jour par des calages qui permettent de les renforcer afin de mieux approcher les événements réels. Dans le cas des écoulements à surface libre dont la connaissance des caractéristiques hydrauliques est un enjeu majeur dans la conception et la projection d'aménagements des cours d'eaux.

Actuellement, cette connaissance par la modélisation des écoulements en rivière se fait par le logiciel libre HECRAS. Toutefois, ce dernier est basé sur un processus de calcul unidimensionnel qui comporte un certain nombre de simplifications et engendre une certaine incertitude, ce qui motive alors notre démarche est le décalage perçu entre les résultats donnés par simulation et les observations sur terrain. Ce travail s'intéresse à un aspect de simulation qui est la confrontation du système expérimental au système modélisé. Afin de parvenir à une adéquation assez proche entre les deux, et ainsi décider à quel degré on peut avoir confiance dans le logiciel et aussi définir sur quels paramètres doit-on jouer. Cette étude a été faite sur deux travaux parallèles, de telle façon à parachever les expérimentations au laboratoire par un lancement de simulations sur logiciel, cas par cas et de voir en temps réel les ressemblances dans la modélisation de phénomènes.

Dans le laboratoire il a été procédé à des simulations d'écoulements sur canal expérimental de 12.5 mètre de long et à la mesure de la hauteur d'eau pour différents débits et pentes tout en intégrant singularités telles que les ponts, le changement de rugosité. En parallèle une création du modèle d'écoulements, aux mêmes conditions du canal sur HECRAS et enfin la déduction de l'ensemble des caractéristiques hydrauliques.

Afin d'expliquer la démarche suivie et l'interprétation des résultats, le rapport contient quatre chapitres :

- Présentation du logiciel HECRAS et du matériel expérimental ;
- Construction du modèle d'écoulement à surface libre sur HECRAS ;
- Mise en œuvre des écoulements sur canal expérimental et mesures ;
- Evaluation de l'incertitude, calage et validation des simulations d'écoulements à surface libre sur HECRAS ;

Chapitre I

**Présentation du logiciel HEC-RAS et du matériel
expérimental**

Chapitre I : Présentation du logiciel HEC-RAS et du matériel expérimental.

Introduction :

La connaissance du matériel de travail et l'outil informatique utilisé, se révèle d'une importance primordiale. Elle permet de collecter le maximum d'informations sur ces moyens et ainsi d'en développer une assez bonne maîtrise, afin de mener à bien le travail expérimental et l'ensemble des simulations. Dans ce présent chapitre il sera présenté le matériel utilisé au laboratoire, et présenté le mode de calcul du logiciel HEC-RAS, ses capacités et ses limites.

1. Présentation du logiciel HEC-RAS :

HEC-RAS, *Hydrologic Engineering Centers River Analysis System* (Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique) est un logiciel de modélisation hydraulique destiné à simuler l'écoulement dans les cours d'eau et les canaux. Le modèle utilisé est unidimensionnel, ce qui signifie qu'il n'existe pas de modélisation directe des variations hydrauliques dues aux changements de forme de la section transversale, à la présence de coudes ou autres aspects d'un écoulement 2D ou 3D.

Le programme a été élaboré par le ministère américain de la Défense (corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis) dans le but de gérer les rivières, les ports et autres travaux publics relevant de leur compétence, il a été largement diffusé de par le monde depuis sa publication en 1995. Développé par *Hydrologic Engineering Center* (HEC) en Californie, ce système permet aux ingénieurs en hydraulique d'analyser les débits dans le lit des rivières et de déterminer les zones inondables. Il intègre de nombreux moyens de saisie de données, de composants d'analyse hydraulique, de stockage de données, d'édition de rapports sous forme de tables et de graphiques.

1.1 Vue d'ensemble des capacités hydrauliques :

HEC-RAS est conçu pour effectuer des calculs hydrauliques unidimensionnels pour un réseau complet de canaux naturels et construits. Il présente plusieurs capacités hydrauliques :

1.1.1 Calcul de la ligne d'eau en écoulement uniforme :

Le système permet le calcul de la ligne d'eau pour un écoulement uniforme graduellement varié. Il peut traiter un tronçon unique de la rivière, un système dendritique, ou un réseau complet de canaux. La modélisation peut s'effectuer sous un régime fluvial, torrentiel ou mixte. La procédure de calcul est basée sur la solution de l'équation d'énergie à une dimension, les pertes d'énergie consistent en les pertes liées aux frottements et celles liées à la contraction ou l'expansion du lit de la rivière. L'équation du mouvement est utilisée dans les cas de la variation brusque de la ligne, Incluant le calcul en régime mixte (ressaut hydraulique,), hydraulique des ponts, et l'évaluation de la hauteur d'eau dans les lieux de confluence.

Les effets de divers obstacles tels que ponts, ponceaux, déversoirs, évacuateurs de crues et d'autres structures en travers de la rivière peuvent être pris en compte dans les calculs.

1.1.2 La simulation en écoulement non uniforme :

Cette composante de HEC-RAS permet la simulation d'un écoulement non-uniforme à une dimension, à travers un réseau complet de canaux à ciel ouvert. Ce calcul a été principalement développé pour un régime torrentiel.

Les calculs hydrauliques pour les sections, les ponts, les ponceaux et autres ouvrages hydrauliques qui ont été développés pour la simulation en écoulement uniforme ont été intégrés dans le module de l'écoulement instable. En outre, la composante d'écoulement instable a la capacité de modéliser les aires de stockage et les connexions hydrauliques entre les zones de stockage, ainsi que les écoulements entre les biefs.

1.1.3 Calcul du transport solide :

C'est la simulation unidimensionnelle du transport solide, de l'affouillement et du dépôt au cours de périodes modérées, et une possibilité d'application à des événements uniques telles que les inondations. Le calcul est basé sur la taille des grains et la courbe granulométrique, Il comprend la possibilité de modéliser un réseau complet de cours d'eau, de dragage du canal, ainsi que différentes alternatives de digues et d'empiètements.

1.1.4 Analyse de la qualité des eaux :

On peut aussi effectuer une analyse de la qualité des eaux avec le logiciel HEC-RAS, ainsi qu'une analyse détaillée des températures et des différents constituants (algues, oxygènes dissout, orthophosphates...)

1.2 Les équations de base de calcul sur HEC-RAS en écoulement uniforme :

1.2.1 Calcul de la ligne d'eau et de la ligne de charge:

La ligne d'eau est calculée d'une section à l'autre en résolvant l'équation d'énergie avec une méthode itérative

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (I.1)$$

Z_1, Z_2 : Elevations du lit du canal ;

Y_1, Y_2 : Profondeurs d'eau au les profils ;

V_1, V_2 : Vitesses moyennes (Débit total/Section mouillée) ;

a_1, a_2 : Coefficients de pondération de vitesses ;

h_e : Perte de charge.

La perte d'énergie (h_e) entre deux sections consiste en les pertes liées aux frottements et celles liées à la contraction ou l'expansion du lit. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (I.2)$$

L : La longueur pondérée du tronçon ;

\bar{S}_f : La pente représentative de frottements ;

C : Coefficient de contraction ou d'expansion.

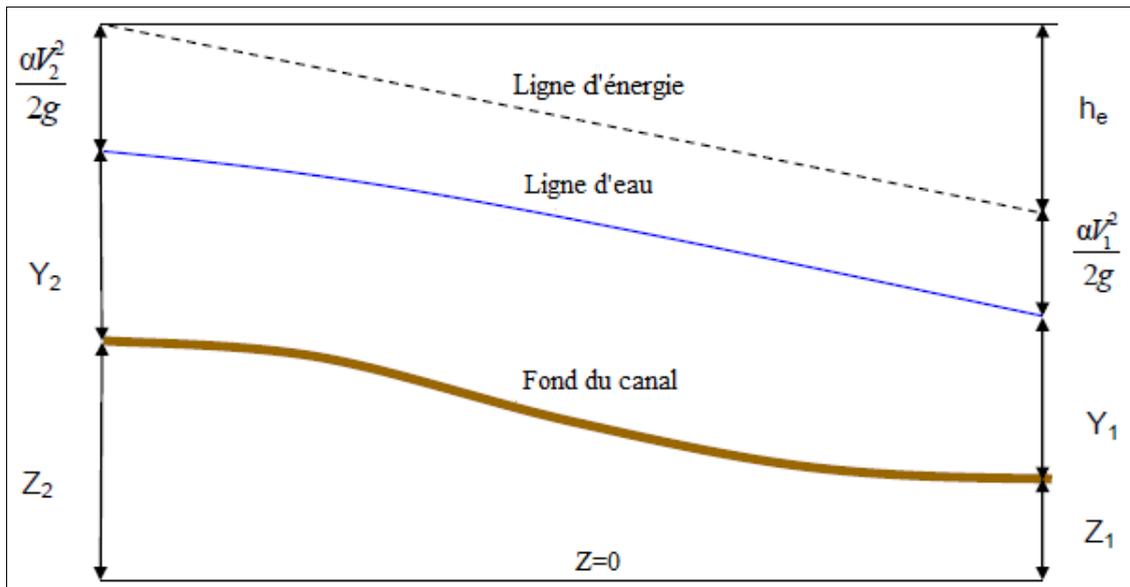


Figure I.1 : Représentation des termes de l'équation d'énergie.

La longueur pondérée est calculée par :

$$L = \frac{L_{rg}\bar{Q}_{rg} + L_c\bar{Q}_c + L_{rd}\bar{Q}_{rd}}{\bar{Q}_{rg} + \bar{Q}_c + \bar{Q}_{rd}} \quad (I.3)$$

L_{rg}, L_c, L_{rd} : La distance des sections en travers pour la rive gauche, le lit majeur, et la rive droite respectivement;

$\bar{Q}_{rg} + \bar{Q}_c + \bar{Q}_{rd}$: La moyenne arithmétique pour les débits entre les sections pour la rive gauche, le lit majeur, et la rive droite.

1.2.2 Calcul de débitance :

Le calcul de la débitance pour chaque partie (rive gauche, lit majeur, la rive droite) se fait par la relation suivante :

$$Q = KS_f^{\frac{1}{2}} \quad (I.4)$$

$$K = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} \quad (I.5)$$

K: Débitance pour chaque subdivision [$m^3 \cdot s^{-1}$];

n: Coefficient de Manning [$s \cdot m^{-\frac{1}{3}}$];

A: Section mouillée [m^2];

R: Rayon hydraulique (Section mouillée/périmètre mouillé) [m].

1.2.3 Estimation de la valeur du coefficient de Manning composé :

Des fois, la nature des parois varie le long du périmètre mouillé pour une seule section. On peut alors considérer une succession de portions P_i de ce périmètre avec pour chacune un coefficient de Manning propre n_i . On peut alors évaluer un coefficient moyen (valable pour la section supposée alors homogène) par la relation dite d'Einstein. [Brunner, 2010]

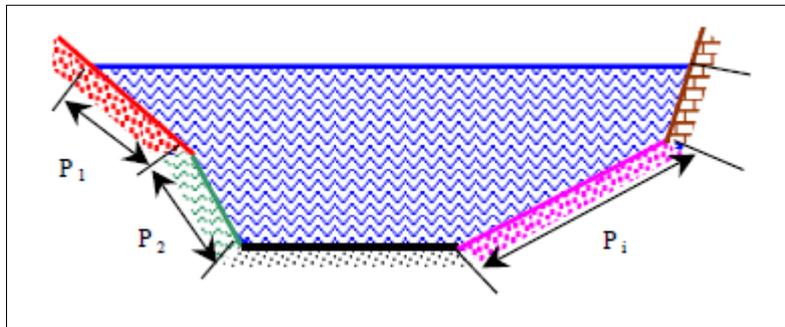


Figure I.2: Section à parois hétérogène.

$$n_c = \left[\frac{\sum (P_i n_i^2)}{P} \right]^{2/3} \quad (I.6)$$

P: Périmètre mouillé [m].

P_i: Périmètre de la portion i [m];

n_i: Coefficient de Manning de la subdivision [$s \cdot m^{-\frac{1}{3}}$];

n_c: Coefficient de Manning composé [$s \cdot m^{-\frac{1}{3}}$].

1.2.4 Evaluation de l'énergie cinétique moyenne :

Pour une hauteur donnée de la ligne d'eau, la hauteur pondérée de la ligne d'énergie est la moyenne entre les trois subdivisions (rive gauche, lit majeur, et rive droite). (Brunner, 2010)

Afin de calculer l'énergie cinétique moyenne, il est nécessaire de déterminer le coefficient de pondération de vitesses α .

V₁: vitesse dans la subdivision 1 ;

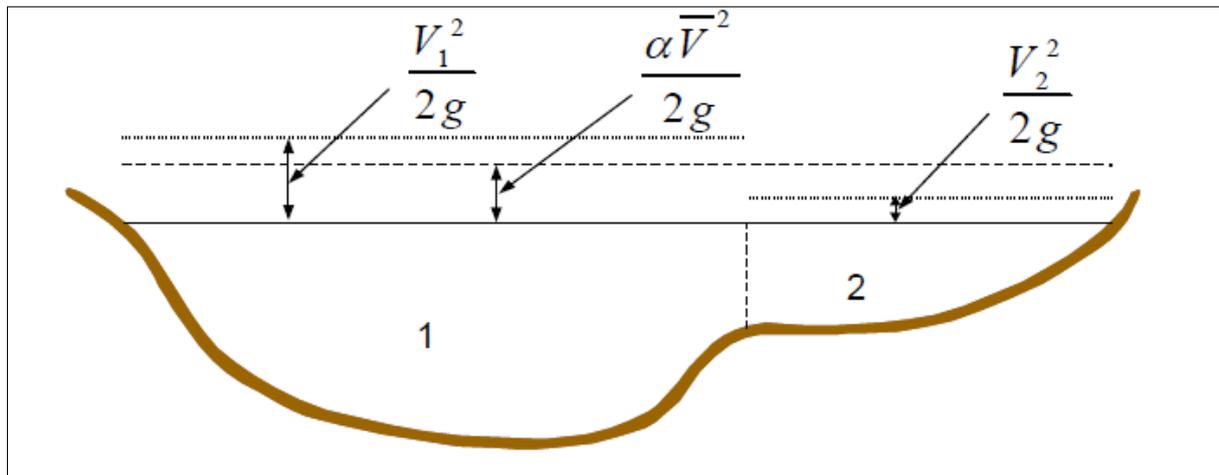


Figure I.3 : Calcul de l'énergie moyenne.

Pour une section subdivisée en deux (cas de la figure I.3) :

$$\alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{V^2(Q_1 + Q_2)} \quad (I.7a)$$

$$\alpha = \frac{A^2 \left(\frac{K_1^3}{A_1^2} + \frac{K_2^3}{A_2^2} \right)}{K^3} \quad (I.7b)$$

D'une façon globale le coefficient α est calculé pour les trois subdivisions par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{A^2 \left[\frac{K_{rg}^3}{A_{rg}^3} + \frac{K_c^3}{A_c^3} + \frac{K_{rd}^3}{A_{rd}^3} \right]}{K^3} \quad (I.8)$$

α : Coefficient pondérateur de vitesses ;

K_{rg}, K_c, K_{rd} : La débitance de la rive gauche, le lit majeur, et la rive droite respectivement;

A_{rg}, A_c, A_{rd} : La surface des subdivisions, rive gauche, lit majeur, et rive droite respectivement;

K : La débitance totale ;

A : La surface totale ;

1.2.5 Evaluation des pertes par frottements :

Les pertes par frottements sont évaluées sur HEC-RAS comme le produit de $\overline{S_f}$ et L où :

$\overline{S_f}$: La pente représentative de frottement qui est calculée par défaut par la relation (I.9a);

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (I.9a)$$

Q_1, Q_2 : Débit traversant les sections 1, 2 respectivement ;

K_1, K_2 : Débitance des sections 1, 2 respectivement ;

Selon le choix de l'utilisateur \bar{S}_f peut être calculée par l'une des relations suivantes :

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad (I.9b)$$

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f1} \times S_{f2}} \quad (I.9c)$$

$$\bar{S}_f = \frac{2(S_{f1} \times S_{f2})}{S_{f1} + S_{f2}} \quad (I.9d)$$

Où S_f est calculée pour chaque section en travers avec :

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad (I.10)$$

1.2.6 Evaluations des pertes dues aux élargissements et rétrécissements :

Ces pertes sont évaluées par l'équation suivante :

$$h_{er} = C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (I.11)$$

h_{er} : Pertes dues à l'élargissement ou rétrécissement du canal ;

C : Coefficient de contraction ou d'expansion (rétrécissement ou élargissement) ;

Le programme considère que la contraction a lieu quand la vitesse en aval est supérieure à la vitesse en amont, et il considère l'expansion quand c'est l'inverse.

1.3 Le mode de fonctionnement de HEC-RAS :

Afin d'étudier le comportement hydraulique d'un cours d'eau sur HEC-RAS, il faut créer ce que l'on appelle un Projet qui constitue un ensemble de fichiers dans lesquels on introduit les informations nécessaires pour la simulation:

- Les données géométriques ;
- Les données de débits ;
- Les conditions aux limites ;
- Les conditions de simulations ;
- Les résultats de la simulation.

1.3.1 Les fichiers constituant un projet HEC-RAS :

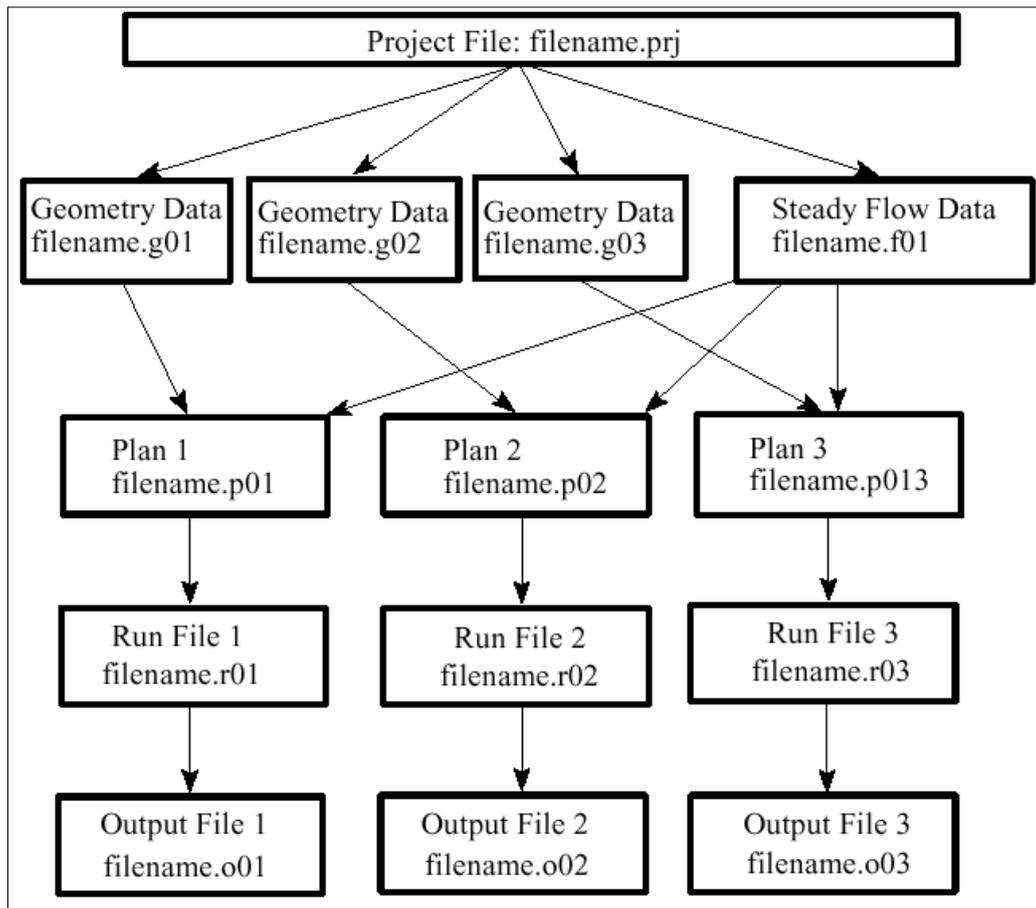


Figure I.4 : Schéma de fichiers constituant un projet sur HEC-RAS

Projet (Project) : Le fichier Projet contient le titre et la description du projet, le système d'unité utilisé et les liens vers tous les fichiers qui lui sont associés. Il contient aussi les variables par défaut qui peuvent être définies par l'utilisateur et une référence au dernier Plan utilisé. Il comporte l'extension .PRJ.

Géométrie (Geometry) : Ce fichier contient toutes les informations géométriques sur le cours d'eau, soit le schéma arborescent, les sections transversales, la distance entre chaque section, les coefficients de Manning et s'il y a lieu, les structures présentes (ponts, ponceaux). Un projet peut comporter plusieurs géométries afin d'analyser différents scénarios (par exemple avec ou sans obstruction dans la rivière). Les fichiers peuvent ainsi comporter l'extension .G01 à G.99.

Débit (Flow) : Le fichier Débit est utilisé pour simuler les écoulements permanents. Il contient le nombre de Profile devant être calculés, les données de débit pour chacun d'eux et les conditions limites pour chaque tronçon. Un Profile désigne l'ensemble des niveaux d'eau calculés pour des conditions particulières de débit. De la même façon que précédemment, l'extension du fichier peut être de .F01 à .F99.

Plan (Plan) : Un fichier Plan contient un titre et une description du plan, de façon similaire aux informations d'un Projet. Il contient de plus la référence aux fichiers Géométrie

et Débit associés à ce Plan. Le concept de Plan permet ainsi de simuler différentes combinaisons de Géométrie et de débit qui peuvent être nécessaires dans le cadre d'une étude hydraulique. Il y a un fichier .P** pour chaque Plan et ceux-ci peuvent comporter l'extension .P01 à .P99.

Simulation (Run) : Le fichier simulation contient toutes les données nécessaires à l'exécution d'une simulation, définie à l'intérieur d'un Plan. Ce fichier est automatiquement créé par HEC-RAS lorsqu'une simulation est lancée. Son extension peut-être .R01 à .R99. Par exemple, le fichier .R01 correspond au Plan .P01

Résultats (Output) : Tous les résultats d'une simulation sont contenus dans le fichier Output. Les fichiers de résultats possèdent l'extension .O01 à .O99 et leur numérotation est également associée à celle des fichiers Plan. (Guide HEC-RAS, 2005)

1.3.2 Les données géométriques :

L'intégralité des informations sur la morphologie du cours d'eau ou du canal, est représentée dans le fichier de données géométriques, soit le schéma arborescent, les sections transversales, la distance entre chaque section, les coefficients de Manning et s'il y a lieu, les structures présentes.

La forme du cours d'eau lui-même est représentée par l'ensemble des sections en travers qu'en introduit sur HEC-RAS sous forme de (station, élévation)

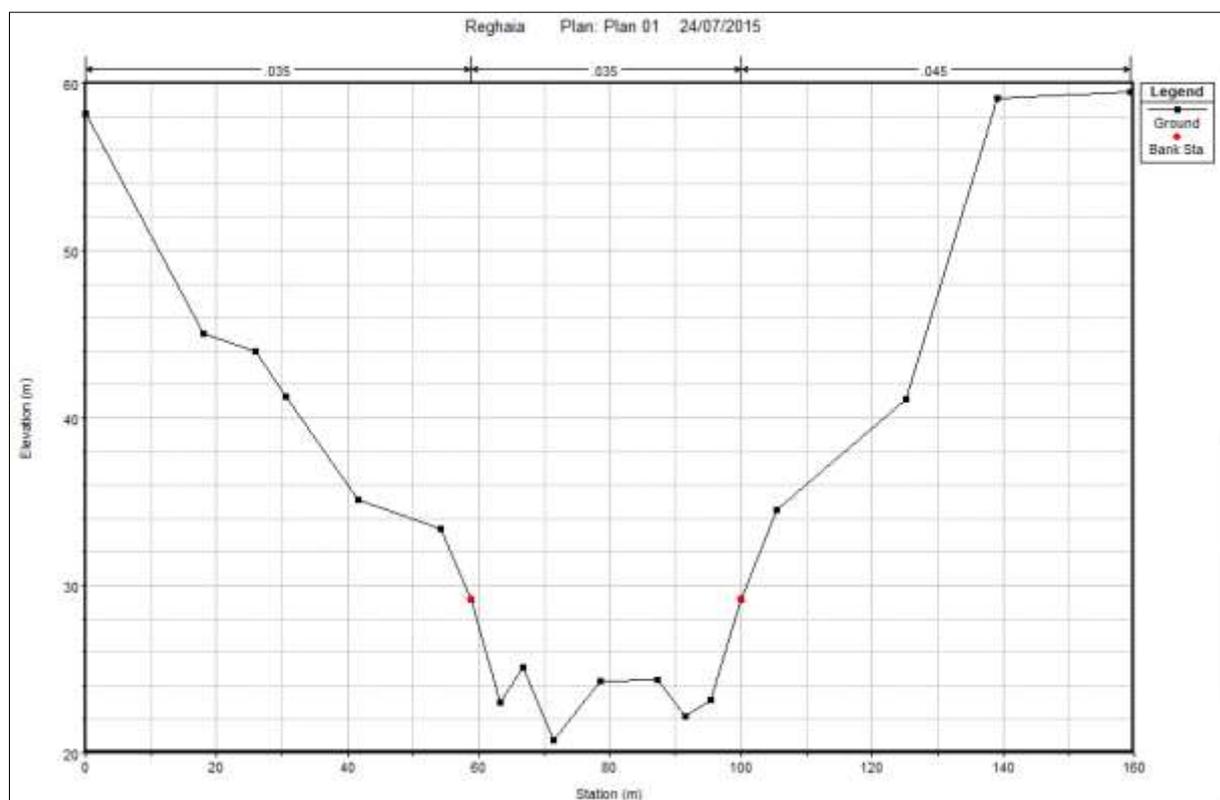


Figure I.5 : Exemple de section en travers sur HEC-RAS

L'utilisateur peut les introduire soit par simple dessin sur la fenêtre du logiciel, ou bien par l'importation du fichier directement via l'extension adaptée. Le système est dessiné tronçon par tronçon de l'amont vers l'ava (dans la direction d'écoulement). Il peut ajouter s'il y a lieu les aires de stockages, et les stations de pompages.

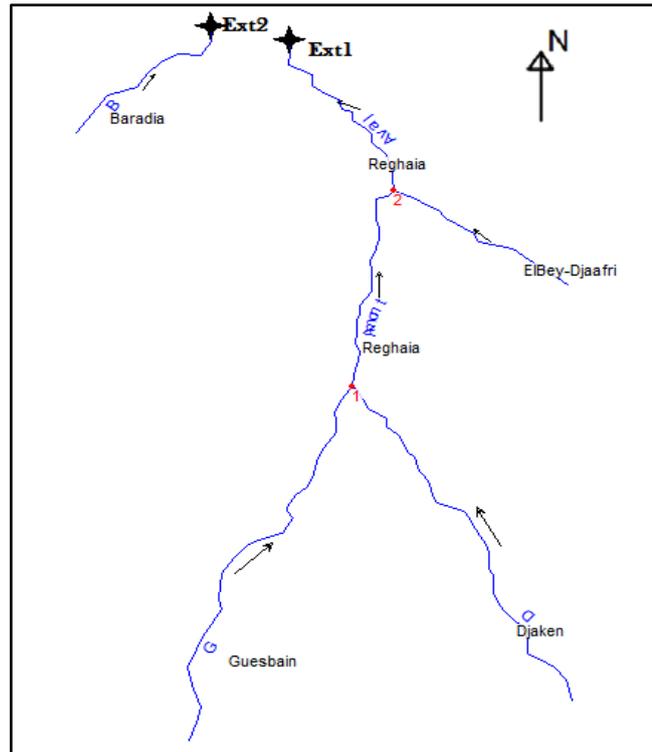


Figure I.6: Schéma d'un réseau de cours d'eau

1.3.3 Les données de débit en écoulement uniforme :

Le programme requiert l'ensemble des informations suivantes comme données de débit dans la simulation en écoulement uniforme :

- Nombre de profiles s'il y a lieu de simuler plusieurs scénarios de crues ;
- Le débit de crue pour chaque profil ;
- Les conditions aux limites.

La simulation sollicite aussi l'introduction des conditions aux limites de chaque tronçon, autrement dit, la hauteur d'eau en amont et en aval. HEC-RAS nous donne les choix suivant : (Brunner, 2010)

- Hauteur d'eau connue : pour chaque profil d'écoulement la hauteur est connue.
- La hauteur critique : le programme calcule lui-même la hauteur critique et l'utilise comme condition aux limites.
- La hauteur normale : le logiciel nous demande la pente d'énergie qui sera utilisée pour le calcul de la hauteur normale par l'équation de Manning. si la pente d'énergie n'est pas connue l'utilisateur peut l'estimer en introduisant la pente de la surface de l'eau, ou la pente du fond.
- Courbe de tarage : le logiciel nous demande d'introduire la courbe débit-hauteur.

1.3.4 La simulation en écoulement uniforme :

Une fois les informations géométriques et les débits introduits, l'utilisateur doit définir un plan de simulation comportant les différentes options de calcul :

- La localisation de la distribution des débits ;
- Le calcul de débitance (méthode HEC-2, méthode HEC-RAS) ;
- Le calcul de la pente représentative de frottement ;
- La marge de tolérance des calculs ;
- Inclure ou non le calcul de la hauteur critique...

1.4 Extensions et programmes associés :

Afin de faciliter la mise en œuvre du modèle géométrique de la rivière sur HEC-RAS, le programme accepte plusieurs extensions et associations de fonctionnalités avec d'autres logiciels :

AutoCAD, RiverCAD : fonctions d'import des fichiers de modèle numérique de terrain (MNT) depuis AutoCAD et AutoCAD civil 3D.

HEC-GeoRAS : module d'import/export de données compatible avec le logiciel SIG ArcGIS.

2. Présentation du matériel expérimental :

2.1 Le canal d'essai :

La partie expérimentale du travail a été effectuée, sur le canal d'essai GUNT Hamburg HM 162 309x450mm, un appareil de base utilisé pour des essais d'envergure dans le but de l'étude des écoulements à surface libre, ainsi que des phénomènes d'hydraulique maritime.

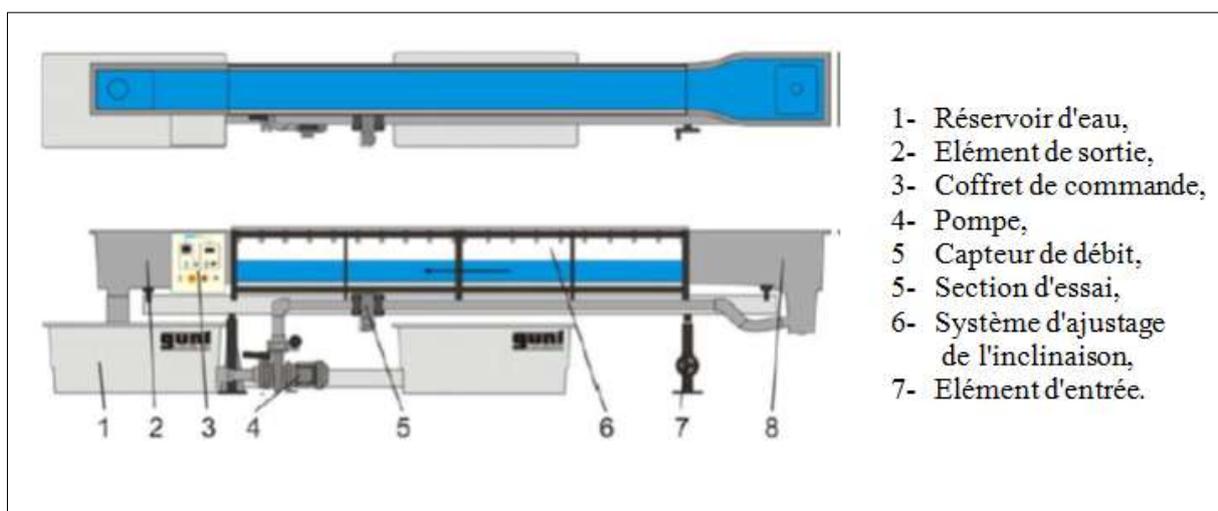


Figure I.7 : Schéma du canal d'essai HM 162.



Figure I.8 : Canal d'essai HM 162.

Les parois latérales de la section d'essai sont en verre trempé permettant l'observation optimale des essais. Tous les composants en contact avec l'eau sont fabriqués dans des matériaux résistants à la corrosion (acier inoxydable, plastique renforcé de fibres de verre). L'élément d'entrée est conçu de telle manière à minimiser les turbulences de l'écoulement à son arrivée dans la section d'essai. Afin de permettre la simulation de chutes et l'ajustage d'un écoulement uniforme ayant une profondeur constante, il est possible d'ajuster en continu l'inclinaison du canal d'essai.

Le canal est alimenté en amont par quatre (04) réservoirs en matière plastique renforcée de fibres de verre contenant chacun **1100 L** et se déverse en aval dans un bac de décharge, chaque réservoir est de dimensions **2180 × 1000 × 765mm** possédant un couvercle en aluminium de **2000 × 1000 × 5mm** dont la surface est antidérapante. Ainsi, l'eau est puisée des réservoirs à l'aide d'une pompe de type *Aquafirst* donnant un débit maximal de **130 m³/h** sur une hauteur de **30 m**, la plage de mesure des débits varie de **5.4** à **130 m³/h**. Cette pompe possède une vitesse de rotation de **2800 min⁻¹** avec un variateur de vitesses, s'accompagnant d'une puissance absorbée de **7.5 KW**.

Ce dispositif possède un système d'ajustage de l'inclinaison qui peut varier de **[-0.5 à 2.5 %]**, avec un pas de **0.1 %** ainsi qu'un système électronique de réglage de débit, et un débitmètre électromagnétique placé sur la conduite de refoulement.

2.2 Le tableau de commande :

Le dispositif est muni d'un tableau de commande pour le réglage du débit et de la fréquence du générateur de vagues, ainsi, que pour un éventuel arrêt d'urgence :

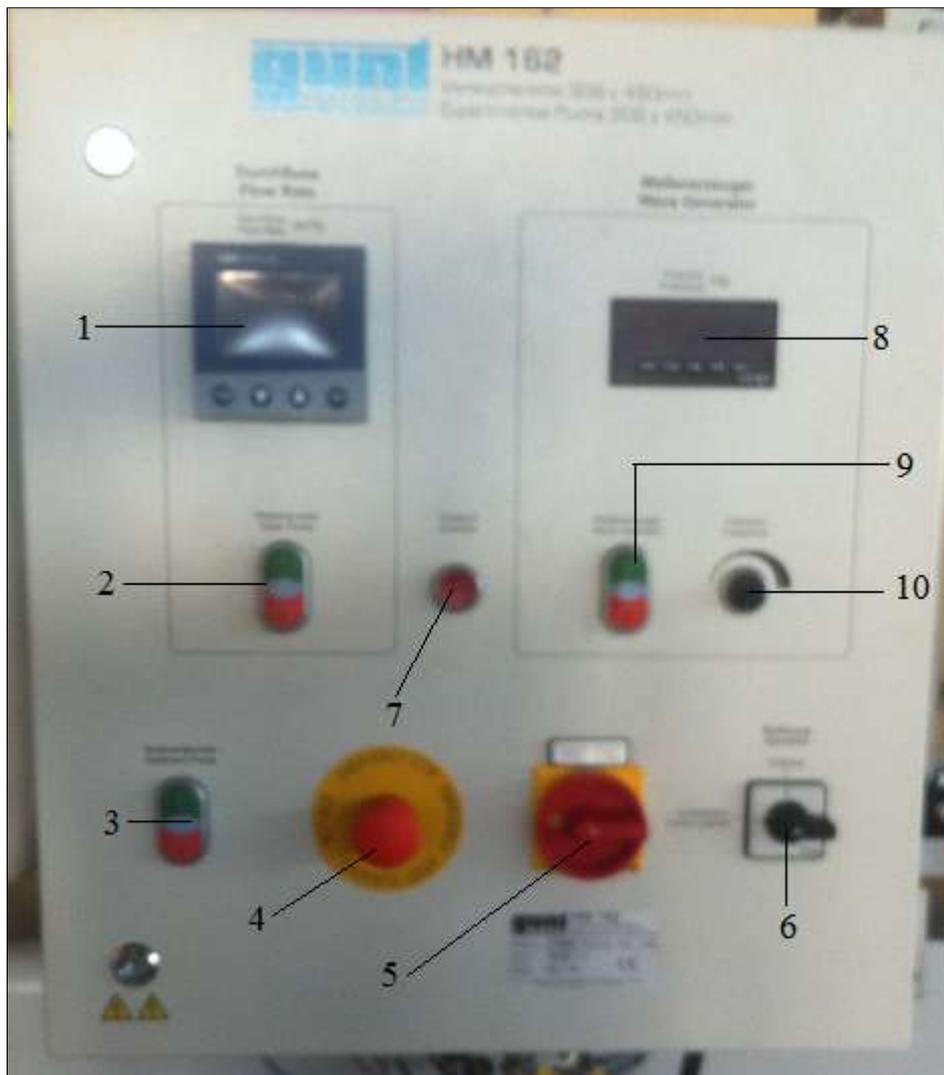


Figure I.9 : Tableau de commande du canal d'essai HM 162

- 1- Régulateur de débit ;
- 2- Marche/arrêt de la pompe ;
- 3- Marche/arrêt de la pompe à sédiments ;
- 4- Bouton d'arrêt d'urgence ;
- 5- Bouton d'alimentation ;
- 6- Interrupteur du mode de commande ;
- 7- Trop-plein ;
- 8- Afficheur de la fréquence du générateur de vagues ;
- 9- Marche/arrêt du générateur de vagues ;
- 10- Potentiomètre du générateur de vagues.

2.3 Les différents accessoires du dispositif :

Le banc d'essai dispose aussi de plusieurs accessoires permettant l'étude de plusieurs phénomènes :

- Etude d'écoulements uniformes et non uniformes ;
- Etude de changement d'écoulement et de la dissipation d'énergie (ressaut, bassin d'amortissement, déversoirs...)
- Etude des écoulements par des ouvrages de contrôle et en dessous de vannes ;
- Etude des écoulements non stationnaires et le transport des sédiments ;
- Etude des phénomènes d'hydraulique maritime (oscillations de vagues, houles, plage artificielle...)

Les accessoires accompagnants le canal d'essai sont :

- Vanne plane ;
- Vanne radiale ;
- Jeu de déversoirs à paroi mince (à seuil épais, cunéiforme, à siphon) ;
- Jeu de dégrilleurs ;
- Déversoir à crête arrondie avec mesure de pression ;
- Déversoir à crête arrondie avec 2 évacuateurs ;
- Plaques rugueuses ;
- Un seuil ;
- Jeu de piles (7 profils) ;
- Canal Venturi ;
- Canal Parshall ;
- Un pilot vibrant ;
- Un générateur de vagues ;
- Jeu de plages ;
- Une jauge à eau numérique ;
- Appareil de mesure de vitesse ;
- Un tube de Prandtl ;
- Manomètre à 10 tubes ;
- Une mesure électronique de la pression ;
- Supports pour instruments

Les accessoires se vissent au fond de la section d'essai pour plus de stabilité

2.4 Les accessoires utilisés :

Le travail expérimental se divise principalement en trois étapes :

- Canal simple ;
- Canal avec pile de pont avec un profil rectangulaire arrondi des deux côtés ;
- Canal avec plaques rugueuses sur **5m** .

2.4.1 Piles de pont :

Le profil utilisé est rectangulaire arrondi des deux côtés avec deux piles, la pile de pont est placée en travers de la section d'écoulement (perpendiculaire), afin de causer une contraction de la section d'écoulement.



Figure I.10 : Piles de ponts utilisés

2.4.2 Plaques rugueuses :

Afin de varier la rugosité de fond on place **4** plaques rugueuses sur **5m**, de dimension de **1.25 × 0.309m**

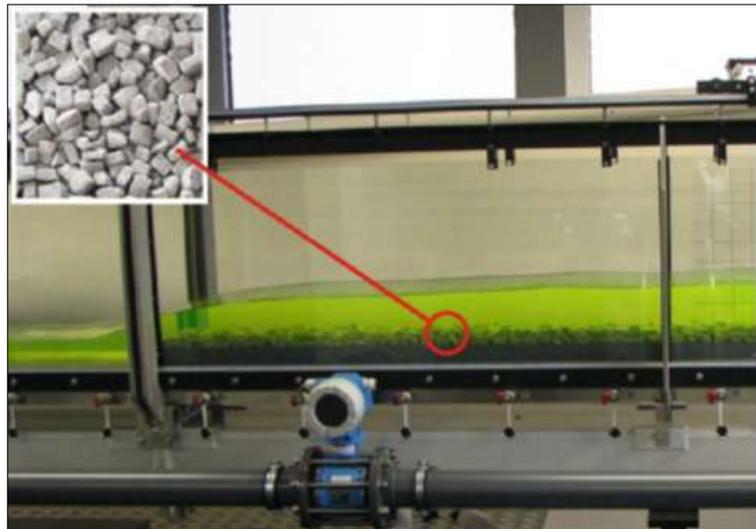


Figure I.11 : Plaques rugueuses.

Conclusion :

Ce volet est présenté comme une introduction au travail, ainsi au cours de ce chapitre à cerner d'une façon globale le processus de calcul du logiciel HEC-RAS, et aussi une présentation des différents constituants du matériel utilisé au laboratoire.

Chapitre II

**Construction du modèle d'écoulement à surface libre sur
HECRAS**

Chapitre II : Construction du modèle d'écoulement à surface libre sur HECRAS.

Introduction :

Cette partie, est consacrée à la mise en œuvre d'un modèle d'écoulement aux conditions du canal expérimental sur HECRAS tout en intégrant quelques singularités, à l'exemple des piles de pont ainsi que des plaques rugueuses, afin d'en déduire l'ensemble des caractéristiques hydrauliques de l'écoulement (Hauteur de la lame d'eau, de la ligne d'énergie, vitesses d'écoulement...), ainsi que la visualisation des différents profils en long et les différents graphiques.

1. La démarche suivie pour la mise en œuvre de la simulation :

Afin de mener à bien la simulation, il est indispensable de mettre en œuvre sur le logiciel HEC-RAS une représentation des conditions réelles de l'écoulement dans le banc d'essai, voire les dimensions du canal ainsi que les différents débits et pentes. Pour cela il faudrait tout d'abord créer un nouveau projet pour chaque pente puis introduire les données géométriques, les données de débits et les conditions aux limites.

1.1 Introduction des données géométriques :

1.1.1 Sections en travers :

La reproduction de la forme du canal se fait par ce que l'on appelle des sections en travers, désignés numériquement de telle façon que la section la plus en amont porte le numéro le plus élevé, dont il est préférable de nommer les sections par leurs éloignements en mètres de la fin du tronçon en question. Dans le cas présent puisque la section est uniforme tout au long du canal, il suffit d'introduire les sections initiale et finale puis par interpolation sur une distance constante ($l = 0.5 \text{ m}$) il y aura au total 26 sections en travers sur une longueur de 12.5 m . Lors de la création des sections en travers sur HEC-RAS il est demandé d'introduire (la rive gauche, le lit majeur ainsi que la rive droite) du canal ainsi que les valeurs des coefficients de Manning correspondantes et leurs éloignements respectifs de la section d'après.

Pour le canal d'essai puisque le matériau des parois est le verre, et celui du fond est en métal on prendra les données suivantes :

- Rive gauche (*Left over bank*) : paroi gauche du canal $n_{\text{verre}} = 0.0095 \text{ s. m}^{-\frac{1}{3}}$;
- Canal principal (*Main channel*) : fond du canal $n_{\text{metal}} = 0.0117 \text{ s. m}^{-\frac{1}{3}}$;
- Rive droite (*Right over bank*) : paroi droite du canal $n_{\text{verre}} = 0.0095 \text{ s. m}^{-\frac{1}{3}}$.

Les informations géométriques seront variées selon la pente, de façon que la dénivelée entre la section 12.5 et la section 0 sera spécifiée selon la pente du canal pour chaque projet.

Toutefois, des sections en travers seront ajoutées dans les endroits jugés nécessaires (sections de mesures, emplacements de singularités...)

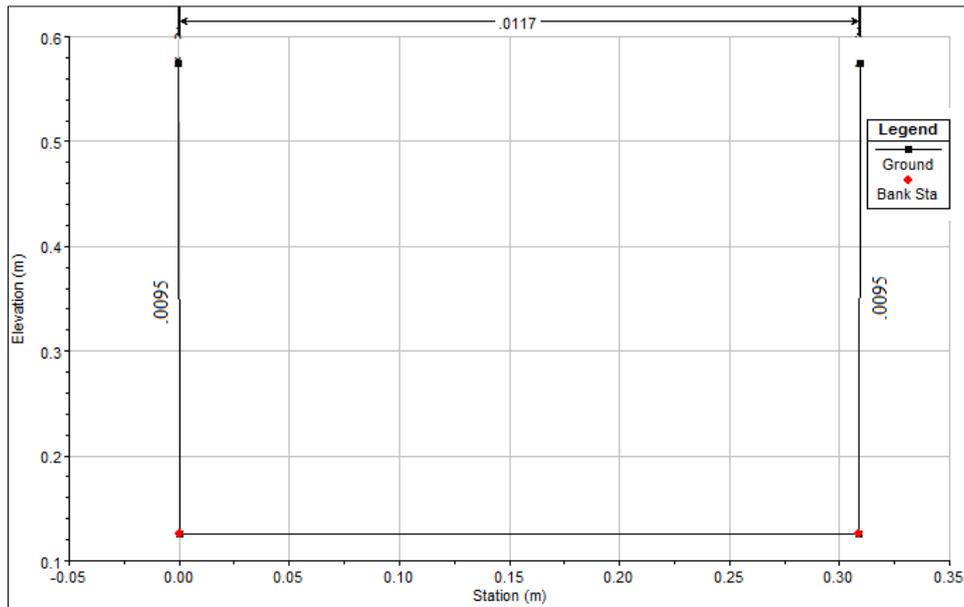


Figure II.1 : Section en travers du canal expérimental sur HEC-RAS

1.1.2 Les piles de pont :

Pour introduire les données représentant les piles de ponts sur le logiciel, il est impératif de créer la section sur laquelle la singularité sera placée dans l'expérience, ainsi que les conditions réelles de l'essai, telle que, les dimensions du dispositif des piles.

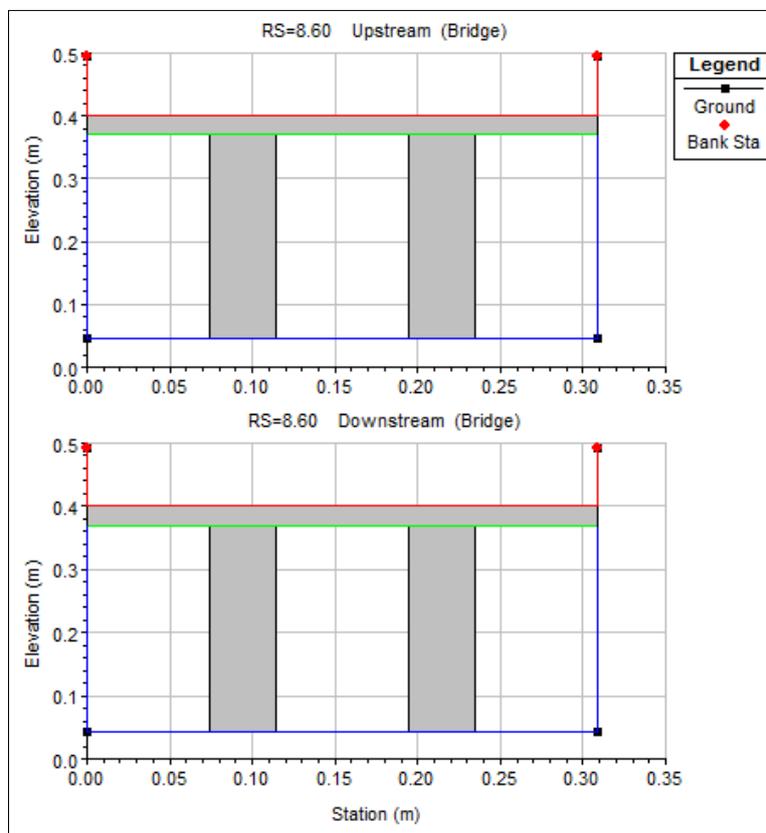


Figure II.2: Représentation des piles de pont sur HEC-RAS

Le programme de calcul ne prend pas en compte la forme des piles, alors, il demande comme données d'entrée, la largeur des piles suivant la hauteur, l'emplacement de la ligne médiane par rapport aux parois. Ainsi que, l'élévation du tablier, sa largeur et son épaisseur.

1.1.3 Les plaques rugueuses :

Afin de varier la rugosité du fond les plaques rugueuses qui accompagnent le canal sont de dimensions de $(125 \times 30.9 \times 5\text{cm})$ avec une forte valeur du coefficient de Manning $n = 0.08 \text{ s. m}^{-\frac{1}{3}}$.

L'inclusion des plaques rugueuses dans le modèle géométrique sur HEC-RAS se fait par la modification de la valeur du coefficient de Manning des sections dans lesquelles les plaques sont placées, et en ajoutant 5 cm d'élévation pour ces sections.

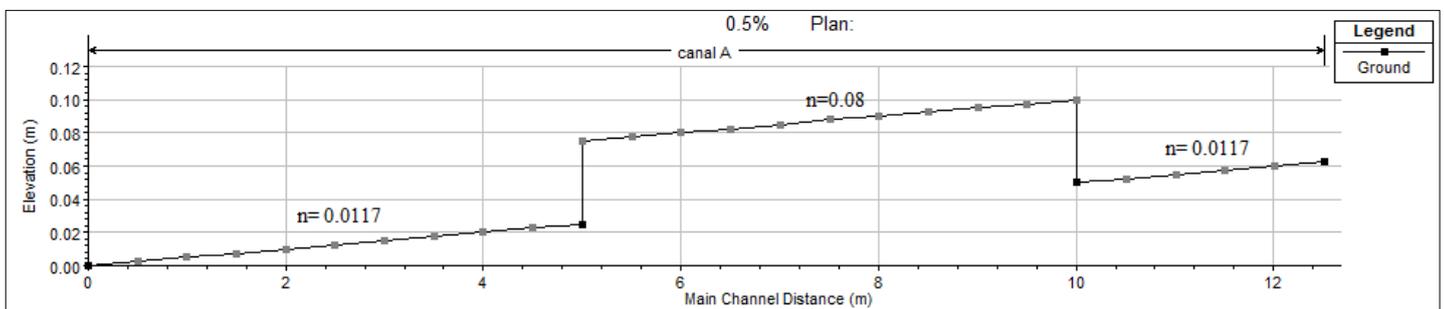


Figure II.3: Profil en long du fond du canal avec plaques

1.2 Les données de débits :

Dans cette partie les débits seront introduits sous forme de dix profils à simuler en écoulement uniforme, ainsi que les conditions aux limites. Lorsque les débits correspondants aux différents profils devant être calculés sont spécifiés, il faut par la suite définir les conditions aux limites de l'écoulement. Elles sont nécessaires pour calculer la hauteur d'eau initiale aux extrémités de chaque tronçon. Pour un écoulement torrentiel, seulement les conditions à la section amont sont nécessaires, tandis que pour un écoulement fluvial, les conditions limites à l'aval seulement sont utilisées. Selon le régime d'écoulement modélisé, une seule des deux conditions limites peut être indiquée, toutefois, les deux conditions sont nécessaires quand c'est en régime critique.

Les débits varient de 10 à $100 \text{ m}^3/\text{h}$ avec un pas de $10 \text{ m}^3/\text{h}$. L'option de la hauteur normal est choisie pour les pentes positives non nulles, c'est-à-dire il est estimé que la pente de la ligne d'énergie égale à la pente de fond du canal, et l'option du calcul de la hauteur critique pour les pentes de $(-0.5\%, 0\%)$.

1.3 Lancement des simulations :

La dernière étape nécessaire à la modélisation sur HEC-RAS est de définir le plan de simulation utilisé, ainsi que le régime d'écoulement défini comme un régime mixte, afin de permettre au logiciel de calculer lui-même la hauteur critique. En tout il y aura à créer 21 projets sur HEC-RAS, pour lesquels sont définies les mêmes options de simulations.

Tableau II.1 : Simulations lancées sur HEC-RAS

Pente	Canal simple	Piles de pont	Avec plaques
-0.5 %	10 profils	10 profils	10 profils
0 %	10 profils	10 profils	10 profils
0.5 %	10 profils	10 profils	10 profils
1.0%	10 profils	10 profils	10 profils
1.5%	10 profils	10 profils	10 profils
2.0%	10 profils	10 profils	10 profils
2.5%	10 profils	10 profils	10 profils

2. Résultats des simulations et discussion:

A la suite de la simulation les résultats sont automatiquement sauvegardés dans un fichier, ils consistent en des profils en long du tronçon simulé, ainsi que des vues en 3D. Le programme donne aussi les résultats sous forme de tableaux, comme on le verra par la suite dans le tableau des résultats des sections transversales, il y a plusieurs variables qui sont calculées par HEC-RAS en plus des niveaux d'eau, il donne la hauteur de la ligne d'énergie ainsi que les vitesses et la hauteur critique, pour chaque profil et section.

2.1 Simulation d'écoulement sur canal simple :

Pour la simulation en canal simple, on se contentera de la visualisation des profils en long du canal pour différents débits et pentes, ainsi que la prise de la hauteur d'écoulements dans les sections de mesures éventuelles au laboratoire.

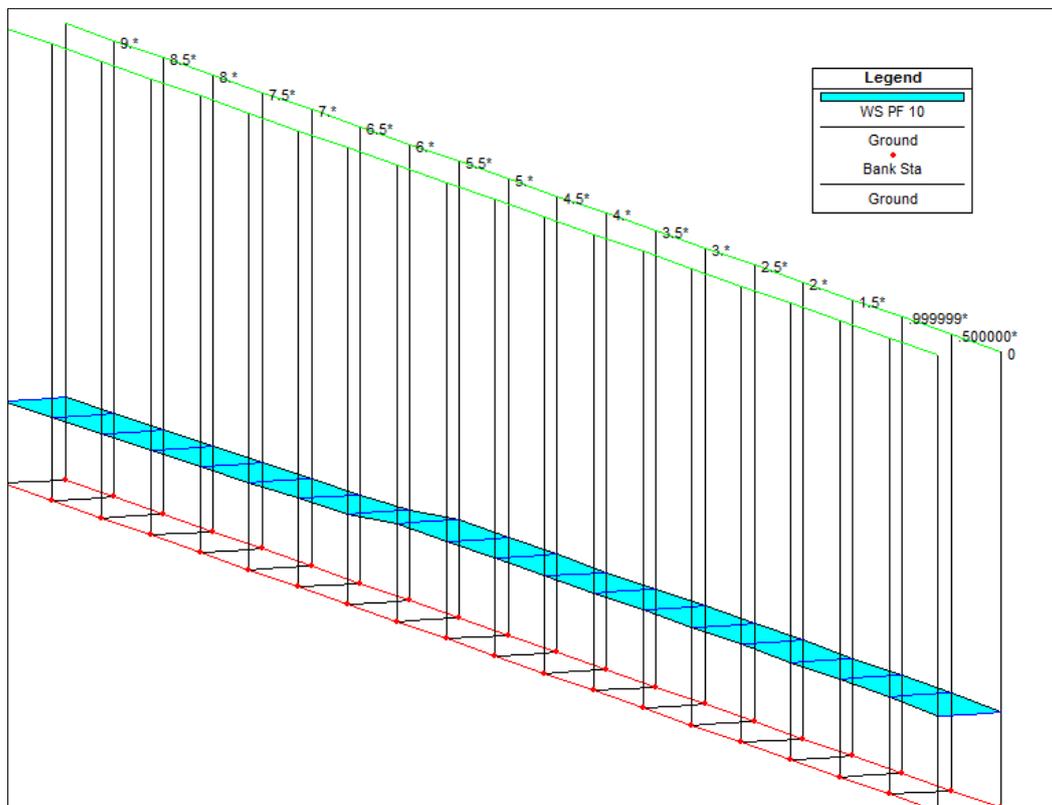


Figure II.4 : Vue en 3D du canal sur HEC-RAS

2.1.1 Tableaux et graphiques de résultats :

Les tableaux suivants contiennent les différentes caractéristiques d'écoulements pour différentes pentes et un débit de $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$:

Tableau II.2 : Caractéristiques d'écoulement sur canal simple $I = -0.5\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h (cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m. s^{-1})$	F_r
10.5	1.0	17.8	16.8	7.4	19.0	0.000548	0.373	0.29
8	2.2	17.5	15.3	7.4	18.8	0.000710	0.411	0.34
6	3.2	17.2	14.0	7.4	18.4	0.000908	0.451	0.39
4.5	4.0	16.8	12.8	7.4	18.2	0.001123	0.488	0.43

Tableau II.3 : Caractéristiques d'écoulement sur canal simple $I = 0\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h (cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m. s^{-1})$	F_r
10.5	0	11.4	11.4	7.4	13.6	0.001561	0.550	0.52
8	0	11.0	11.0	7.4	13.3	0.001739	0.571	0.55
6	0	10.5	10.5	7.4	12.8	0.001986	0.599	0.59
4.5	0	9.8	9.8	7.4	12.4	0.002360	0.637	0.65

Tableau II.4 : Caractéristiques d'écoulement sur canal simple $I = 0.5\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h (cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m. s^{-1})$	F_r
10.5	5.2	13.0	7.8	7.4	16.2	0.004680	0.810	0.93
8	4.0	11.7	7.7	7.4	15.3	0.004680	0.810	0.93
6	3.0	10.7	7.7	7.4	14.4	0.004680	0.810	0.93
4.5	2.3	10.0	7.7	7.4	13.9	0.004680	0.810	0.93

Tableau II.5 : Caractéristiques d'écoulement sur canal simple $I = 1.5\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h (cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m. s^{-1})$	F_r
10.5	15.8	21.5	5.7	7.4	27.6	0.011168	1.090	1.45
8	12.0	18.0	6.0	7.4	23.6	0.009759	1.042	1.35
6	9.0	14.8	5.8	7.4	20.7	0.010736	1.076	1.42
4.5	6.7	12.6	5.9	7.4	18.7	0.010776	1.077	1.42

Tableau II.6 : Caractéristiques d'écoulement sur canal simple $I = 2.0\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h (cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m. s^{-1})$	F_r
10.5	21.0	26.1	5.1	7.4	33.9	0.016516	1.243	1.77
8	17.0	22.1	5.0	7.4	29.9	0.017463	1.266	1.82
6	12.0	17.0	4.9	7.4	25.2	0.017626	1.270	1.82
4.5	8.9	13.9	5.0	7.4	22.1	0.017489	1.267	1.82

Les figures suivantes sont des profils en long du canal pour différents débits et pentes :

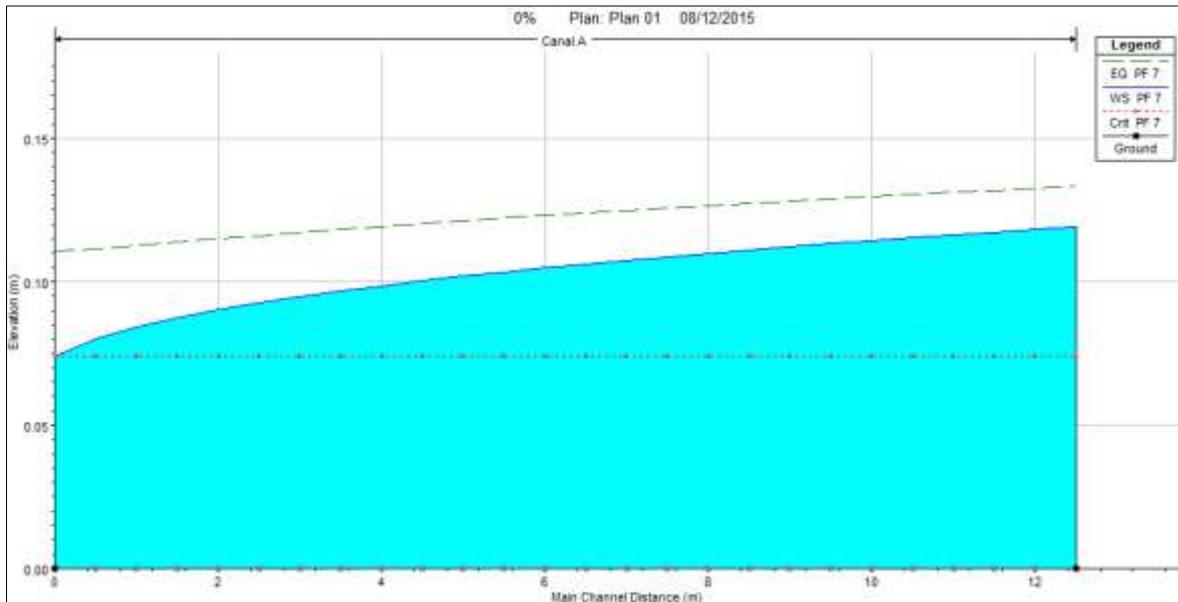


Figure II.5 : Profil en long pour canal simple $I = 0\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

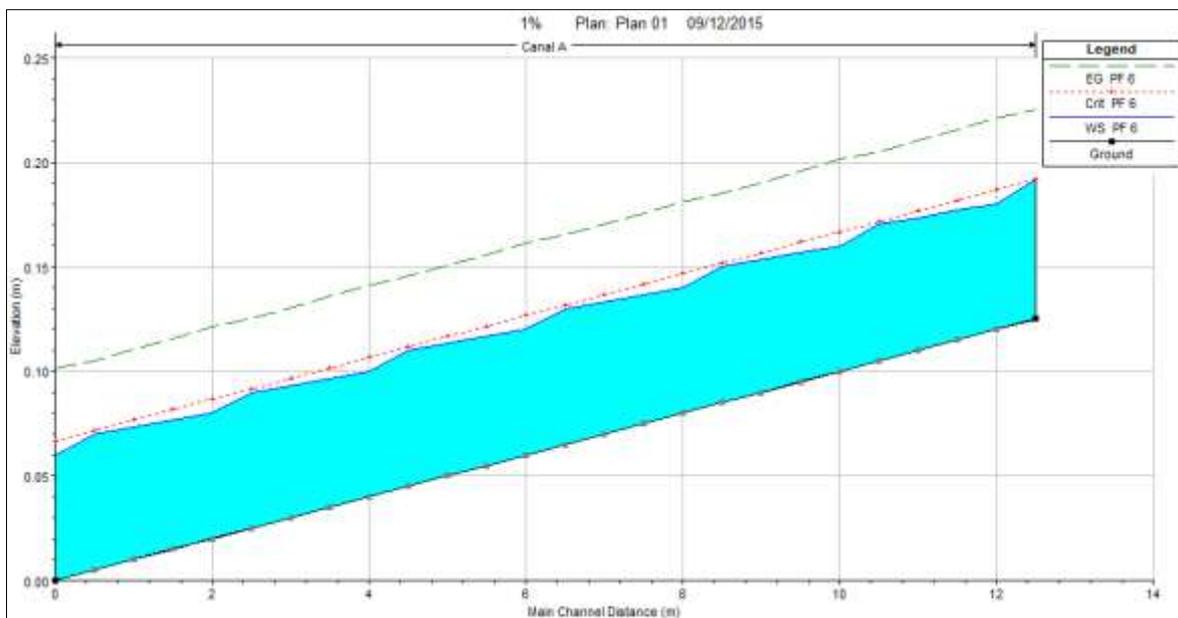


Figure II.6 : Profil en long pour canal simple $I = 1.0\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$

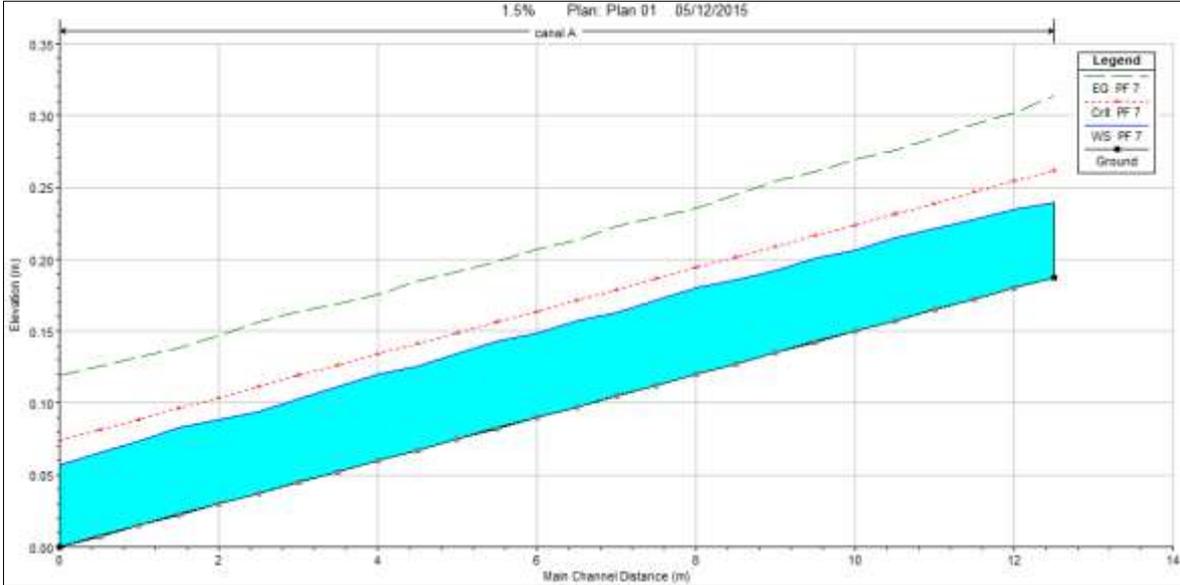


Figure II.7 : Profil en long pour canal simple $I = 1.5\%$, $Q = 70 \text{ m}^3/h$

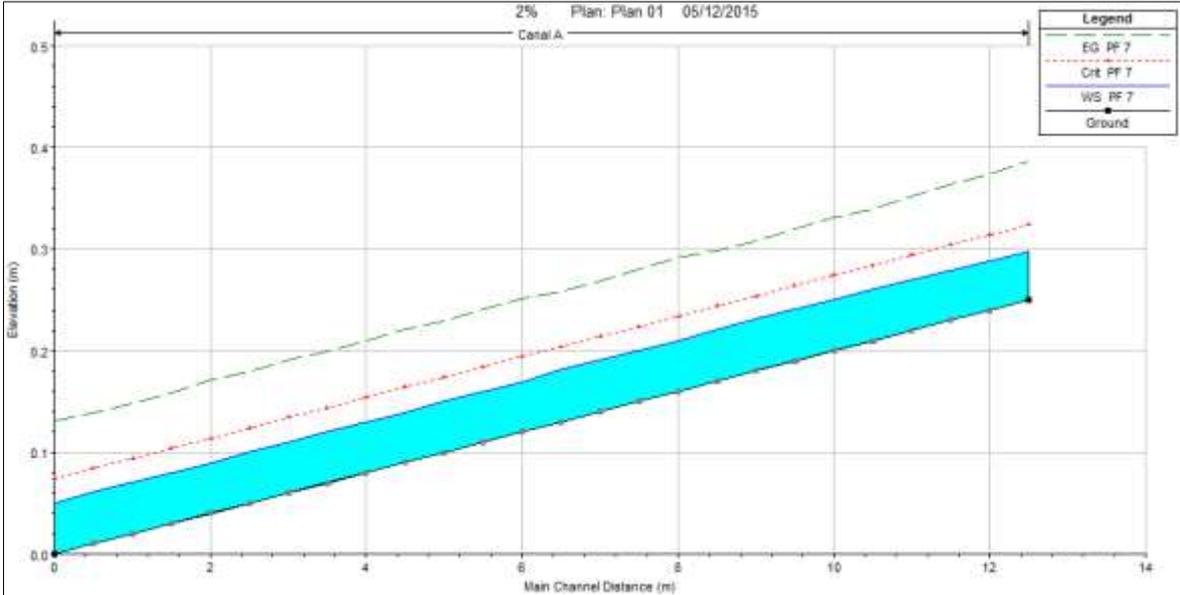


Figure II.8 : Profil en long pour canal simple $I = 2.0\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/h$

2.1.2 Discussion et interprétation :

Après comparaison des pentes : de fond du canal, de la surface libre et d'énergie pour le cas des pentes non nulles positives il s'avère qu'elles sont plus au moins proches ce qui confirme le régime d'écoulement uniforme et justifie le choix vis-à-vis de la hauteur normale comme conditions aux limites. Cependant, ce n'est pas le cas pour ($I = -0.5\%$ et $I = 0\%$) parce que physiquement la pente d'énergie ne peut pas être négative ou nulle, ainsi quand l'option de la hauteur critique est prise comme condition aux limites le programme de calcul la suppose initialement comme hauteur de la surface libre de l'eau.

A partir de la pente 1% les vitesses d'écoulements augmentent au-dessus de $0.9 \div 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) et le régime passe d'un écoulement fluvial à un écoulement torrentiel d'ailleurs les valeurs du nombre de Froude sont ≥ 1 pour les pentes dépassants 1% (les vitesses d'écoulements sont supérieures aux petites ondes), reste que pour cette inclinaison du canal le régime reste plutôt critique puisque pour tous les profils la ligne d'eau reste proche de la hauteur critique ce qui justifie le caractère déambulant du plan d'eau lors de la visualisation des profils en long.

2.2 Simulation d'un écoulement sur canal avec des piles de pont :

En ce qui concerne la simulation des piles de pont en travers du canal, nous allons visualiser l'influence des piles sur le régime l'écoulement ainsi que les hauteurs obtenues sur l'emplacement même de la singularité qui est dans ce cas la section transversale n°8.60.

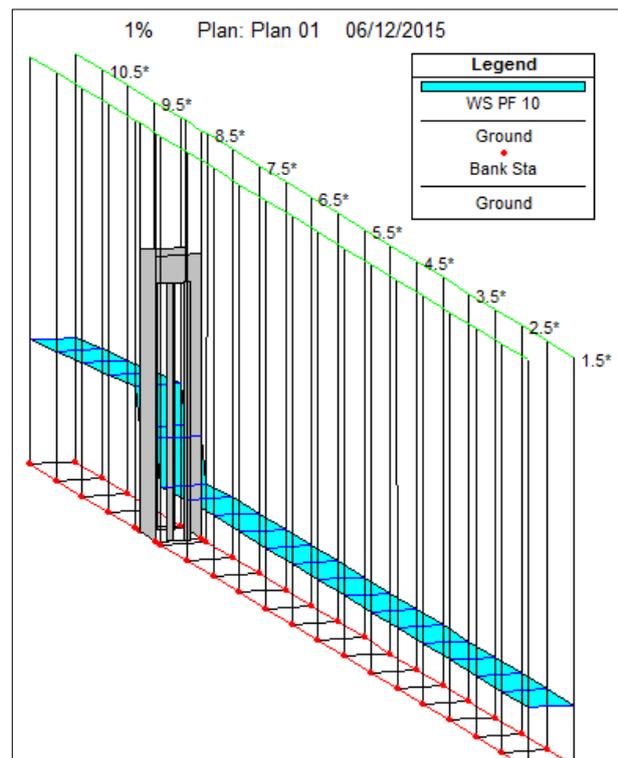


Figure II.9 : Vue en 3D du canal avec piles de pont sur HEC-RAS

2.2.1 Tableaux et graphiques de résultats :

Les tableaux suivants contiennent les différentes caractéristiques d'écoulements pour différentes pentes et un débit de $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$:

Tableau II.7 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = -0.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h(cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{\dot{e}g}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
Am	11.5	0.5	16.0	15.6	5.9	16.0	0.000346	0.289	0.23
	10.5	1.0	16.0	15.0	5.9	16.0	0.000381	0.300	0.25
	9	1.7	15.9	14.1	5.9	16.0	0.000449	0.319	0.27
Av	8	2.0	15.5	13.5	5.9	16.0	0.000507	0.333	0.29
	4.5	4.0	14.9	11.0	5.9	16.0	0.000899	0.411	0.40

Tableau II.8 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 0\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h(cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{\dot{e}g}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
Am	11.5	0	9.7	9.7	5.9	11.0	0.001262	0.463	0.47
	10.5	0	9.5	9.5	5.9	11.0	0.001323	0.471	0.49
	9	0	9.3	9.3	5.9	10.0	0.001433	0.485	0.51
Av	8	0	9.1	9.1	5.9	10.0	0.001521	0.495	0.52
	4.5	0	8.3	8.3	5.9	10.0	0.001999	0.545	0.61

Tableau II.9 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 0.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h(cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{\dot{e}g}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
Am	11.5	5.8	14.6	8.8	5.9	16.0	0.001651	0.509	0.55
	10.5	5.2	14.6	9.3	5.9	16.0	0.001407	0.482	0.50
	9	4.5	14.4	9.9	5.9	15.0	0.001185	0.453	0.46
Av	8	4.3	8.3	4.0	5.9	15.0	0.017257	1.126	1.80
	4.5	2.3	7.0	4.8	5.9	12.0	0.010109	0.944	1.38

Tableau II.10: Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 1.0\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h(cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{\dot{e}g}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
Am	11.5	11.5	18.9	7.4	5.9	21.0	0.002736	0.607	0.71
	10.5	10.5	18.9	8.4	5.9	20.0	0.001886	0.534	0.59
	9	9.0	18.9	9.9	5.9	20.0	0.001176	0.452	0.46
Av	8	8.0	12.1	4.1	5.9	18.0	0.015800	1.094	1.72
	4.5	4.5	8.7	4.2	5.9	15.0	0.014615	1.066	1.66

Tableau II.11 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 1.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h(cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{\dot{e}g}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
Am	11.5	17.3	21.4	4.1	5.9	27.0	0.015662	1.091	1.71
	10.5	15.8	19.9	4.1	5.9	26.0	0.015662	1.091	1.71
	9	14.3	18.4	4.1	5.9	24.0	0.001521	0.495	0.52
Av	8	12.7	16.9	4.2	5.9	23.0	0.016576	1.111	1.76
	4.5	6.7	10.9	4.1	5.9	17.0	0.016576	1.111	1.76

Tableau II.12 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 2.0\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h(cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
Am	11.5	23.0	27.0	4.0	5.9	33.0	0.017453	1.130	1.81
	10.5	21.0	25.1	4.1	5.9	31.0	0.016161	1.102	1.74
	9	18.0	27.9	9.9	5.9	29.0	0.001188	0.454	0.46
Av	8	17.0	21.1	4.0	5.9	27.0	0.016554	1.110	1.76
	4.5	9.0	13.1	4.1	5.9	19.0	0.016267	1.104	1.75

Tableau II.13 : Caractéristiques d'écoulement avec piles de pont $I = 2.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h(cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
Am	11.5	28.7	32.4	3.7	5.9	40.0	0.022374	1.225	2.04
	10.5	26.2	29.9	3.7	5.9	38.0	0.022605	1.229	2.05
	9	23.7	27.4	3.7	5.9	35.0	0.022418	1.226	2.04
Av	8	21.2	25.3	4.0	5.9	32.0	0.016571	1.111	1.76
	4.5	11.2	15.0	3.8	5.9	22.0	0.020340	1.188	1.95

Les figures suivantes sont des profils en long du canal pour différents débits et pentes :

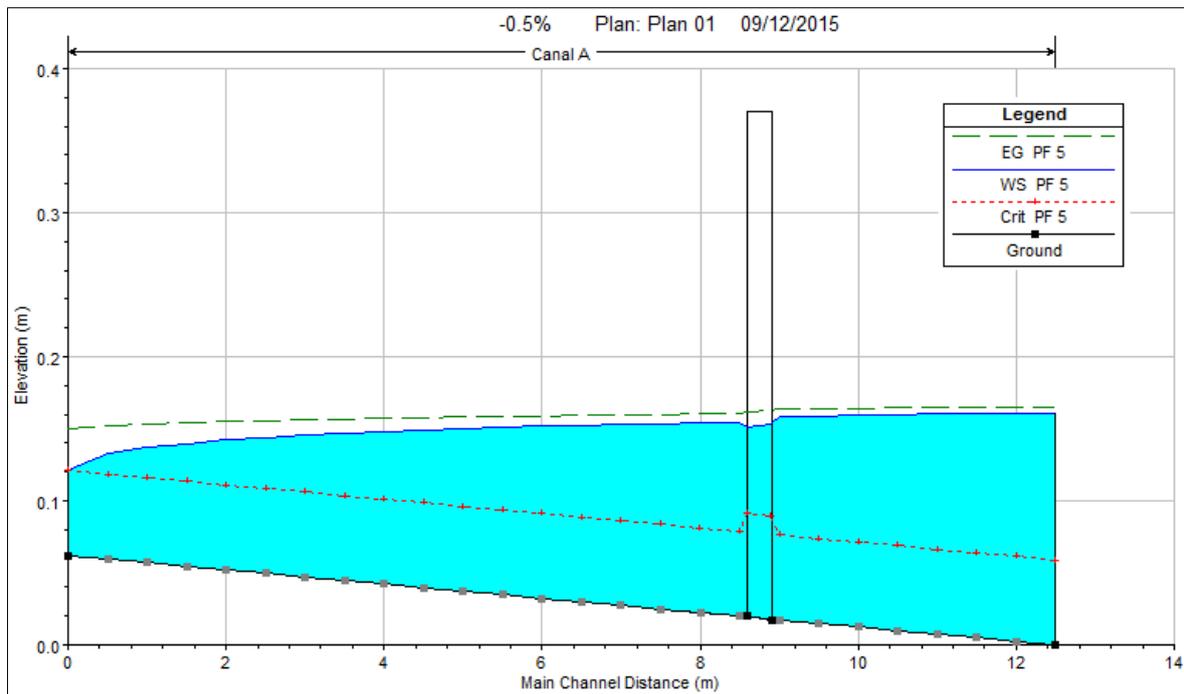


Figure II.10 : Profil en long pour canal avec piles de pont $I = -0.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

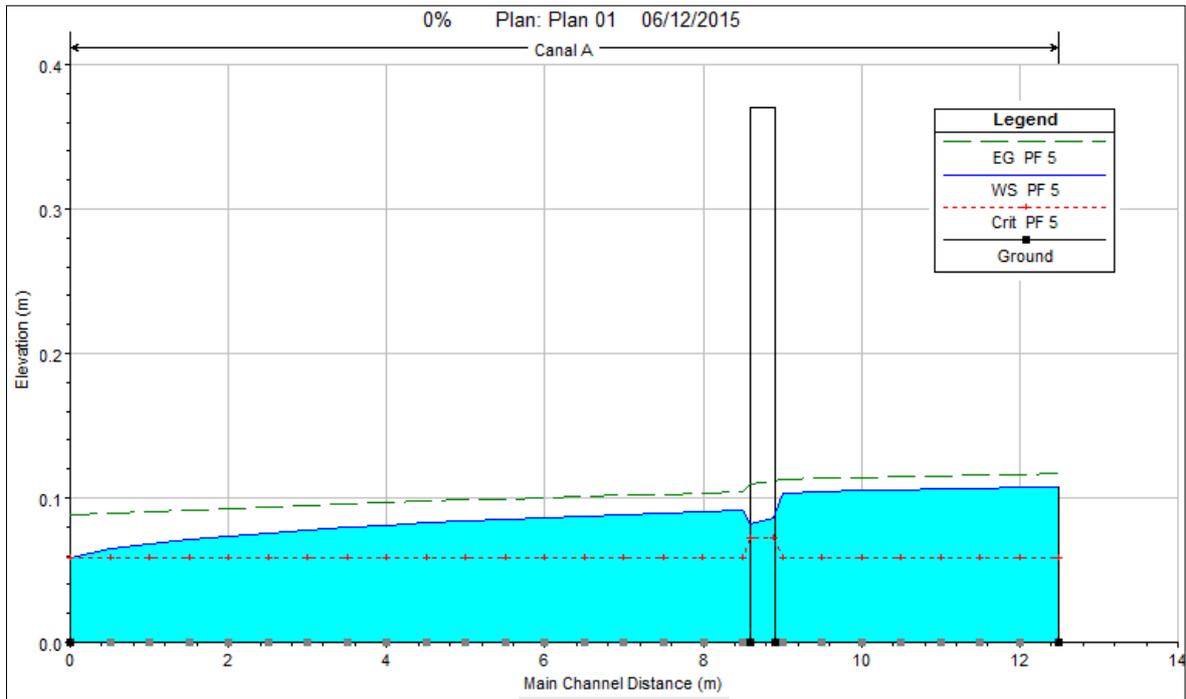


Figure II.11 : Profil en long pour canal avec piles de pont $I = 0\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/h$

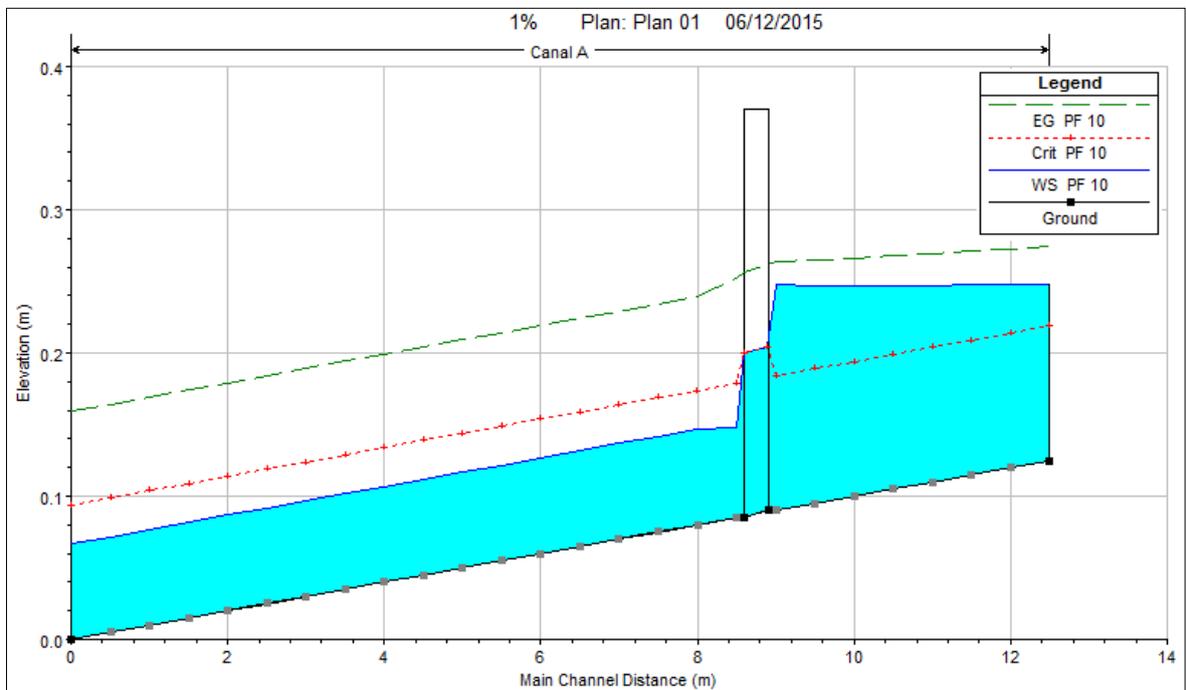


Figure II.12 : Profil en long pour canal avec piles de pont $I = 1.0\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/h$

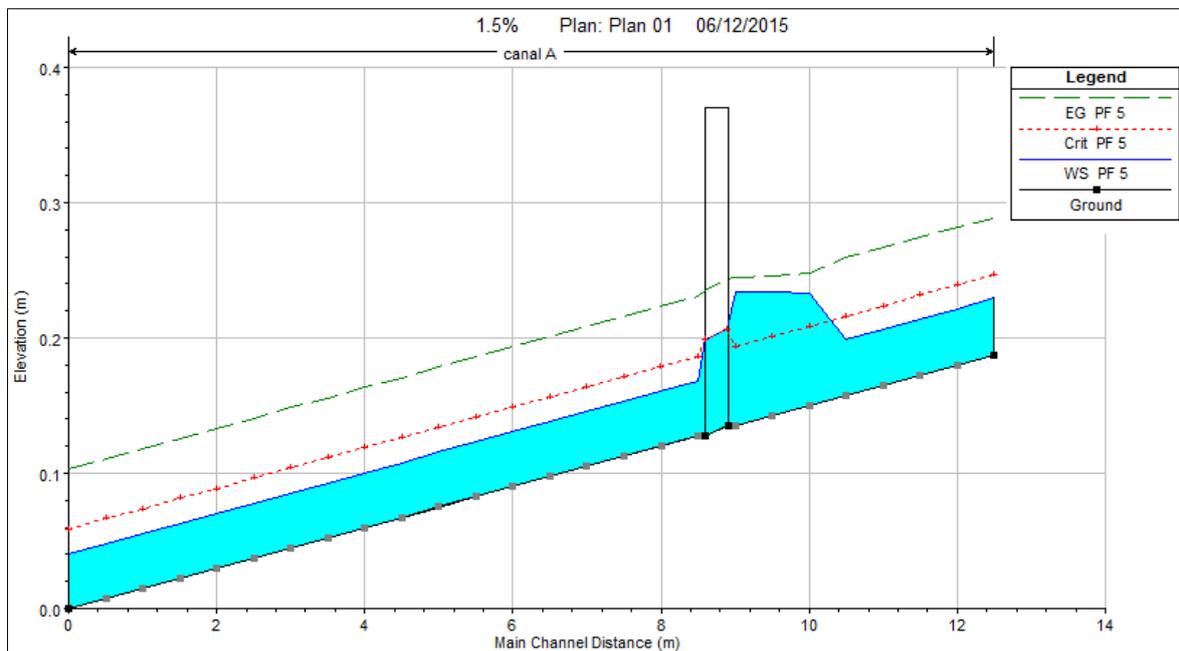


Figure II.13 : Profil en long pour canal avec piles de pont $I = 1.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

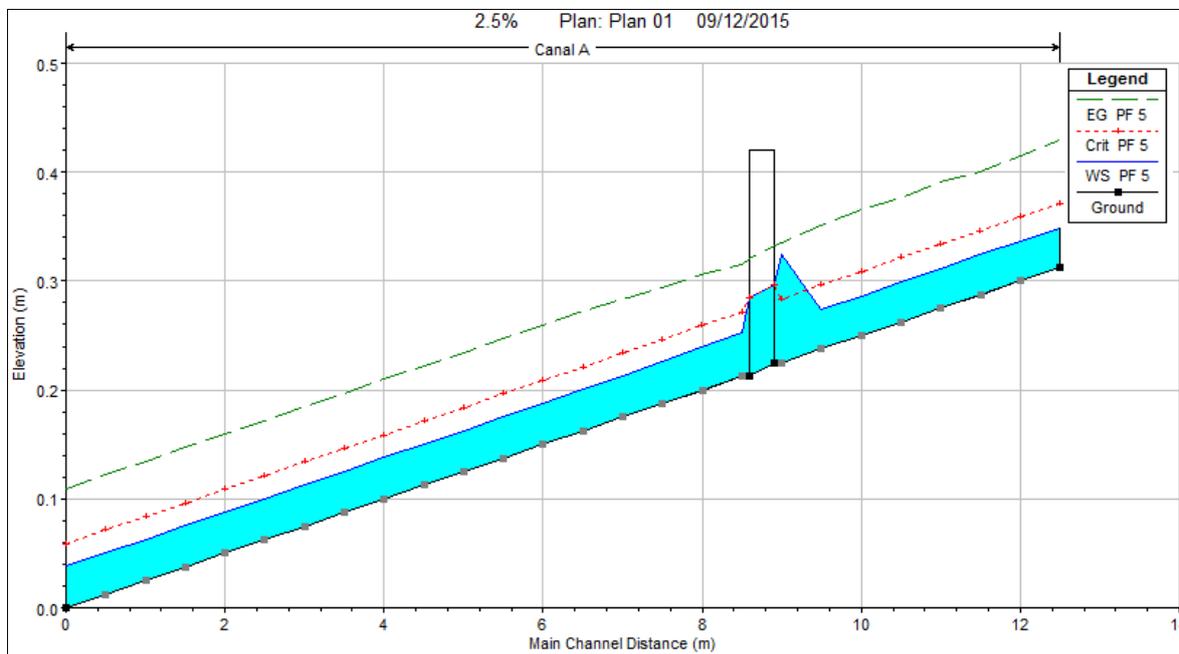


Figure II.14 : Profil en long pour canal avec piles de pont $I = 2.5\%$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

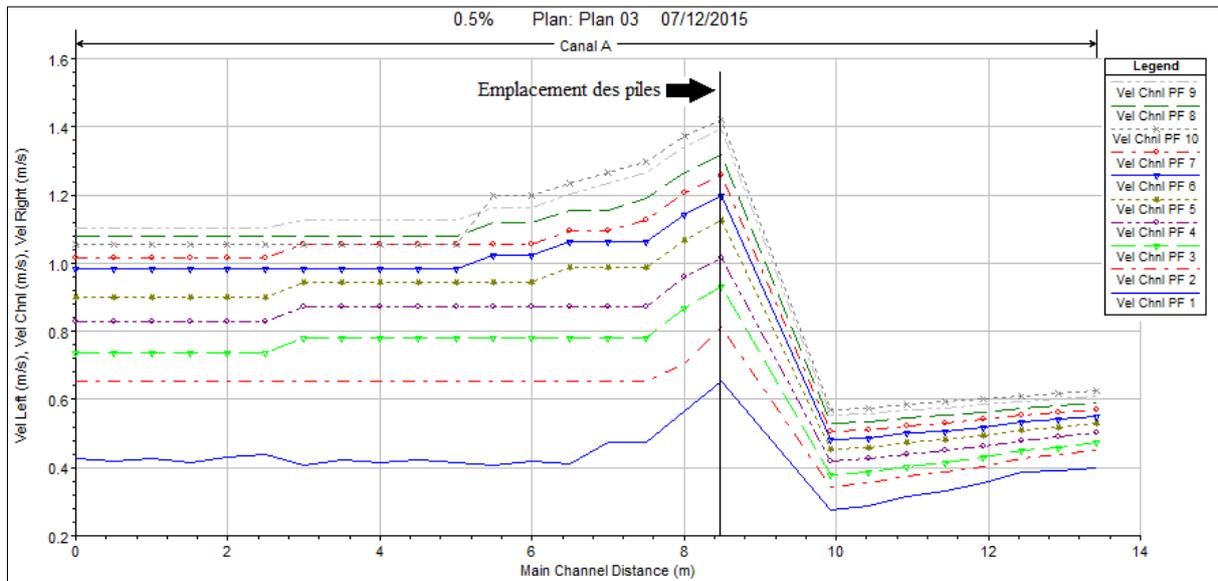


Figure II.15 : Distribution des vitesses le long du canal pour différents débits $I = 0.5\%$

2.2.2 Discussion et interprétation :

Ce qui est remarqué a priori, c'est une diminution locale des vitesses à l'approche de l'obstacle de contraction qui est dans ce cas les piles de ponts en travers de l'écoulement, ce qui se manifeste aussi par l'augmentation des hauteurs de la ligne d'eau et un passage régional en régime fluvial pour toutes les pentes et débits.

Pour le cas de la figure II.13, la hauteur d'eau commence à s'élever dans la section n° 10.5, par contre la ligne d'énergie diminue faiblement, alors il y'a diminution de vitesse d'écoulement.

Quoiqu'en travers de la pile elle-même les vitesses augmentent suite à la contraction de la section d'écoulement.

Dans la majorité des profils simulés, le régime d'écoulements reste fluvial pour les pentes $\leq 1\%$ et devient torrentiel avec l'augmentation d'inclinaison. Cependant, un changement local du régime se manifeste au niveau de la singularité.

2.3 Simulation d'un écoulement sur canal avec plaques rugueuses :

L'intégration des plaques rugueuses dans la simulation a été faite dans le but d'étudier l'influence du changement brusque de la rugosité sur le régime d'écoulement, et aussi de savoir jusqu'à quel point cela puisse-t-il agir sur la variation des hauteurs d'eau à l'approche de la singularité. En l'occurrence, nous nous intéresserons aux hauteurs d'écoulements en long du canal, ainsi que les variations de vitesses calculées par HEC-RAS.

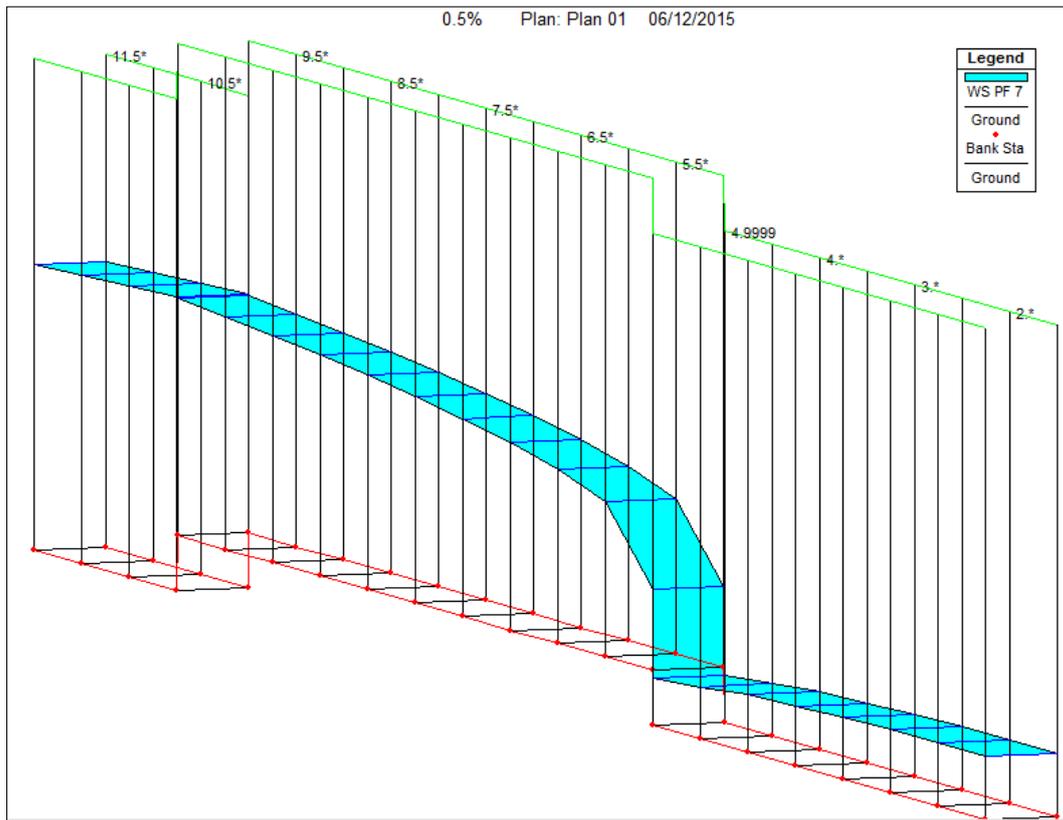


Figure II.16 : Vue en 3D du canal avec plaques rugueuses sur HEC-RAS

2.3.1 Tableaux et graphiques de résultats :

Les tableaux suivants contiennent les différentes caractéristiques d'écoulements pour différentes pentes et un débit de $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$:

Tableau II.14 : Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I = -0.5\%$

n	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h(cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
0.0117	11.5	0.5	27	26.5	5.9	27.1	0.000088	0.170	0.11
0.08	8.5	7.0	25.5	18.5	5.9	25.8	0.010304	0.244	0.18
0.08	6.5	7.9	23	15.1	5.9	23.4	0.017518	0.298	0.24
0.0117	4.0	4.2	14.8	10.5	5.9	15.7	0.001000	0.426	0.42
0.0117	3.0	4.7	14.5	9.8	5.9	15.6	0.001225	0.459	0.47

Tableau II.15:Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I=0\%$

n	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h(cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
0.0117	11.5	0.0	24.5	24.5	5.9	24.6	0.000107	0.184	0.12
0.08	8.5	5.0	22.7	17.7	5.9	23.1	0.011449	0.254	0.19
0.08	6.5	5.0	19.7	14.7	5.9	20.2	0.018855	0.306	0.25
0.0117	4.0	0.0	8.3	8.3	5.9	9.8	0.001977	0.543	0.60
0.0117	3.0	0.0	8.0	8.0	5.9	9.6	0.002201	0.563	0.64

Tableau II.16: Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I = 0.5\%$

n	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h (cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
0.0117	11.5	5.8	30.0	24.2	6.7	30.3	0.000158	0.223	0.14
0.08	8.5	9.3	27.7	18.5	6.7	28.2	0.014892	0.293	0.22
0.08	6.5	8.2	24.0	15.8	6.7	24.6	0.022489	0.342	0.28
0.0117	4.0	2.0	6.6	4.6	6.7	13.6	0.015980	1.169	1.74
0.0117	3.0	1.5	6.6	5.1	6.7	12.3	0.011824	1.058	1.49

Tableau II.17: Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I=1.0\%$

n	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h (cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
0.0117	11.5	11.5	33.6	22.1	6.7	33.9	0.000200	0.245	0.17
0.08	8.5	13.5	30.9	17.4	6.7	31.4	0.017298	0.310	0.24
0.08	6.5	11.5	26.7	15.2	6.7	27.3	0.024801	0.355	0.29
0.0117	4.0	4.0	8.6	4.6	6.7	15.5	0.015823	1.165	1.73
0.0117	3.0	3.0	7.7	4.7	6.7	14.3	0.014753	1.138	1.67

Tableau II.18: Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I = 1.5\%$

n	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h (cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
0.0117	11.5	1.4	17.3	35.3	18.1	5.9	0.000233	0.249	0.19
0.08	8.5	1.4	17.7	32.3	14.6	5.9	0.019049	0.307	0.26
0.08	6.5	1.4	14.7	27.9	13.2	5.9	0.024964	0.340	0.30
0.0117	4.0	1.4	6.0	9.8	3.8	5.9	0.019877	1.179	1.93
0.0117	3.0	1.4	4.5	8.3	3.8	5.9	0.019877	1.179	1.93

Tableau II.19: Caractéristiques d'écoulement avec plaques rugueuses $I=2.0\%$

n	Section	$\nabla_{fd}(cm)$	$\nabla_{sl}(cm)$	$h (cm)$	$h_c(cm)$	$H(cm)$	$I_{ég}(m/m)$	$v(m.s^{-1})$	F_r
0.0117	11.5	23.0	39.3	16.3	5.9	39.7	0.000308	0.277	0.22
0.08	8.5	22.0	35.7	13.7	5.9	36.3	0.022645	0.328	0.28
0.08	6.5	18.0	30.7	12.7	5.9	31.3	0.028019	0.354	0.32
0.0117	4.0	8.0	11.6	3.6	5.9	19.6	0.023905	1.252	2.11
0.0117	3.0	6.0	9.6	3.6	5.9	17.6	0.023905	1.252	2.11

Les figures suivantes sont des profils en long du canal pour différents débits et pentes :

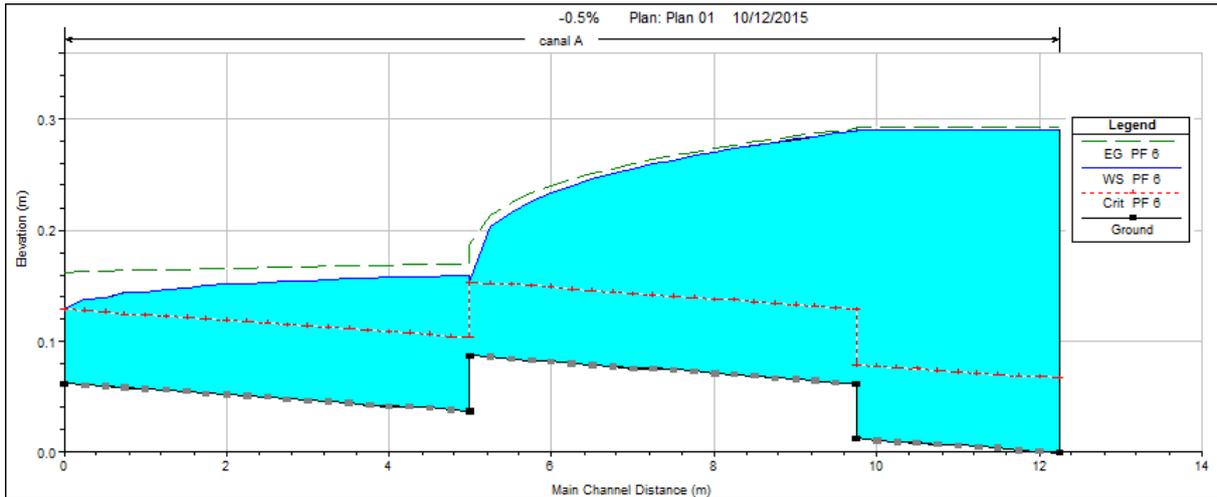


Figure II.17 : Profil en long pour canal avec plaques $I = -0.5\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$

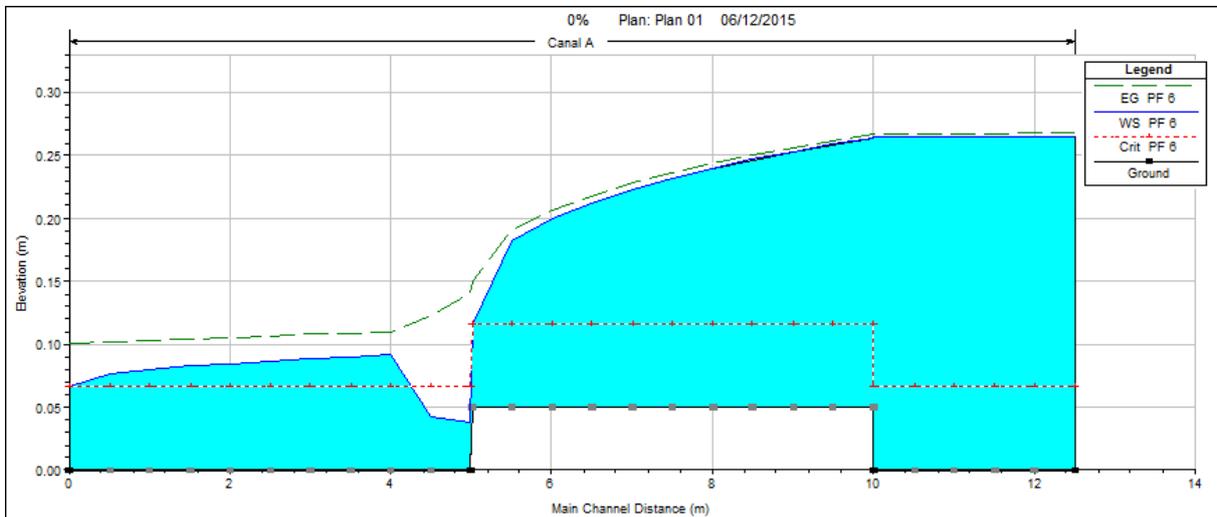


Figure II.18 : Profil en long pour canal avec plaques $I = 0\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$

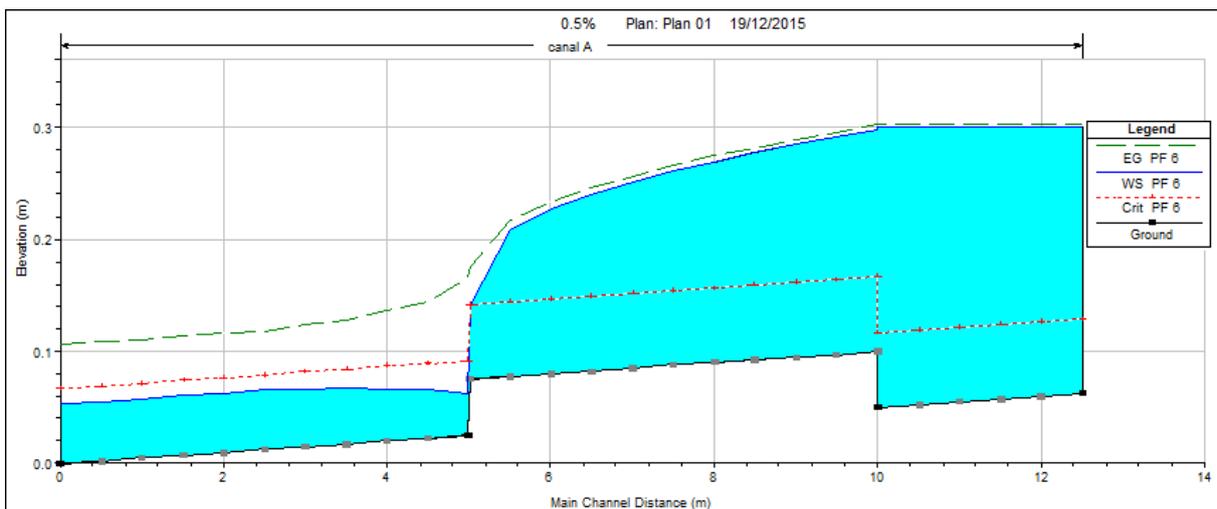


Figure II.19 : Profil en long pour canal avec plaques $I = 0.5\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$

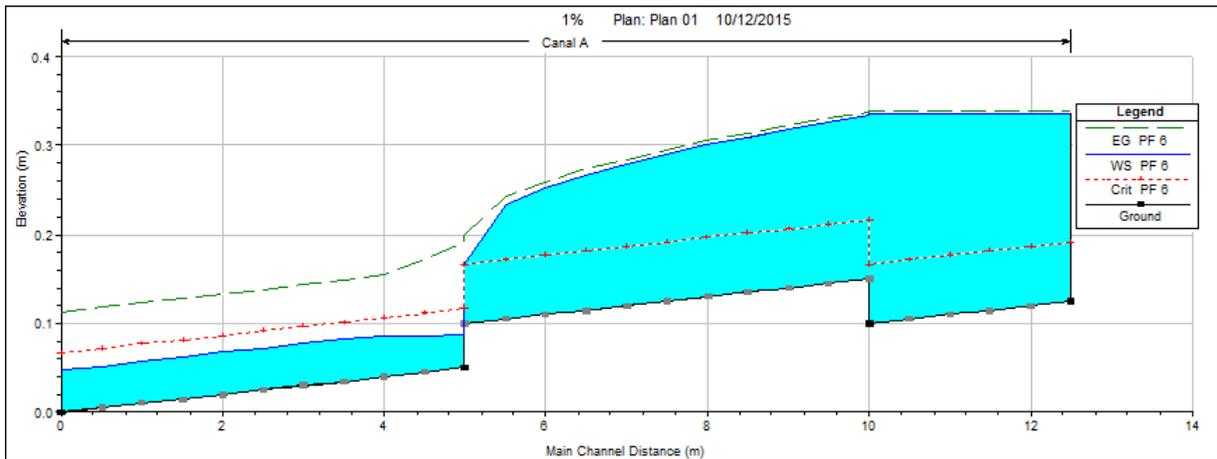


Figure II.20 : Profil en long pour canal avec plaques $I = 1.0\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$

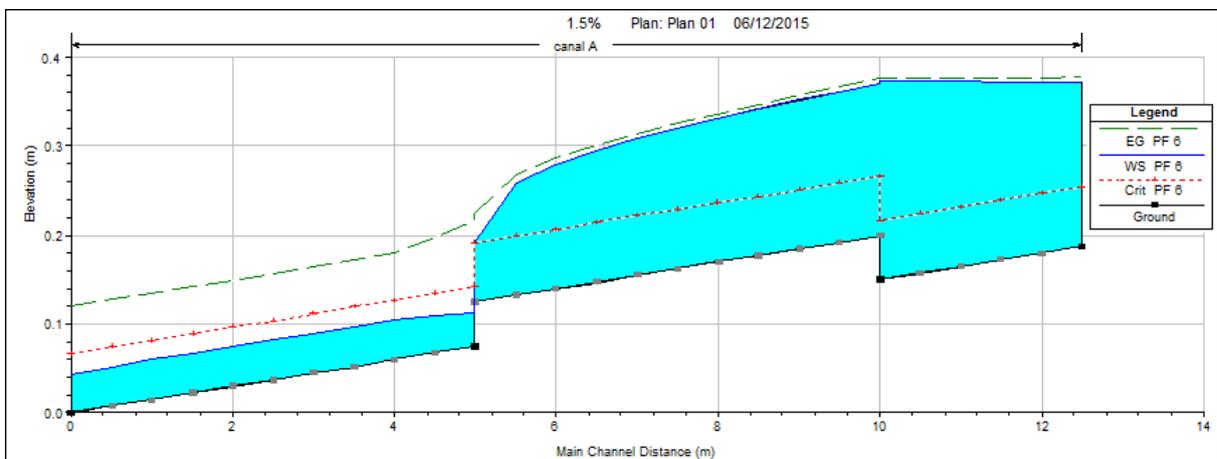


Figure II.21 : Profil en long pour canal avec plaques $I = 1.5\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$

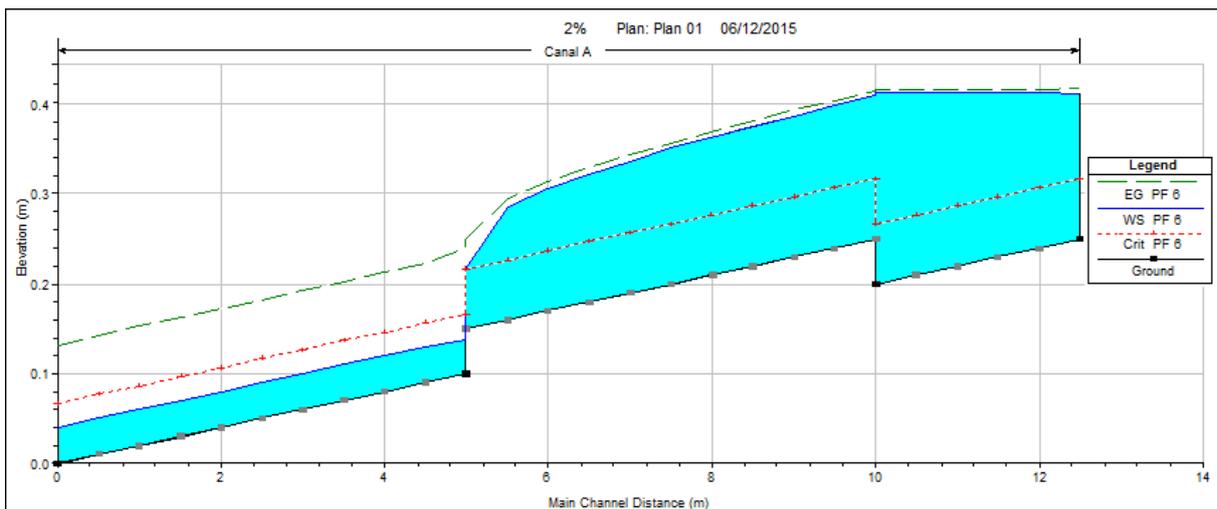


Figure II.20 : Profil en long pour canal avec plaques $I = 2.0\%$, $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$

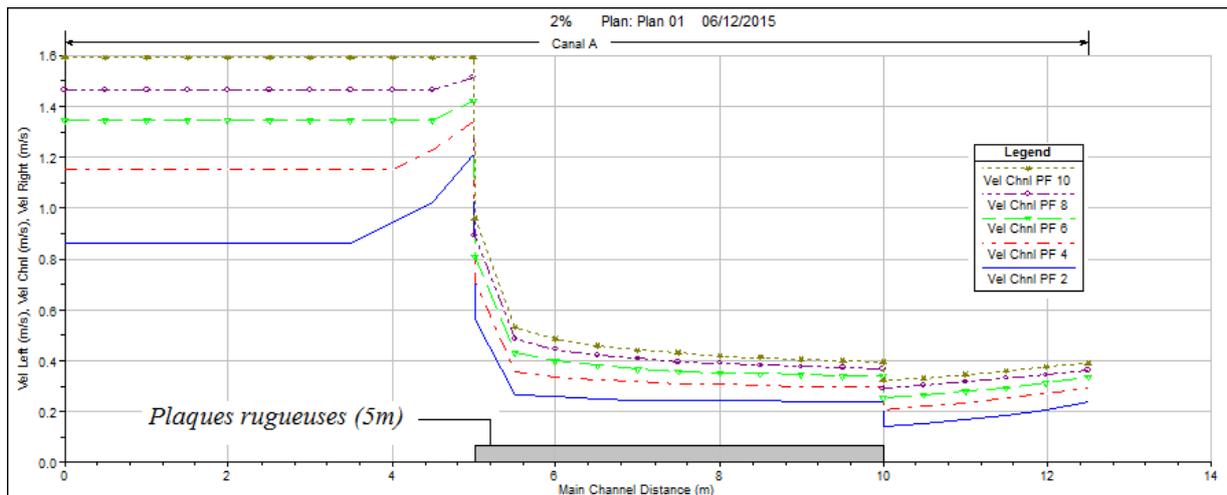


Figure II.21: Distribution des vitesses le long du canal pour différents débits $I = 2.0\%$

2.3.2 Discussion et interprétation des résultats :

Pour les pentes ($-0.5, 0\%$) le régime reste fluvial tout au long du canal, par contre pour les pentes positives non nulles le régime devient torrentiel juste après les plaques, ou un ressaut hydraulique devrait être visualisé.

L'augmentation considérable de la hauteur d'écoulement calculée par le programme est due à la grande valeur du coefficient de Manning, pour le canal (passage à une grande rugosité sur une très courte distance). Il est remarqué la création d'une section de rupture au niveau de la section n°5, qui s'explique par la variation brusque du régime sur une distance infiniment petite ce qui ne peut pas être modélisé sur ce modèle de calcul d'écoulement graduellement varié.

Conclusion :

Puisque toutes les caractéristiques géométriques du canal sont connues ainsi que les débits véhiculés, la simulation de cet écoulement en régime permanent a été largement suffisante. Quoique, comme tout modèle celui-ci présente des limites et des défauts ainsi les profils et tableaux obtenus lors de la simulation pourraient ne pas concorder complètement avec les valeurs réelles ce qui nécessitera une évaluation et un calage en comparaison avec les valeurs mesurées au laboratoire.

Chapitre III

**Mise en œuvre des écoulements sur canal expérimental et
mesures**

Chapitre III : Mise en œuvre des écoulements sur canal expérimental et mesures.

Introduction :

L'ensemble des manipulations sur le canal, a permis la visualisation de divers phénomènes d'écoulements à surface libre pour différents débits et pentes. Ce volet est donc consacré à l'explication du procédé expérimental suivi au laboratoire sur le banc d'essai, ainsi qu'à la présentation des résultats obtenus lors des manipulations, et aussi les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement.

1. Les étapes du procédé expérimental :

Le mode opératoire suivi pour toutes les manipulations est le suivant :

- Vérifier l'appareillage et nettoyer le canal ;
- Mettre en place et bien fixer la singularité (piles de pont, plaque rugueuse,...) dans l'emplacement jugé adéquat ;
- Brancher le dispositif au système électrique ;
- Réglage de la pente via le système de régulation d'inclinaison ;
- Mettre en marche la pompe qui aspirera l'eau des réservoirs pour la refouler à l'entête du canal ;
- A l'aide du bouton de régulation du débit, faire varier le débit de **10 à 100 m³/h** avec un pas de **10 m³/h** pour chaque pente ;
- Placer les piézomètres et les purger à l'aide de la seringue ;
- Pour chaque débit : mesurer à l'aide du limnimètre les hauteurs d'eau dans les endroits jugés nécessaires (changement de la pente de la ligne d'eau, changement de régime, ressaut, perturbation,...);
- Consigner les valeurs dans un tableau ;
- Prendre des photos et vidéos pour permettre de visualiser les différents phénomènes ;
- Veiller à bien nettoyer le matériel et couvrir les dispositifs (pompe, débitmètre, tableau de commande) à la fin de chaque journée de travail.

2. Les manipulations au laboratoire :

La lame d'eau mesurée et l'ensemble des caractéristiques hydrauliques calculées pour chaque débit et pente (vitesse, hauteur critique, charge, nombre de Froude), sont montrés dans les tableaux (III.1, III.2, III.3).

Les relations utilisées pour le calcul des caractéristiques hydrauliques sont :

- La hauteur critique pour un débit donné :

$$h_c = \left(\frac{Q^2}{l^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (III.1)$$

- La vitesse moyenne d'écoulement :

$$v = \frac{Q}{lh_{mes}} \quad (III.2)$$

- La hauteur de la ligne d'énergie :

$$H = h_{mes} + \frac{v^2}{2g} \quad (III.3)$$

- Le nombre de Froude :

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh_{mes}}} \quad (III.4)$$

h_c : Hauteur critique (**m**) ;

Q : Débit réglé (**m³/h**) ;

l : Largeur du canal **l = 0.309m** ;

h_{mes} : Hauteur d'eau mesurée (**m**) ;

v : Vitesse moyenne d'écoulement (**m/s**) ;

H : La charge spécifique (**m**) ;

g : Constante d'accélération gravitationnelle (**m. s⁻²**).

2.1 Mesures sur canal simple :

Les essais ont été effectués sur le banc d'essai simple sans singularités, alors on a pris des mesure en début et fin du canal c'est-à-dire, à des distances de **2** et **8m** du début du canal.

Tableau III.1a: Mesures et caractéristiques hydrauliques calculées pour canal simple

I(%)	Q(m ³ /h)	h _c (cm)	L = 2m	v(m/s)	H(cm)	F _r	L = 8m	v(m/s)	H(cm)	F _r
			h _{mes} (cm)				h _{mes} (cm)			
-0.5	10	2.0	8.7	0.103	8.8	0.11	5.8	0.155	5.9	0.21
	20	3.2	11.0	0.163	11.1	0.16	7.3	0.246	7.6	0.29
	30	4.2	12.4	0.217	12.6	0.20	8.7	0.310	9.2	0.34
	40	5.1	13.7	0.262	14.1	0.23	9.9	0.363	10.6	0.37
	50	5.9	14.9	0.302	15.4	0.25	11.0	0.409	11.9	0.39
	60	6.7	15.9	0.339	16.5	0.27	11.9	0.453	12.9	0.42
	70	7.4	17.1	0.368	17.8	0.28	12.8	0.492	14.0	0.44
	80	8.1	18.0	0.400	18.8	0.30	13.7	0.525	15.1	0.45
	90	8.7	18.9	0.428	19.8	0.31	14.6	0.554	16.2	0.46
	100	9.4	19.8	0.454	20.9	0.33	15.5	0.580	17.2	0.47
0	10	2.0	4.2	0.214	4.4	0.33	3.5	0.257	3.8	0.44
	20	3.2	5.9	0.305	6.4	0.40	5.0	0.360	5.7	0.51
	30	4.2	7.3	0.369	8.0	0.44	6.2	0.435	7.2	0.56
	40	5.1	8.5	0.423	9.4	0.46	7.3	0.493	8.5	0.58
	50	5.9	9.5	0.473	10.6	0.49	8.3	0.542	9.8	0.60
	60	6.7	10.4	0.519	11.8	0.51	9.2	0.586	11.0	0.62
	70	7.4	11.4	0.552	13.0	0.52	10.2	0.617	12.1	0.62
	80	8.1	12.2	0.589	14.0	0.54	10.9	0.660	13.1	0.64
	90	8.7	13.0	0.622	15.0	0.55	11.6	0.697	14.1	0.65
	100	9.4	14.3	0.629	16.3	0.53	12.5	0.719	15.1	0.65
0.5	10	2.0	1.8	0.499	3.1	1.19	1.6	0.562	3.2	1.42
	20	3.2	2.7	0.666	5.0	1.29	2.0	0.899	6.1	2.03
	30	4.2	3.7	0.729	6.4	1.21	3.4	0.793	6.6	1.37
	40	5.1	4.5	0.799	7.8	1.20	4.2	0.856	7.9	1.33
	50	5.9	5.1	0.881	9.1	1.25	4.8	0.936	9.3	1.36
	60	6.7	5.7	0.946	10.3	1.27	5.6	0.963	10.3	1.30
	70	7.4	6.7	0.939	11.2	1.16	6.3	0.999	11.4	1.27
	80	8.1	7.0	1.027	12.4	1.24	7.0	1.027	12.4	1.24
	90	8.7	7.7	1.051	13.3	1.21	7.4	1.093	13.5	1.28
	100	9.4	7.9	1.138	14.5	1.29	8.6	1.045	14.2	1.14

Tableau III.1b : Mesures et caractéristiques hydrauliques calculées pour canal simple

I(%)	Q(m ³ /h)	h _c (cm)	L = 2m	v(m/s)	H(cm)	F _r	L = 8m	v(m/s)	H(cm)	F _r
			h _{mes} (cm)				h _{mes} (cm)			
1.0	10	2.0	1.4	0.642	3.5	1.73	1.3	0.692	3.7	1.94
	20	3.2	2.2	0.817	5.6	1.76	2.2	0.817	5.6	1.76
	30	4.2	3.0	0.899	7.1	1.66	2.7	0.999	7.8	1.94
	40	5.1	3.7	0.972	8.5	1.61	3.4	1.058	9.1	1.83
	50	5.9	4.4	1.022	9.7	1.55	3.8	1.183	10.9	1.94
	60	6.7	4.9	1.101	11.1	1.59	4.4	1.226	12.1	1.87
	70	7.4	5.6	1.124	12.0	1.52	4.9	1.284	13.3	1.85
	80	8.1	6.4	1.124	12.8	1.42	5.3	1.357	14.7	1.88
	90	8.7	6.8	1.190	14.0	1.46	5.9	1.371	15.5	1.80
	100	9.4	7.2	1.249	15.1	1.49	6.5	1.383	16.2	1.73
1.5	10	2.0	1.2	0.749	4.1	2.18	1.2	0.7	4.1	2.2
	20	3.2	2.0	0.899	6.1	2.03	1.8	1.0	6.9	2.4
	30	4.2	2.6	1.037	8.1	2.05	2.3	1.2	9.3	2.5
	40	5.1	3.5	1.027	8.9	1.75	3.0	1.2	10.3	2.2
	50	5.9	3.9	1.153	10.7	1.86	3.4	1.3	12.3	2.3
	60	6.7	4.7	1.148	11.4	1.69	4.0	1.3	13.3	2.2
	70	7.4	5.3	1.187	12.5	1.65	4.6	1.4	14.1	2.0
	80	8.1	5.6	1.284	14.0	1.73	4.9	1.5	15.9	2.1
	90	8.7	6.2	1.305	14.9	1.67	5.2	1.6	17.5	2.2
	100	9.4	6.7	1.342	15.9	1.65	5.9	1.5	17.7	2.0
2.0	10	2.0	1.2	0.749	4.1	2.18	1.1	0.8	4.5	2.5
	20	3.2	1.9	0.946	6.5	2.19	1.7	1.1	7.4	2.6
	30	4.2	2.6	1.037	8.1	2.05	2.2	1.2	9.9	2.6
	40	5.1	3.1	1.160	10.0	2.10	2.6	1.4	12.3	2.7
	50	5.9	3.9	1.153	10.7	1.86	3.1	1.4	13.8	2.6
	60	6.7	4.3	1.254	12.3	1.93	3.6	1.5	15.0	2.5
	70	7.4	4.8	1.311	13.6	1.91	3.9	1.6	17.2	2.6
	80	8.1	5.4	1.332	14.4	1.83	4.4	1.6	18.0	2.5
	90	8.7	5.9	1.371	15.5	1.80	4.8	1.7	19.3	2.5
	100	9.4	6.5	1.383	16.2	1.73	5.3	1.7	20.0	2.4
2.5	10	2.0	1.1	0.817	4.5	2.49	1.0	0.9	5.1	2.9
	20	3.2	1.8	0.999	6.9	2.38	1.7	1.1	7.4	2.6
	30	4.2	2.4	1.124	8.8	2.32	2.0	1.3	11.3	3.0
	40	5.1	3.0	1.199	10.3	2.21	2.6	1.4	12.3	2.7
	50	5.9	3.5	1.284	11.9	2.19	3.0	1.5	14.4	2.8
	60	6.7	4.0	1.348	13.3	2.15	3.3	1.6	16.9	2.9
	70	7.4	4.7	1.339	13.8	1.97	3.7	1.7	18.4	2.8
	80	8.1	5.2	1.383	14.9	1.94	4.1	1.8	19.8	2.8
	90	8.7	5.7	1.419	16.0	1.90	4.6	1.8	20.4	2.6
	100	9.4	6.0	1.498	17.4	1.95	5.0	1.8	21.5	2.6

2.2 Mesures sur canal avec piles de pont :

Les piles de pont ont été placées à une distance de **3.88 m** de la tête du canal, afin d'étudier l'influence des obstacles de contraction sur le régime d'écoulement en mesurant la hauteur de la ligne d'eau et en calculant différents caractéristiques hydrauliques. La hauteur d'eau a été prise sur (**1, 2, 3.5, 4.5** et **8 m**) de la tête du canal.

Tableau III.2a : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

I(%)	Q(m ³ /h)	h _c (cm)	Amont de la pile				Aval de la pile			
			L = 3.5m h _{mes} (cm)	v(m/s)	H(cm)	F _r	L = 4.5m h _{mes} (cm)	v(m/s)	H(cm)	F _r
-0.5	10	2.0	8.2	0.110	8.3	0.12	7.8	0.115	7.9	0.13
	20	3.2	10.0	0.180	10.2	0.18	9.4	0.191	9.6	0.20
	30	4.2	11.4	0.237	11.7	0.22	10.9	0.247	11.2	0.24
	40	5.1	12.7	0.283	13.1	0.25	12.1	0.297	12.6	0.27
	50	5.9	14.2	0.317	14.7	0.27	13.2	0.341	13.8	0.30
	60	6.7	14.8	0.364	15.5	0.30	14.1	0.383	14.8	0.33
	70	7.4	16.1	0.391	16.9	0.31	15.3	0.411	16.2	0.34
	80	8.1	17.2	0.418	18.1	0.32	16.1	0.447	17.1	0.36
	90	8.7	18.1	0.447	19.1	0.34	17.0	0.476	18.2	0.37
	100	9.4	19.0	0.473	20.1	0.35	17.9	0.502	19.2	0.38
0	10	2.0	4.5	0.200	4.7	0.30	4.0	0.225	4.3	0.36
	20	3.2	5.8	0.310	6.3	0.41	5.4	0.333	6.0	0.46
	30	4.2	7.4	0.364	8.1	0.43	6.9	0.391	7.7	0.48
	40	5.1	8.9	0.404	9.7	0.43	8.0	0.449	9.0	0.51
	50	5.9	10.0	0.449	11.0	0.45	9.1	0.494	10.3	0.52
	60	6.7	11.1	0.486	12.3	0.47	10.0	0.539	11.5	0.54
	70	7.4	12.2	0.516	13.6	0.47	10.9	0.577	12.6	0.56
	80	8.1	13.0	0.553	14.6	0.49	11.8	0.609	13.7	0.57
	90	8.7	13.9	0.582	15.6	0.50	12.5	0.647	14.6	0.58
	100	9.4	15.0	0.599	16.8	0.49	13.4	0.671	15.7	0.59
0.5	10	2.0	3.1	0.290	3.5	0.53	1.4	0.642	3.5	1.73
	20	3.2	4.8	0.375	5.5	0.55	1.9	0.946	6.5	2.19
	30	4.2	6.5	0.415	7.4	0.52	2.3	1.173	9.3	2.47
	40	5.1	8.0	0.449	9.0	0.51	2.8	1.284	11.2	2.45
	50	5.9	9.1	0.494	10.3	0.52	3.0	1.498	14.4	2.76
	60	6.7	10.4	0.519	11.8	0.51	3.7	1.458	14.5	2.42
	70	7.4	11.0	0.572	12.7	0.55	4.3	1.463	15.2	2.25
	80	8.1	12.0	0.599	13.8	0.55	5.8	1.240	13.6	1.64
	90	8.7	13.1	0.618	15.0	0.54	5.5	1.471	16.5	2.00
	100	9.4	14.1	0.638	16.2	0.54	6.1	1.474	17.2	1.91

Tableau III.2b : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

I(%)	Q(m ³ /h)	h _c (cm)	Amont de la pile				Aval de la pile			
			L = 3.5m h _{mes} (cm)	v(m/s)	H(cm)	F _r	L = 4.5m h _{mes} (cm)	v(m/s)	H(cm)	F _r
1.0	10	2.0	1.2	0.749	4.1	2.18	1.3	0.692	3.7	1.94
	20	3.2	2.3	0.782	5.4	1.65	2.2	0.817	5.6	1.76
	30	4.2	2.6	1.037	8.1	2.05	2.5	1.079	8.4	2.18
	40	5.1	3.1	1.160	10.0	2.10	3.1	1.160	10.0	2.10
	50	5.9	3.1	1.450	13.8	2.63	2.9	1.550	15.1	2.91
	60	6.7	3.6	1.498	15.0	2.52	3.4	1.586	16.2	2.75
	70	7.4	3.9	1.614	17.2	2.61	4.0	1.573	16.6	2.51
	80	8.1	4.7	1.530	16.6	2.25	4.6	1.563	17.1	2.33
	90	8.7	5.5	1.471	16.5	2.00	5.6	1.445	16.2	1.95
	100	9.4	6.0	1.498	17.4	1.95	6.1	1.474	17.2	1.91
1.5	10	2.0	1.2	0.749	4.1	2.18	1.3	0.692	3.7	1.94
	20	3.2	1.9	0.946	6.5	2.19	2.4	0.749	5.3	1.54
	30	4.2	2.5	1.079	8.4	2.18	2.3	1.173	9.3	2.47
	40	5.1	3.2	1.124	9.6	2.01	2.7	1.332	11.7	2.59
	50	5.9	3.8	1.183	10.9	1.94	3.2	1.405	13.3	2.51
	60	6.7	4.3	1.254	12.3	1.93	4.0	1.348	13.3	2.15
	70	7.4	4.7	1.339	13.8	1.97	4.7	1.339	13.8	1.97
	80	8.1	5.5	1.308	14.2	1.78	5.5	1.308	14.2	1.78
	90	8.7	5.9	1.371	15.5	1.80	5.8	1.395	15.7	1.85
	100	9.4	6.5	1.383	16.2	1.73	6.4	1.405	16.5	1.77
2.0	10	2.0	1.1	0.817	4.5	2.49	1.4	0.642	3.5	1.73
	20	3.2	1.9	0.946	6.5	2.19	1.6	1.124	8.0	2.84
	30	4.2	2.4	1.124	8.8	2.32	2.3	1.173	9.3	2.47
	40	5.1	2.9	1.240	10.7	2.32	3.2	1.124	9.6	2.01
	50	5.9	3.5	1.284	11.9	2.19	3.9	1.153	10.7	1.86
	60	6.7	4.1	1.316	12.9	2.07	4.2	1.284	12.6	2.00
	70	7.4	4.4	1.430	14.8	2.18	4.8	1.311	13.6	1.91
	80	8.1	4.8	1.498	16.2	2.18	5.4	1.332	14.4	1.83
	90	8.7	5.3	1.527	17.2	2.12	6.1	1.326	15.1	1.71
	100	9.4	6.0	1.498	17.4	1.95	6.3	1.427	16.7	1.82
2.5	10	2.0	1.1	0.817	4.5	2.49	0.9	0.999	6.0	3.36
	20	3.2	1.8	0.999	6.9	2.38	1.8	0.999	6.9	2.38
	30	4.2	2.3	1.173	9.3	2.47	2.5	1.079	8.4	2.18
	40	5.1	2.7	1.332	11.7	2.59	3.2	1.124	9.6	2.01
	50	5.9	3.3	1.362	12.8	2.39	3.9	1.153	10.7	1.86
	60	6.7	3.6	1.498	15.0	2.52	4.2	1.284	12.6	2.00
	70	7.4	4.3	1.463	15.2	2.25	4.9	1.284	13.3	1.85
	80	8.1	4.9	1.468	15.9	2.12	5.2	1.383	14.9	1.94
	90	8.7	5.4	1.498	16.8	2.06	5.5	1.471	16.5	2.00
	100	9.4	5.6	1.605	18.7	2.17	6.0	1.498	17.4	1.95

Tableau III.2c : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

$I(\%)$	$Q(m^3/h)$	$h_c(cm)$	$L = 1m$	$v(m/s)$	$H(cm)$	F_r	$L = 2m$	$v(m/s)$	$H(cm)$	F_r
			$h_{mes}(cm)$				$h_{mes}(cm)$			
0.5	10	2.0	1.7	0.529	3.1	1.29	3.1	0.290	3.5	0.53
	20	3.2	2.9	0.620	4.9	1.16	3.9	0.461	5.0	0.75
	30	4.2	5.0	0.539	6.5	0.77	5.9	0.457	7.0	0.60
	40	5.1	6.5	0.553	8.1	0.69	7.0	0.514	8.3	0.62
	50	5.9	7.8	0.576	9.5	0.66	8.4	0.535	9.9	0.59
	60	6.7	9.0	0.599	10.8	0.64	9.8	0.550	11.3	0.56
	70	7.4	9.5	0.662	11.7	0.69	10.8	0.583	12.5	0.57
	80	8.1	11.2	0.642	13.3	0.61	11.2	0.642	13.3	0.61
	90	8.7	11.8	0.686	14.2	0.64	12.5	0.647	14.6	0.58
	100	9.4	12.5	0.719	15.1	0.65	13.2	0.681	15.6	0.60
1.0	10	2.0	1.4	0.642	3.5	1.73	1.4	0.642	3.5	1.73
	20	3.2	2.5	0.719	5.1	1.45	2.2	0.817	5.6	1.76
	30	4.2	3.1	0.870	7.0	1.58	3.0	0.899	7.1	1.66
	40	5.1	4.0	0.899	8.1	1.44	3.6	0.999	8.7	1.68
	50	5.9	4.7	0.956	9.4	1.41	4.5	0.999	9.6	1.50
	60	6.7	5.5	0.981	10.4	1.34	5.1	1.058	10.8	1.50
	70	7.4	6.3	0.999	11.4	1.27	5.7	1.104	11.9	1.48
	80	8.1	6.6	1.090	12.7	1.35	6.5	1.106	12.7	1.39
	90	8.7	7.7	1.051	13.3	1.21	6.9	1.173	13.9	1.43
	100	9.4	7.7	1.167	14.6	1.34	7.7	1.167	14.6	1.34
1.5	10	2.0	1.3	0.692	3.7	1.94	1.3	0.692	3.7	1.94
	20	3.2	2.2	0.817	5.6	1.76	2.1	0.856	5.8	1.89
	30	4.2	3.0	0.899	7.1	1.66	2.7	0.999	7.8	1.94
	40	5.1	3.9	0.922	8.2	1.49	3.4	1.058	9.1	1.83
	50	5.9	4.6	0.977	9.5	1.45	4.2	1.070	10.0	1.67
	60	6.7	5.2	1.037	10.7	1.45	4.7	1.148	11.4	1.69
	70	7.4	6.0	1.049	11.6	1.37	5.3	1.187	12.5	1.65
	80	8.1	6.3	1.142	12.9	1.45	5.9	1.219	13.5	1.60
	90	8.7	7.0	1.156	13.8	1.39	6.4	1.264	14.5	1.60
	100	9.4	7.6	1.183	14.7	1.37	6.1	1.474	17.2	1.91

Tableau III.2d : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

I(%)	Q(m ³ /h)	h _c (cm)	L = 1m	v(m/s)	H(cm)	F _r	L = 2m	v(m/s)	H(cm)	F _r
			h _{mes} (cm)				h _{mes} (cm)			
2.0	10	2.0	1.3	0.692	3.7	1.94	1.2	0.749	4.1	2.18
	20	3.2	2.2	0.817	5.6	1.76	2.0	0.899	6.1	2.03
	30	4.2	2.9	0.930	7.3	1.74	2.6	1.037	8.1	2.05
	40	5.1	3.7	0.972	8.5	1.61	3.2	1.124	9.6	2.01
	50	5.9	4.3	1.045	9.9	1.61	4.0	1.124	10.4	1.79
	60	6.7	5.0	1.079	10.9	1.54	4.3	1.254	12.3	1.93
	70	7.4	5.4	1.165	12.3	1.60	4.9	1.284	13.3	1.85
	80	8.1	5.8	1.240	13.6	1.64	5.5	1.308	14.2	1.78
	90	8.7	6.4	1.264	14.5	1.60	6.0	1.348	15.3	1.76
	100	9.4	7.2	1.249	15.1	1.49	6.7	1.342	15.9	1.65
2.5	10	2.0	1.2	0.749	4.1	2.18	1.2	0.749	4.1	2.18
	20	3.2	2.1	0.856	5.8	1.89	1.9	0.946	6.5	2.19
	30	4.2	2.8	0.963	7.5	1.84	2.4	1.124	8.8	2.32
	40	5.1	3.5	1.027	8.9	1.75	3.0	1.199	10.3	2.21
	50	5.9	4.1	1.096	10.2	1.73	3.5	1.284	11.9	2.19
	60	6.7	4.5	1.199	11.8	1.80	4.0	1.348	13.3	2.15
	70	7.4	5.0	1.259	13.1	1.80	4.9	1.284	13.3	1.85
	80	8.1	5.6	1.284	14.0	1.73	5.4	1.332	14.4	1.83
	90	8.7	6.4	1.264	14.5	1.60	5.9	1.371	15.5	1.80
	100	9.4	7.3	1.231	15.0	1.46	6.3	1.427	16.7	1.82

Tableau III.2e : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

I(%)	Q(m ³ /h)	h _c (cm)	L = 8m	v(m/s)	H(cm)	F _r
			h _{mes} (cm)			
0.5	10	2.0	2.4	0.375	3.1	0.77
	20	3.2	2.8	0.642	4.9	1.23
	30	4.2	3.1	0.870	7.0	1.58
	40	5.1	4.0	0.899	8.1	1.44
	50	5.9	4.5	0.999	9.6	1.50
	60	6.7	5.6	0.963	10.3	1.30
	70	7.4	5.3	1.187	12.5	1.65
	80	8.1	6.5	1.106	12.7	1.39
	90	8.7	7.2	1.124	13.6	1.34
	100	9.4	7.4	1.215	14.9	1.43
1.0	10	2.0	1.4	0.642	3.5	1.73
	20	3.2	2.1	0.856	5.8	1.89
	30	4.2	2.7	0.999	7.8	1.94
	40	5.1	3.0	1.199	10.3	2.21
	50	5.9	3.8	1.183	10.9	1.94
	60	6.7	5.0	1.079	10.9	1.54
	70	7.4	4.6	1.368	14.1	2.04
	80	8.1	5.2	1.383	14.9	1.94
	90	8.7	5.7	1.419	16.0	1.90
	100	9.4	6.3	1.427	16.7	1.82

Tableau III.2f : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec piles

$I(\%)$	$Q(m^3/h)$	$h_c(cm)$	$L = 8m$	$v(m/s)$	$H(cm)$	F_r
			$h_{mes}(cm)$			
1.5	10	2.0	1.2	0.749	4.1	2.18
	20	3.2	1.8	0.999	6.9	2.38
	30	4.2	2.3	1.173	9.3	2.47
	40	5.1	2.9	1.240	10.7	2.32
	50	5.9	3.6	1.249	11.5	2.10
	60	6.7	3.9	1.383	13.6	2.24
	70	7.4	4.0	1.573	16.6	2.51
	80	8.1	4.7	1.530	16.6	2.25
	90	8.7	5.2	1.556	17.5	2.18
	100	9.4	5.6	1.605	18.7	2.17
2.0	10	2.0	0.9	0.999	6.0	3.36
	20	3.2	1.7	1.058	7.4	2.59
	30	4.2	2.4	1.124	8.8	2.32
	40	5.1	2.7	1.332	11.7	2.59
	50	5.9	3.4	1.322	12.3	2.29
	60	6.7	3.8	1.419	14.1	2.32
	70	7.4	4.0	1.573	16.6	2.51
	80	8.1	4.5	1.598	17.5	2.41
	90	8.7	4.9	1.651	18.8	2.38
	100	9.4	5.2	1.729	20.4	2.42
2.5	10	2.0	1.0	0.899	5.1	2.87
	20	3.2	1.6	1.124	8.0	2.84
	30	4.2	2.6	1.037	8.1	2.05
	40	5.1	2.3	1.563	14.8	3.29
	50	5.9	3.1	1.450	13.8	2.63
	60	6.7	3.5	1.541	15.6	2.63
	70	7.4	3.8	1.656	17.8	2.71
	80	8.1	4.2	1.712	19.1	2.67
	90	8.7	4.4	1.839	21.6	2.80
	100	9.4	5.2	1.729	20.4	2.42

2.3 Mesures sur canal avec plaques rugueuses :

Dans cet essai nous avons placé des plaques de forte rugosité au fond du canal sur une distance de **5m**, afin de visualiser l'effet du changement de la nature du fond sur le régime d'écoulement et la mesure de la variation de la hauteur de la ligne d'eau.

Tableau III.3a : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec plaques

I(%)	Q(m ³ /h)	h _c (cm)	L = 2m	v(m/s)	H(cm)	F _r	L = 4m	v(m/s)	H(cm)	F _r
			h _{mes} (cm)				h _{mes} (cm)			
-0.5	10	2.0	13.4	0.067	13.4	0.06	11.6	0.077	11.6	0.07
	20	3.2	15.1	0.119	15.2	0.10	13.0	0.138	13.1	0.12
	30	4.2	16.2	0.166	16.3	0.13	14.6	0.185	14.8	0.15
	40	5.1	18.2	0.198	18.4	0.15	15.8	0.228	16.1	0.18
	50	5.9	19.2	0.234	19.5	0.17	16.9	0.266	17.3	0.21
	60	6.7	20.4	0.264	20.8	0.19	18.0	0.300	18.5	0.23
	70	7.4	21.6	0.291	22.0	0.20	18.3	0.344	18.9	0.26
	80	8.1	22.4	0.321	22.9	0.22	19.6	0.367	20.3	0.26
	90	8.7	23.5	0.344	24.1	0.23	20.6	0.393	21.4	0.28
	100	9.4	24.3	0.370	25.0	0.24	21.3	0.422	22.2	0.29
0	10	2.0	10.5	0.086	10.5	0.08	10.0	0.090	10.0	0.09
	20	3.2	12.4	0.145	12.5	0.13	11.6	0.155	11.7	0.15
	30	4.2	14.0	0.193	14.2	0.16	12.9	0.209	13.1	0.19
	40	5.1	15.3	0.235	15.6	0.19	14.0	0.257	14.3	0.22
	50	5.9	16.5	0.272	16.9	0.21	15.0	0.300	15.5	0.25
	60	6.7	17.4	0.310	17.9	0.24	16.2	0.333	16.8	0.26
	70	7.4	18.6	0.338	19.2	0.25	17.0	0.370	17.7	0.29
	80	8.1	19.6	0.367	20.3	0.26	17.9	0.402	18.7	0.30
	90	8.7	20.6	0.393	21.4	0.28	18.6	0.435	19.6	0.32
	100	9.4	21.5	0.418	22.4	0.29	19.6	0.459	20.7	0.33
0.5	10	2.0	8.5	0.106	8.6	0.12	8.7	0.103	8.8	0.11
	20	3.2	10.6	0.170	10.7	0.17	10.3	0.175	10.5	0.17
	30	4.2	11.7	0.231	12.0	0.22	11.4	0.237	11.7	0.22
	40	5.1	13.1	0.274	13.5	0.24	12.6	0.285	13.0	0.26
	50	5.9	14.0	0.321	14.5	0.27	13.4	0.335	14.0	0.29
	60	6.7	15.2	0.355	15.8	0.29	14.4	0.375	15.1	0.32
	70	7.4	16.2	0.388	17.0	0.31	15.5	0.406	16.3	0.33
	80	8.1	17.2	0.418	18.1	0.32	16.0	0.449	17.0	0.36
	90	8.7	18.2	0.445	19.2	0.33	17.0	0.476	18.2	0.37
	100	9.4	18.9	0.476	20.1	0.35	17.5	0.514	18.8	0.39

Tableau III.3b : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec plaques

$I(\%)$	$Q(m^3/h)$	$h_c(cm)$	$L = 2m$	$v(m/s)$	$H(cm)$	F_r	$L = 4m$	$v(m/s)$	$H(cm)$	F_r
			$h_{mes}(cm)$				$h_{mes}(cm)$			
1.0	10	2.0	7.2	0.125	7.3	0.15	8.0	0.112	8.1	0.13
	20	3.2	9.1	0.198	9.3	0.21	9.1	0.198	9.3	0.21
	30	4.2	10.5	0.257	10.8	0.25	10.4	0.259	10.7	0.26
	40	5.1	11.6	0.310	12.1	0.29	11.0	0.327	11.5	0.31
	50	5.9	12.6	0.357	13.2	0.32	12.0	0.375	12.7	0.35
	60	6.7	13.6	0.397	14.4	0.34	12.8	0.421	13.7	0.38
	70	7.4	14.1	0.446	15.1	0.38	13.2	0.477	14.4	0.42
	80	8.1	15.5	0.464	16.6	0.38	14.0	0.514	15.3	0.44
	90	8.7	16.4	0.493	17.6	0.39	14.7	0.550	16.2	0.46
	100	9.4	17.3	0.520	18.7	0.40	15.2	0.591	17.0	0.48
1.5	10	2.0	6.3	0.143	6.4	0.18	7.5	0.120	7.6	0.14
	20	3.2	8.0	0.225	8.3	0.25	8.4	0.214	8.6	0.24
	30	4.2	9.2	0.293	9.6	0.31	9.4	0.287	9.8	0.30
	40	5.1	10.3	0.349	10.9	0.35	10.4	0.346	11.0	0.34
	50	5.9	11.5	0.391	12.3	0.37	10.9	0.412	11.8	0.40
	60	6.7	12.3	0.439	13.3	0.40	11.7	0.461	12.8	0.43
	70	7.4	13.5	0.466	14.6	0.41	12.3	0.512	13.6	0.47
	80	8.1	14.7	0.489	15.9	0.41	12.9	0.557	14.5	0.50
	90	8.7	14.8	0.547	16.3	0.45	13.5	0.599	15.3	0.52
	100	9.4	16.3	0.552	17.9	0.44	14.2	0.633	16.2	0.54
2.0	10	2.0	5.2	0.173	5.4	0.24	7.8	0.115	7.9	0.13
	20	3.2	6.7	0.268	7.1	0.33	9.1	0.198	9.3	0.21
	30	4.2	7.9	0.341	8.5	0.39	9.0	0.300	9.5	0.32
	40	5.1	9.2	0.391	10.0	0.41	9.8	0.367	10.5	0.37
	50	5.9	10.1	0.445	11.1	0.45	10.7	0.420	11.6	0.41
	60	6.7	11.3	0.477	12.5	0.45	11.1	0.486	12.3	0.47
	70	7.4	12.3	0.512	13.6	0.47	11.7	0.538	13.2	0.50
	80	8.1	12.5	0.575	14.2	0.52	12.5	0.575	14.2	0.52
	90	8.7	14.3	0.566	15.9	0.48	13.2	0.613	15.1	0.54
	100	9.4	14.2	0.633	16.2	0.54	13.8	0.651	16.0	0.56

Tableau III.3c : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec plaques

$I(\%)$	$Q(m^3/h)$	$h_c(cm)$	$L(m)$	$h_{mes}(cm)$	$v(m/s)$	$H(cm)$	F_r	$L(m)$	$h_{mes}(cm)$	$v(m/s)$	$H(cm)$	F_r
-0.5	10	2.0	6.55	9.4	0.096	9.4	0.10	-	-	-	-	-
	20	3.2	6.55	10.8	0.166	10.9	0.16	-	-	-	-	-
	30	4.2	6.70	11.9	0.227	12.2	0.21	-	-	-	-	-
	40	5.1	6.78	12.3	0.292	12.7	0.27	-	-	-	-	-
	50	5.9	6.3	14.1	0.319	14.6	0.27	-	-	-	-	-
	60	6.7	6.45	14.9	0.362	15.6	0.30	-	-	-	-	-
	70	7.4	6.45	15.7	0.401	16.5	0.32	7.75	13.3	0.473	14.4	0.41
	80	8.1	6.4	16.7	0.431	17.6	0.34	7.75	14.4	0.499	15.7	0.42
	90	8.7	6.5	17.2	0.470	18.3	0.36	7.8	15.4	0.525	16.8	0.43
	100	9.4	6.25	18.4	0.489	19.6	0.36	7.85	15.6	0.576	17.3	0.47
0	10	2.0	6.70	8.9	0.101	9.0	0.11	-	-	-	-	-
	20	3.2	7.72	10.1	0.178	10.3	0.18	-	-	-	-	-
	30	4.2	6.6	11.6	0.232	11.9	0.22	-	-	-	-	-
	40	5.1	6.70	12.5	0.288	12.9	0.26	9.55	8.5	0.423	9.4	0.46
	50	5.9	6.40	13.5	0.333	14.1	0.29	10.1	9.1	0.494	10.3	0.52
	60	6.7	6.50	14	0.385	14.8	0.33	10.6	10.1	0.534	11.6	0.54
	70	7.4	6.35	15.4	0.409	16.3	0.33	10.95	10.5	0.599	12.3	0.59
	80	8.1	6.10	16.5	0.436	17.5	0.34	-	-	-	-	-
	90	8.7	6.20	17	0.476	18.2	0.37	-	-	-	-	-
	100	9.4	5.70	18.1	0.497	19.4	0.37	-	-	-	-	-
0.5	10	2.0	6.75	8.4	0.107	8.5	0.12	-	-	-	-	-
	20	3.2	6.67	10.4	0.173	10.6	0.17	7.90	1.2	1.498	12.6	4.37
	30	4.2	6.50	11.2	0.241	11.5	0.23	9.5	2.4	1.124	8.8	2.32
	40	5.1	6.45	12.2	0.295	12.6	0.27	9.5	3	1.199	10.3	2.21
	50	5.9	6.00	13.3	0.338	13.9	0.30	9.5	3.6	1.249	11.5	2.10
	60	6.7	6.5	13.9	0.388	14.7	0.33	9.5	4.2	1.284	12.6	2.00
	70	7.4	6.10	15.5	0.406	16.3	0.33	9.5	4.7	1.339	13.8	1.97
	80	8.1	6.10	15.8	0.455	16.9	0.37	9.5	5.4	1.332	14.4	1.83
	90	8.7	6.00	16.9	0.479	18.1	0.37	9.5	5.9	1.371	15.5	1.80
	100	9.4	6.10	17.4	0.517	18.8	0.40	9.5	6.1	1.474	17.2	1.91

Tableau III.3d : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec plaques

$I(\%)$	$Q(m^3/h)$	$h_c(cm)$	$L(m)$	$h_{mes}(cm)$	$v(m/s)$	$H(cm)$	F_r	$L(m)$	$h_{mes}(cm)$	$v(m/s)$	$H(cm)$	F_r
1.0	10	2.0	2.60	8.4	0.107	8.5	0.12	9.5	1.2	0.749	4.1	2.18
	20	3.2	3.30	9.7	0.185	9.9	0.19	9.5	1.4	1.284	9.8	3.47
	30	4.2	2.90	11.0	0.245	11.3	0.24	9.5	2.4	1.124	8.8	2.32
	40	5.1	3.90	11.3	0.318	11.8	0.30	9.5	3.0	1.199	10.3	2.21
	50	5.9	3.90	12.0	0.375	12.7	0.35	9.5	3.5	1.284	11.9	2.19
	60	6.7	4.20	12.2	0.442	13.2	0.40	9.5	4.0	1.348	13.3	2.15
	70	7.4	4.20	13.6	0.463	14.7	0.40	9.5	4.4	1.430	14.8	2.18
	80	8.1	4.70	15.0	0.479	16.2	0.40	9.5	4.7	1.530	16.6	2.25
	90	8.7	2.96	16.3	0.496	17.6	0.39	9.5	5.0	1.618	18.3	2.31
	100	9.4	3.00	17.0	0.529	18.4	0.41	9.5	5.5	1.634	19.1	2.23
1.5	10	2.0	2.5	8.3	0.108	8.4	0.12	9.5	1.2	0.749	4.1	2.18
	20	3.2	2.6	9.4	0.191	9.6	0.20	9.5	1.7	1.058	7.4	2.59
	30	4.2	3.70	9.8	0.275	10.2	0.28	9.5	2.3	1.173	9.3	2.47
	40	5.1	4.50	10.6	0.339	11.2	0.33	9.5	2.5	1.438	13.0	2.90
	50	5.9	5.50	11.4	0.394	12.2	0.37	9.5	3.2	1.405	13.3	2.51
	60	6.7	5.50	12.2	0.442	13.2	0.40	9.5	3.6	1.498	15.0	2.52
	70	7.4	5.50	12.6	0.499	13.9	0.45	9.5	4.0	1.573	16.6	2.51
	80	8.1	5.50	13.3	0.541	14.8	0.47	9.5	4.4	1.634	18.0	2.49
	90	8.7	5.50	13.9	0.582	15.6	0.50	9.5	4.5	1.798	21.0	2.71
	100	9.4	5.50	14.6	0.616	16.5	0.51	9.5	5.0	1.798	21.5	2.57
2.0	10	2.0	5.50	7.3	0.123	7.4	0.15	9.5	1.1	0.817	4.5	2.49
	20	3.2	5.50	8.4	0.214	8.6	0.24	9.5	1.7	1.058	7.4	2.59
	30	4.2	5.50	9.4	0.287	9.8	0.30	9.5	2.3	1.173	9.3	2.47
	40	5.1	5.50	10.1	0.356	10.7	0.36	9.5	2.6	1.383	12.3	2.74
	50	5.9	5.50	10.6	0.424	11.5	0.42	9.5	3.1	1.450	13.8	2.63
	60	6.7	5.50	11.2	0.482	12.4	0.46	9.5	3.3	1.634	16.9	2.87
	70	7.4	5.50	11.8	0.533	13.2	0.50	9.5	3.6	1.748	19.2	2.94
	80	8.1	5.50	12.3	0.585	14.0	0.53	9.5	4.1	1.754	19.8	2.77
	90	8.7	5.50	12.8	0.632	14.8	0.56	9.5	4.3	1.882	22.3	2.90
	100	9.4	5.50	13.4	0.671	15.7	0.59	9.5	4.8	1.873	22.7	2.73

Tableau III.3e : Mesures et caractéristiques hydrauliques pour canal avec plaques

I(%)	Q(m ³ /h)	h _c (cm)	L = 8m	v(m/s)	H(cm)	F _r	I(%)	L = 8m	v(m/s)	H(cm)	F _r
			h _{mes} (cm)					h _{mes} (cm)			
-0.5	10	2.0	5.4	0.166	5.5	0.23	1.0	1.0	0.899	5.1	2.87
	20	3.2	7.1	0.253	7.4	0.30		1.7	1.058	7.4	2.59
	30	4.2	8.3	0.325	8.8	0.36		2.5	1.079	8.4	2.18
	40	5.1	9.5	0.379	10.2	0.39		3.1	1.160	10.0	2.10
	50	5.9	10.4	0.432	11.4	0.43		3.2	1.405	13.3	2.51
	60	6.7	12.0	0.449	13.0	0.41		3.6	1.498	15.0	2.52
	70	7.4	12.0	0.524	13.4	0.48		4.1	1.535	16.1	2.42
	80	8.1	13.0	0.553	14.6	0.49		4.5	1.598	17.5	2.41
	90	8.7	14.2	0.570	15.9	0.48		5.0	1.618	18.3	2.31
	100	9.4	14.9	0.603	16.8	0.50		5.5	1.634	19.1	2.23
0	10	2.0	3.5	0.257	3.8	0.44	1.5	1.2	0.749	4.1	2.18
	20	3.2	4.6	0.391	5.4	0.58		1.6	1.124	8.0	2.84
	30	4.2	2.3	1.173	9.3	2.47		2.3	1.173	9.3	2.47
	40	5.1	3.1	1.160	10.0	2.10		2.5	1.438	13.0	2.90
	50	5.9	3.5	1.284	11.9	2.19		3.1	1.450	13.8	2.63
	60	6.7	3.8	1.419	14.1	2.32		3.5	1.541	15.6	2.63
	70	7.4	4.3	1.463	15.2	2.25		3.9	1.614	17.2	2.61
	80	8.1	4.8	1.498	16.2	2.18		4.3	1.672	18.6	2.58
	90	8.7	5.3	1.527	17.2	2.12		4.7	1.721	19.8	2.54
	100	9.4	5.7	1.577	18.4	2.11		5.5	1.634	19.1	2.23
0.5	10	2.0	1.4	0.642	3.5	1.73	2.0	1.2	0.749	4.1	2.18
	20	3.2	2.4	0.749	5.3	1.54		1.7	1.058	7.4	2.59
	30	4.2	2.3	1.173	9.3	2.47		2.3	1.173	9.3	2.47
	40	5.1	2.9	1.240	10.7	2.32		2.8	1.284	11.2	2.45
	50	5.9	3.4	1.322	12.3	2.29		3.2	1.405	13.3	2.51
	60	6.7	3.7	1.458	14.5	2.42		3.4	1.586	16.2	2.75
	70	7.4	4.1	1.535	16.1	2.42		3.9	1.614	17.2	2.61
	80	8.1	4.5	1.598	17.5	2.41		4.4	1.634	18.0	2.49
	90	8.7	5.2	1.556	17.5	2.18		4.8	1.686	19.3	2.46
	100	9.4	5.6	1.605	18.7	2.17		5.0	1.798	21.5	2.57

3. Interprétation et discussion des résultats :

3.1 Canal simple :

Le régime devient torrentiel à partir de la pente **0.5%**, et à partir de la pente **1.0%** on remarque un nombre de Froude > 2 ce qui explique que les vitesses d'écoulement dominent fortement les ondes de surface.

Si l'on compare les pentes des lignes d'eau, d'énergie par rapport à la pente du canal on les trouve plus au moins égales ce qui explique qu'on est en écoulement uniforme.

3.2 Canal avec piles de pont :

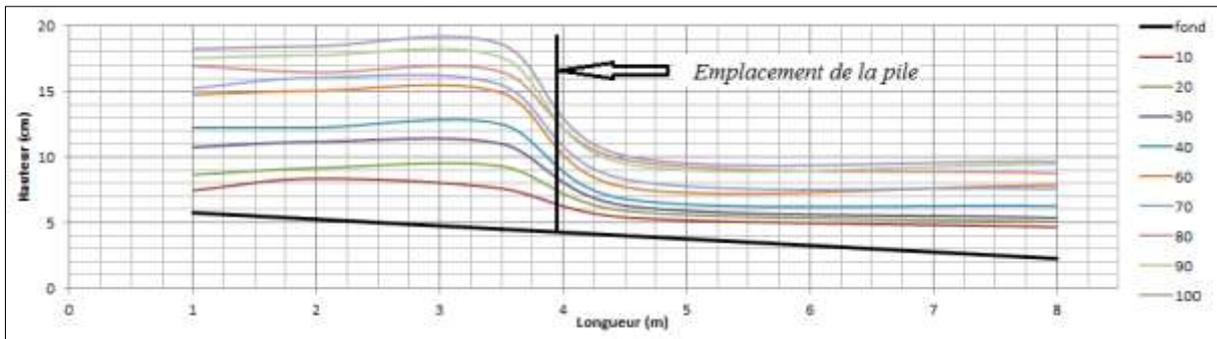


Figure III.1 : La ligne d'eau pour différents débits canal avec piles $I=0.5\%$

La pile de pont joue le rôle d'une contraction de la section d'écoulement, c'est la raison qui provoque l'augmentation de la hauteur de la ligne d'eau en amont de la singularité, ainsi le régime d'écoulement en amont est fluvial pour les pentes $< 1\%$, quoique pour les grandes pentes l'influence de la pile diminue puisque les vitesses d'écoulements augmentent, c'est pour cela qu'on ne remarque pas une différence de hauteur entre l'amont et l'aval alors, le régime reste torrentiel.

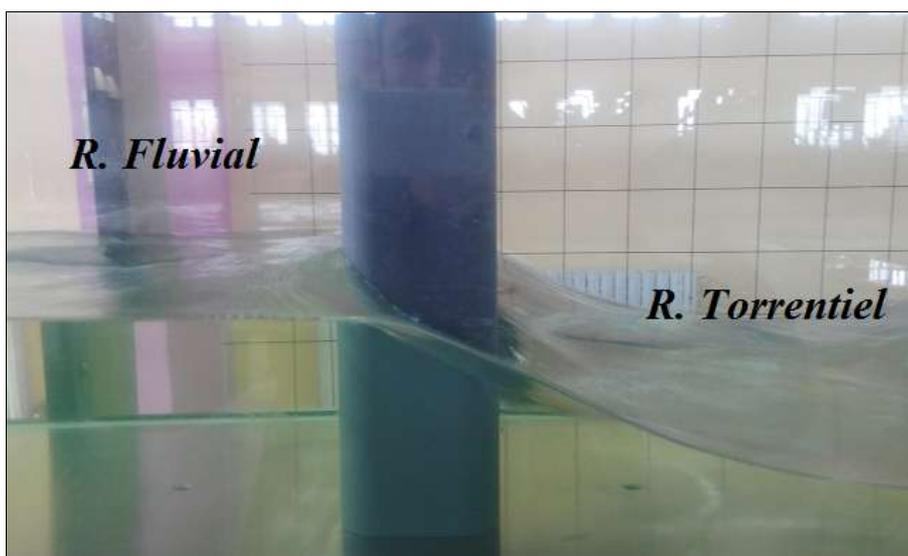


Figure II.2: Le changement de régime à travers la singularité

On remarque aussi que pour les pentes (2.0, 2.5%) un genre de jet au niveau des piles, du a la grande vitesse d'écoulement.



Figure III.3: Jet au niveau de la pile

3.3 Canal avec plaques :

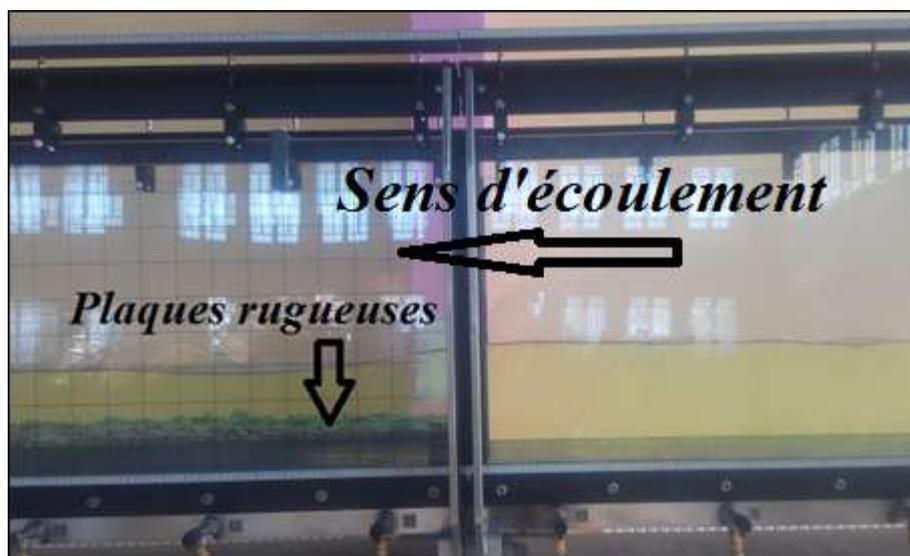


Figure III.4 : Canal avec plaques

L'effet du changement de la nature du fond peut se voir par l'augmentation de la hauteur de la lame d'eau à l'approche des plaques rugueuses, ce qui est provoqué par les contraintes de frottements de fonds intenses, dues à la grande rugosité ainsi les vitesses d'écoulements diminue, et on reste en régime fluvial sur au long des plaques.

On remarque aussi que le régime devient torrentiel en passant par un ressaut hydraulique (cas des pentes 0.5%, 1%), juste après les plaques.



Figure III.5: Changeement de régime à la fin des plaques

Ainsi, une rugosité avec un grand coefficient de Manning favorise un écoulement lent puisque elle intervient directement dans la diminution des vitesses d'écoulements suivant l'équation de Manning-Strickler.

Conclusion :

Dans cette partie sont exposés : le travail accompli au niveau du laboratoire ainsi que les différents phénomènes d'écoulement à surface libre visualisés sur le canal expérimental et aussi l'ensemble des résultats sous forme de tableaux et graphiques qui seront utilisés dans le volet final pour comparer avec le modèle unidimensionnel HEC-RAS.

Chapitre IV

Evaluation de l'incertitude, calage et validation des simulations d'écoulements à surface libre sur HECRAS.

Chapitre IV : Evaluation de l'incertitude, calage et validation des simulations d'écoulements à surface libre sur HECRAS.

Introduction :

Le recours à la modélisation se fait pour analyser et prévoir la dynamique des milieux hydrauliques et des phénomènes qui s'y déroulent du fait de leur complexité et leur variabilité, alors la structure de n'importe quel modèle se traduit par de nombreuses incertitudes : sur la structure de modélisation elle-même et/ou le jeu de paramètres et les données d'entrée qui influent bien sûr les valeurs de sorties. Dans notre contexte, la modélisation des écoulements s'est faite sur HEC-RAS, ainsi, les hauteurs d'eau simulées nécessitent un réglage, afin de reproduire les mêmes caractéristiques d'écoulements que celle du laboratoire, pour cela, un ajustement du paramètre empirique de Manning sera opéré.

1. Structure du modèle hydraulique :

Dans le cas général on peut définir la structure type d'un modèle par l'expression suivante (Benoit & al 2009)

$$h_{obs}(t) = h_{sim}(t) + \varepsilon_h(t, \theta) \quad (IV.1)$$

$$h_{obs}(t) = G[X(t), Y(t), CL(t), \theta] + \varepsilon_h(t, \theta) \quad (IV.2)$$

$h_{obs}(t)$: La hauteur d'eau observée à l'instant t ;

$h_{sim}(t)$: La hauteur d'eau simulée ;

$X(t), Y(t), CL(t)$: La valeur à l'instant t de diverses variables d'entrée, variables d'états et conditions aux limites du modèle ;

θ : Le vecteur des paramètres du modèle ;

$\varepsilon_z(t, \theta)$: Le vecteur des erreurs de modélisation, fonction du temps et du jeu de paramètres.

Au cours de ce volet, un rapprochement entre les hauteurs d'eau mesurées et les résultats donnés par la simulation sur le logiciel HEC-RAS sera effectué à la base de l'ajustement du paramètre de rugosité afin de diminuer les écarts entre le comportement observé et le comportement simulé de l'écoulement.

2. Calage des paramètres :

Plusieurs méthode d'estimation ont été développés, du fait que la nature des paramètres varie selon le contexte d'étude et l'objectif visé. On trouve l'approche déterministe qui vise à identifier un jeu de paramètres optimale. Ainsi, que les approches probabilistes cherchant à identifier les différents jeux de paramètres qui permettent de simuler le comportement du système considéré de manière correcte, on parle de comportement *behaviourial*. Cependant, les méthodes les plus répandues sont la *Generalized Sensitivity*

Analisis (GSA) Hornerberger & Spear (1981), et la *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE)* Beven & Binley (1992).

Cependant, l'application de ce genre de méthodes se fait généralement en hydrologie dans l'étude des bassins versant et la transformation pluie-débit. Avec l'intervention de différents paramètres estimés par l'imagerie aérienne et l'étendue d'inondation en plaine. Mais dans le contexte de calage des seules valeurs de hauteurs, il est juste demandé de caler le coefficient de rugosité de façon à obtenir le meilleur accord possible entre les résultats obtenus avec le modèle en simulation et les données mesurées. En d'autres termes, le calage vise à trouver le jeu de paramètres qui minimisent les résidus $\varepsilon_h(\mathbf{t}, \boldsymbol{\theta})$.

Pour caler ce modèle (écoulement permanent limité au lit mineur), les données nécessaires sont :

- l'objet de l'étude : on recherchera surtout à reproduire les paramètres caractéristiques du phénomène à simuler;
- les mesures de hauteurs d'eau au laboratoire ;
- les observations de l'écoulement au laboratoire ainsi que l'ensemble de dimension du canal et des singularités (conditions géométriques, conditions aux limites, ...) ;
- Une estimation a priori du coefficient de Manning.

3. La démarche suivie pour le calage :

Après la prise de mesure au laboratoire et le lancement de simulation sur HEC-RAS pour les mêmes conditions d'écoulement, des tableaux de hauteurs mesurées et de hauteurs simulées seront établis pour exactement les mêmes sections en travers.

3.1 Choix du critère de comparaison de valeurs :

Pour une meilleure exploitation des résultats obtenues et une meilleure analyse, le critère de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe 1970) sera utilisé, ce critère exprime la différence relative entre un modèle testé et l'erreur d'un modèle de référence, défini par la moyenne des hauteurs.

$$F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{10} (h_{mes(i)} - h_{sim(i)})^2}{\sum_{i=1}^{10} (h_{mes(i)} - \bar{h}_{mes})^2} \quad (IV.3)$$

$h_{mes(i)}$: Hauteur d'eau mesurée ;

$h_{sim(i)}$: Hauteur d'eau simulée ;

\bar{h}_{mes} : Moyenne des hauteurs d'eau mesurées ;

Plus la valeur du critère est proche de 1, meilleur est l'accord entre la simulation et l'observation. Une valeur négative du critère signifie qu'il est préférable de prendre comme modèle la moyenne des valeurs observées plutôt que celles de la simulation. Une valeur nulle signifie que le modèle de référence et le modèle proposé ont la même performance. (Benoit & al 2009)

Le calcul du coefficient de Nash se fera pour les mesures de chaque pente et débit, afin de pouvoir identifier les cas où la simulation sur HEC-RAS ne donne pas un comportement correct vis-à-vis des mesures effectuées au laboratoire.

Il y a plusieurs fonctions et critères de comparaisons couramment utilisées :

$$\text{Biais} \quad F = \frac{1}{n} \sum_1^n (h_{mes(i)} - h_{sim(i)}) \quad (IV.4)$$

$$\text{Moindres carrés} \quad F = \frac{1}{n} \sum_1^n (h_{mes(i)} - h_{sim(i)})^2 \quad (IV.5)$$

$$\text{Moindres carrés} \quad F = \frac{1}{n} \frac{\sum_1^n |h_{mes(i)} - h_{sim(i)}|}{\sum_1^n h_{mes}} \quad (IV.6)$$

3.2 Correction du paramètre de rugosité :

Suivant la formule de Manning-Strickler : à débits égaux et avec les mêmes conditions d'écoulement (géométriques, aux limites,...) les hauteurs d'eau obtenues seront théoriquement égales. Alors, les résidus entre les valeurs mesurées sont dus soit à la variation du coefficient de Manning suivant le régime d'écoulement ou bien à un décalage entre la section de mesure au laboratoire, et la section prise sur HEC-RAS.

Pour l'écoulement simulé la valeur du coefficient de rugosité est donnée a priori, mais sa valeur en réalité dépendrait de la nature de l'écoulement lui-même de son régime et des hauteurs d'eau.

Soit les deux écoulements : celui observé au laboratoire de débit nommé Q_o à partir de mesures de hauteurs d'eau, et celui simulé sur HEC-RAS de débit nommé Q_s :

$$Q_o = Q_s$$

$$\frac{1}{n_1} S_1 R_1^{2/3} \sqrt{i} = \frac{1}{n_2} S_2 R_2^{2/3} \sqrt{i}$$

$$n_2 = n_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{5/3} \left(\frac{B + 2h_1}{B + 2h_2} \right)^{2/3} \quad (IV.7)$$

n_2 : Coefficient de Manning ajusté ;

n_1 : Coefficient de Manning estimé a priori pour la simulation ;

h_1 : Hauteur d'eau mesurée au laboratoire ;

h_2 : Hauteur d'eau simulée sur HEC-RAS ;

B : Largeur du canal ;

La formule **IV.7** servira pour le calage des coefficients de Manning.

4. Le calage des simulations :

4.1 Evaluation des simulations d'écoulement selon le critère de Nash-Sutcliffe :

Cette étape consiste en le calcul des coefficients d'efficacité de Nash-Sutcliffe, pour les différents cas de simulations, afin d'identifier les simulations non-comportementales, dans les tableaux suivants sont résumées les valeurs:

Tableau IV.1: Coefficients de Nash-Sutcliffe cas du canal simple

Pente (%)	Section de mesure	
	2 m	8 m
-0.5	0.99	0.99
0	0.97	0.95
0.5	0.66	0.71
1.0	0.31	0.19
1.5	0.90	0.60
2.0	0.97	0.64
2.5	0.97	0.74

Tableau IV.2: Coefficients de Nash-Sutcliffe cas du canal avec piles de pont

Pente (%)	Section de mesure				
	1 m	2 m	3.5 m	4.5 m	8 m
-0.5			0.99	0.99	
0			0.99	0.99	
0.5	0.85	0.87	0.95	0.78	0.93
1	-1.49	-3.99	0.9	0.64	0.9
1.5	0.94	-4.31	0.92	0.86	0.58
2	0.91	0.97	0.91	0.95	0.55
2.5	0.84	0.92	0.96	0.98	0.64

Tableau IV.3 : Coefficients de Nash-Sutcliffe cas du canal avec plaques rugueuses

Pente (%)	Section de mesure				
	2 m	4 m	5.5 m	7 m	8.5 m
-0.5	-3.45	0.29	0.37	0.97	-1.66
0	-5.36	-0.71	-0.13	-0.87	-0.56
0.5	-6.19	-11.77	-2.1	0.94	0.98
1	0.95	0.21	0.97	0.95	0.9
1.5	0.98	0.20	0.96	0.9	0.93
2	0.77	0.78	0.78	0.92	0.78

4.1.1 Cas du canal simple :

Pour la simulation des écoulements sur canal simple, HEC-RAS décrit d'une façon assez acceptable l'ensemble des phénomènes observés au laboratoire, en plus en se référant aux valeurs du coefficient de Nash-Sutcliffe qui sont tous proches de 1 pour ce cas, il est admissible d'accepter que le comportement simulé s'accompagne très bien avec le comportement réel, quoique, il peut s'avérer un petit décalage quand F ne dépasse pas la valeur de **0.90**. Quelques exemples sont donnés dans les figures suivantes :

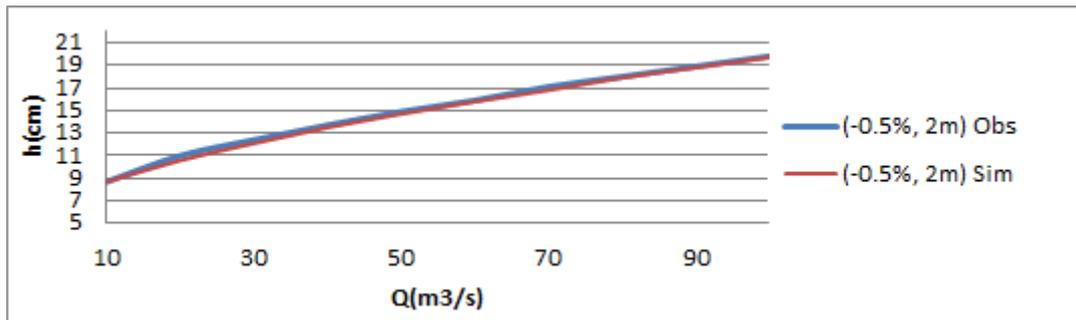


Figure IV.1: Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = -0.5\%$

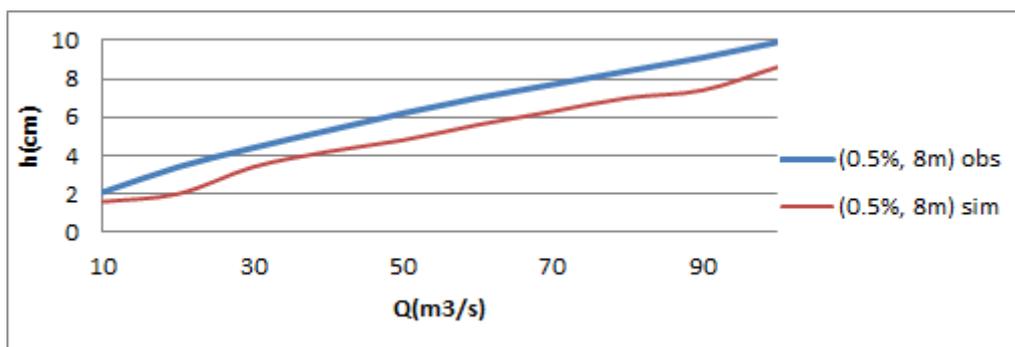


Figure IV.2 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 0.5\%$

Dans ce cas deux échantillons ont été pris, selon la valeur du coefficient d'efficience. Dans le cas de la (figure IV.1), $F = 0.99$ d'où l'ajustement parfait entre les deux courbes. Cependant, pour le deuxième cas un décalage de $(1 \div 2) \text{ cm}$ est remarqué ce qui est confirmé par une valeur de $F = 0.71$ s'éloignant de 1.

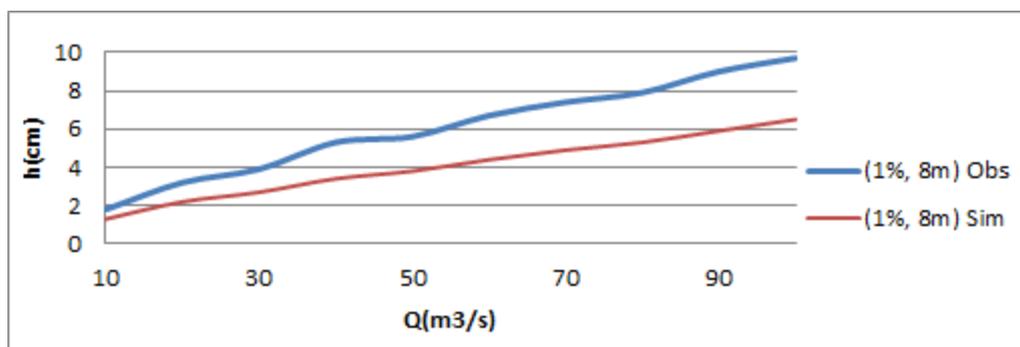


Figure IV.3 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 1\%$

Pour la (figure IV.3) le décalage entre les valeurs mesurées et les résultats de la simulation atteint l'échelle de **4 cm** par endroits, ce qui peut s'expliquer par le fait que la valeur $I = 1\%$ est la valeur où il y a un régime critique qui domine soit dans les résultats de la simulation sur HEC-RAS ou bien lors des conclusions tirées à partir des observations au laboratoire. D'après cela, il a été jugé nécessaire de calibrer tous les coefficients de Manning des simulations ou la valeur des coefficients d'efficience est obtenue négative ou bien inférieure à $F = 0.90$ pour s'assurer d'une simulation qui concorde parfaitement avec le cas réel.

4.1.2 Canal avec piles de pont :

Les résultats de la simulation des écoulements pour le cas du canal avec piles de pont, sont a priori assez proches des mesures du laboratoire. Quoique, en analysant les valeurs du coefficient d'efficience il en résulte que pour les pentes (**0.5, 1, 1.5 %**) s'y trouvent trois cas où $F < 0$ donc le comportement de la simulation diffère complètement du réel, et pour les cas où cinq cas pour les quels $F < 0.90$ qui nécessitent aussi un calage.

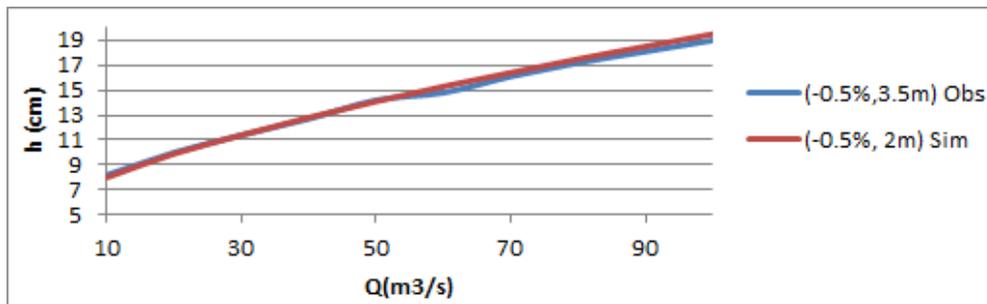


Figure IV.4 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = -0.5 \%$

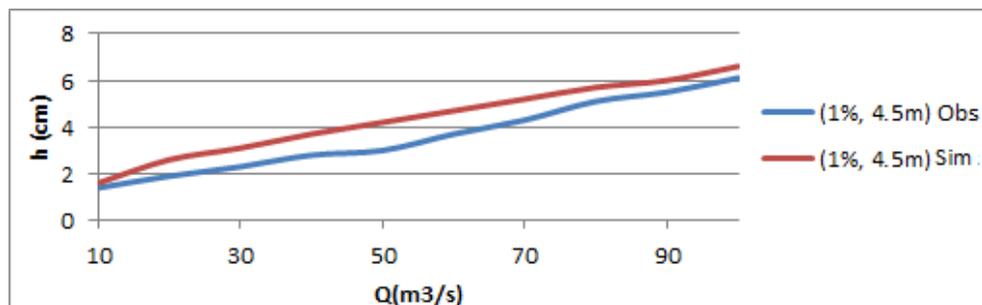


Figure IV.5 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 1 \%$

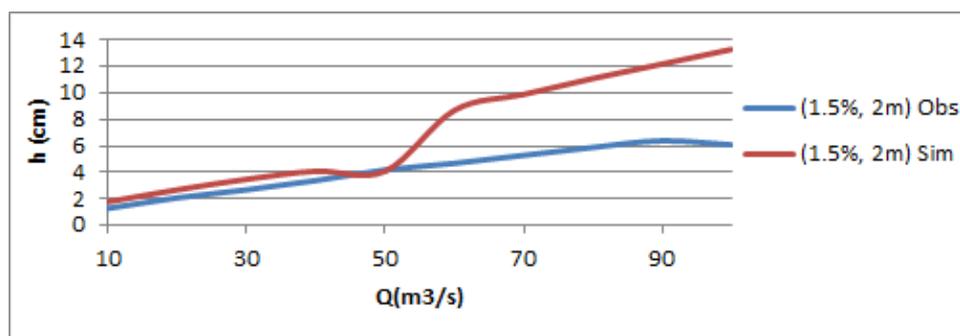


Figure IV.6 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 1.5 \%$

Les cas semblables à celui de la (figure IV.4) sont les simulations qui concordent parfaitement avec le cas expérimental. Cependant, le logiciel ne peut simuler toutes les situations avec un comportement correct, d'où les décalages dans les figures (IV.5, IV.6) atteignant les **7 cm** au niveau de la section en amont de la pile pour les pentes de (**0.5, 1, 1.5%**) cela peut s'expliquer par l'incapacité de HEC-RAS à modéliser la forme exacte des piles qui sont en réalité en forme rectangulaire rognée, et cet effet s'accroît pour des débits supérieurs à **40m³/h** avec l'augmentation de la section de contact de l'eau avec les piles.

4.1.3 Cas du canal avec plaques rugueuses :

La variation de la rugosité du fond influe sur la hauteur de la lame d'eau, et puisque la valeur de rugosité n'est pas connue et estimée a priori, beaucoup de fluctuations sont visualisés entre les résultats de simulations et les valeurs mesurées expérimentalement. En plus, même si la rugosité serait connue, une valeur fixe ne pourrait donner des hauteurs aussi proches dans le logiciel HEC-RAS puisque le coefficient de Manning dépend aussi du régime d'écoulement. D'après calcul des coefficients d'efficience dans le (tableau IV.3) il est noté :

- Il y a **16/30** de cas qui ont un comportement incorrect ;
- Pour la section **L = 4m** toutes les simulations ont un grand décalage des résultats expérimentaux ;

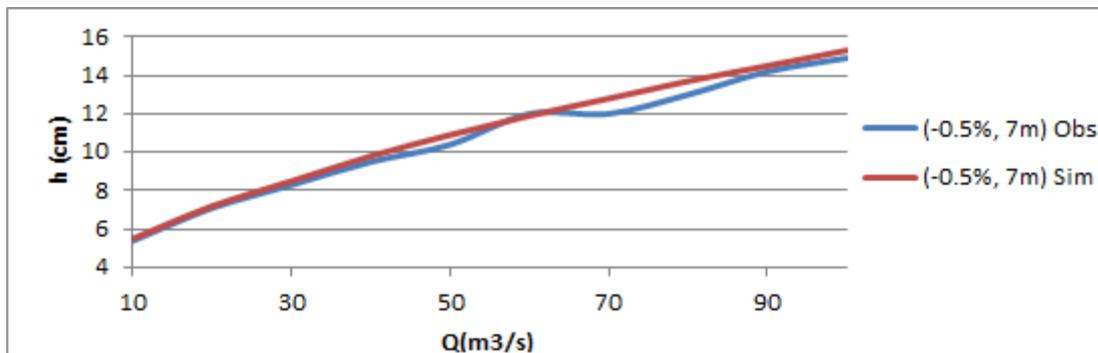


Figure IV.7 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = -0.5 \%$

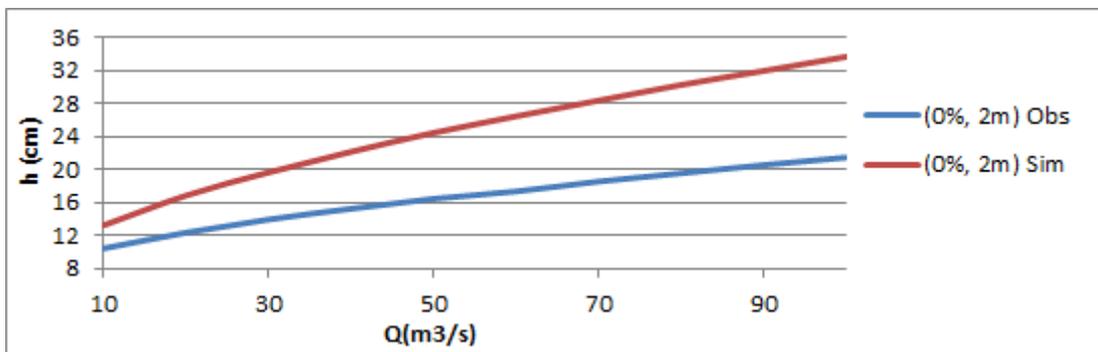


Figure IV.8 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 0\%$

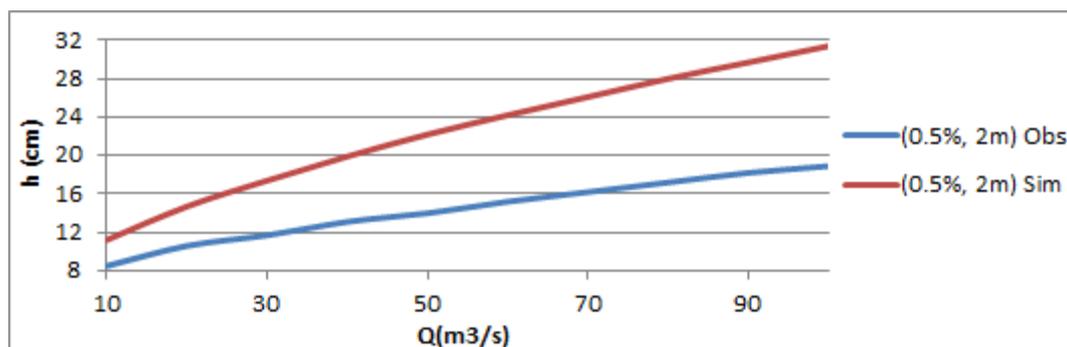


Figure IV.9 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées $I = 0.5 \%$

Pour ce cas les simulations divergent dans la plupart des cas des valeurs expérimentales, on remarque des différences qui atteignent les **16 cm**.

Ces décalages peuvent s'expliquer par :

- L'incertitude sur la mesure au laboratoire ;
- La difficulté de modéliser la section d'approche des plaques rugueuses sur HEC-RAS ;
- La mauvaise estimation du coefficient de Manning pour les plaques rugueuses.

4.2 Ajustement des coefficients de Manning :

Cette étape consiste en l'utilisation de la formule (IV.7) pour l'ajustement des coefficients de Manning estimés a priori, quoique l'on se contente des coefficients composés pour des simplifications de calculs. La démarche suivie est résumé comme suit :

- Tri des simulations non-comportementales ;
- Calcul des coefficients de Manning composés estimés à priori (n_{fond}, n_{parois}) ;
- Calcul du nouveau coefficient de Manning par la relation (IV.7);

Tableau IV.4: Valeurs corrigées Manning canal simple $I = 0.5, I = 1.0\%$

	0.5%, 2 m		0.5%, 8 m		1%, 2 m		1%, 8 m	
	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}
10	0.0149	0.0100	0.0135	0.0273	0.0141	0.0074	0.0126	0.0291
20	0.0176	0.0096	0.0146	0.0584	0.0167	0.0081	0.0151	0.0403
30	0.0193	0.0122	0.0176	0.0347	0.0188	0.0083	0.0163	0.0426
40	0.0206	0.0134	0.0190	0.0350	0.0206	0.0080	0.0176	0.0567
50	0.0217	0.0130	0.0199	0.0390	0.0217	0.0088	0.0183	0.0509
60	0.0226	0.0132	0.0210	0.0378	0.0218	0.0112	0.0193	0.0585
70	0.0234	0.0162	0.0218	0.0371	0.0226	0.0126	0.0200	0.0595
80	0.0241	0.0149	0.0226	0.0367	0.0233	0.0148	0.0206	0.0591
90	0.0248	0.0159	0.0231	0.0399	0.0247	0.0117	0.0213	0.0652
100	0.0255	0.0140	0.0243	0.0353	0.0253	0.0115	0.0221	0.0637

Tableau IV.5 : Valeurs corrigées Manning canal avec piles de pont $I = 1.5\%$

	0.5%, 1 m		0.5%, 2 m		0.5%, 8.5 m	
	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}
10	0.0154	0.0070	0.0163	0.0233	0.0135	0.0096
20	0.0190	0.0072	0.0197	0.0121	0.0160	0.0071
30	0.0215	0.0133	0.0221	0.0171	0.0171	0.0078
40	0.0232	0.0159	0.0237	0.0166	0.0182	0.0087
50	0.0245	0.0178	0.0249	0.0190	0.0190	0.0078
60	0.0257	0.0189	0.0261	0.0212	0.0197	0.0105
70	0.0267	0.0168	0.0271	0.0214	0.0204	0.0124
80	0.0276	0.0206	0.0280	0.0188	0.0211	0.0157
90	0.0284	0.0195	0.0287	0.0209	0.0215	0.0171
100	0.0291	0.0190	0.0295	0.0203	0.0222	0.0180

Tableau IV.6 : Valeurs corrigées Manning canal avec plaques $I = 0\%$

	0%, 2 m		0%, 4m		0%, 5.5 m		0%, 7 m	
	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}
10	0.0282	0.0150	0.0232	0.0497	0.0223	0.0473	0.0178	0.0178
20	0.0306	0.0134	0.0262	0.0317	0.0251	0.0296	0.0178	0.0178
30	0.0322	0.0130	0.0282	0.0255	0.0271	0.0259	0.0203	0.0155
40	0.0335	0.0125	0.0297	0.0223	0.0285	0.0219	0.0219	0.0015
50	0.0346	0.0121	0.0310	0.0200	0.0297	0.0203	0.0173	0.0159
60	0.0356	0.0116	0.0321	0.0194	0.0308	0.0176	0.0182	0.0157
70	0.0364	0.0118	0.0330	0.0181	0.0317	0.0186	0.0191	0.0138
80	0.0372	0.0117	0.0339	0.0174	0.0325	0.0187	0.0199	0.0149
90	0.0379	0.0117	0.0347	0.0165	0.0332	0.0174	0.0206	0.0158
100	0.0386	0.0117	0.0354	0.0164	0.0339	0.0179	0.0212	0.0167

Le reste des tableaux de calage des coefficients de Manning sont en annexe.

5. Relance des simulations :

Les résultats obtenus avec le logiciel HEC-RAS ne sont pas tous conformes aux valeurs mesurées au laboratoire. Après calage du coefficient de Manning les hauteurs qui sont obtenues lors de la vérification s'approchent mieux, quoiqu'elles restent un peu décalées par rapport à l'expérience. Cela est dû au calcul du coefficient global entre le fond et les parois, d'où résulte un certain nombre d'incertitudes sur les hauteurs des lames d'eau.

Afin de mieux approcher les hauteurs d'eau il faudrait spécifier le coefficient de Manning cas par cas, c'est-à-dire le n pour chaque débit dans chaque pente.

6. Interprétation et discussion des résultats :

6.1 Une vue générale de l'étude :

Pour la modélisation de phénomènes plus complexes, les méthodes d'optimisation comme GSA, GLUE qui font intervenir plusieurs paramètres, afin d'en trouver les vecteurs qui permettent d'obtenir des résultats concordant avec les valeurs observés.

Dans le contexte d'étude sur un canal expérimental, il est recommandé de travailler avec des approches plus simplifiées, alors il a fallu trouver une fonction de mesure « critère d'efficacité » qui permet d'identifier les simulations non correctes et une relation pour ajuster le paramètre de rugosité.

Une fois le coefficient de Manning est calé pour les cas de simulations incorrectes ; il faudrait relancer des simulations avec les nouvelles valeurs, afin d'obtenir des hauteurs plus proches de la réalité. Cette opération est refaite plusieurs fois jusqu'à obtenir si possible des coefficients d'efficacité très proches de **1**. Mais cette condition reste difficile à atteindre vu les incertitudes sur la valeur du coefficient de Manning qui s'ajoute à chaque fois qu'on fait intervenir la relation d'Einstein pour le calcul du coefficient composé. En plus, pour faire une simulation qui concorde parfaitement avec le cas réel un très grand nombre de sections en travers est demandé sur HEC-RAS et même avec l'option d'interpolation, il est n'est pas évident de corriger le n à chaque fois colonne par colonne dans les tableaux proposés sur le programme, une fonctionnalité non disponible sur HEC-RAS.

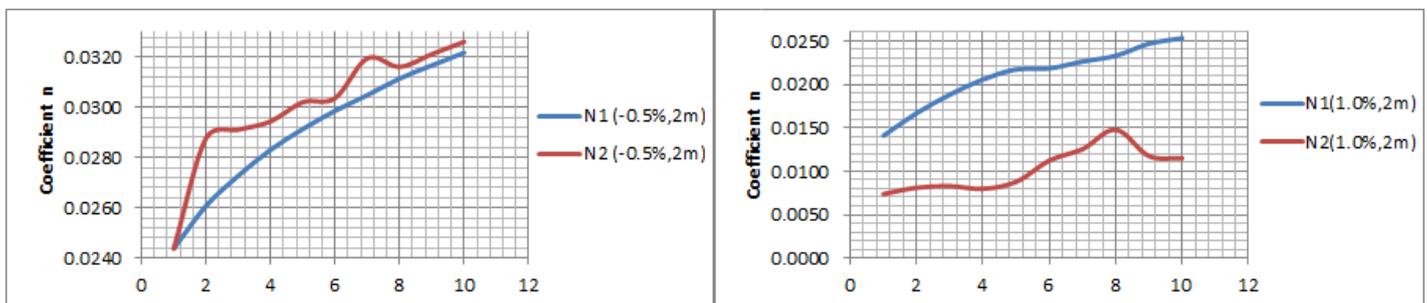


Figure IV.10 : Représentation graphique de Manning estimés et calés

La (figure IV.10) est une représentation de valeurs de n avant et après calage pour les cas de $I = -0.5\%$, $I = 1.0\%$ dans la section de $L = 2m$.

Comparant aux valeurs estimées a priori : la courbe de valeurs calées présente plus de fluctuation, puisque la première est issue de la seule valeur du coefficient de Manning calculée à partir de la composition de parois et du fond du canal (n_{fond}, n_{parois}). Cependant, la deuxième courbe est issue des de la correction des résidus entre les hauteurs mesurées au laboratoire et les résultats de la simulation sur HEC-RAS. Il est aussi nécessaire de souligner que les écarts diffèrent avec l'augmentation du débit ainsi que le changement du régime d'écoulement.

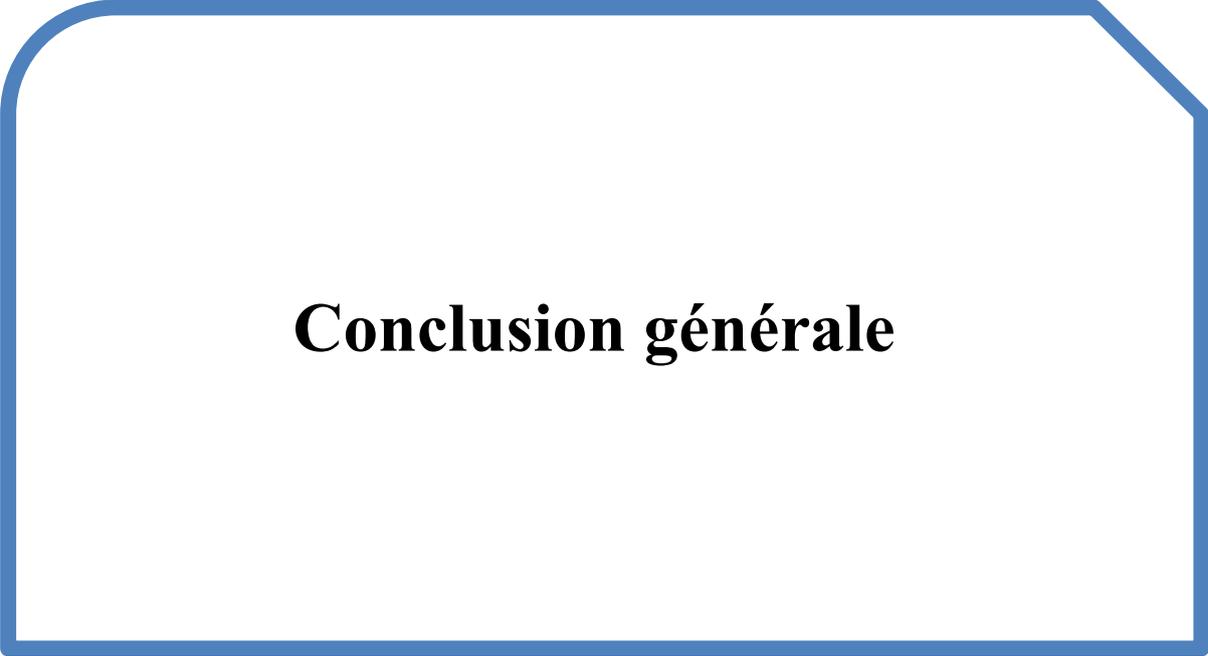
6.2 Fiabilité des résultats issus du logiciel :

A l'issue de ce travail dont une bonne partie s'est faite sur HEC-RAS, il est légitime de s'interroger jusqu'à quelle limite on peut faire confiance aux résultats, et es-ce que tous les résultats et les caractéristiques hydrauliques en sortie peuvent décrire suffisamment la complexité d'un écoulement naturel à ciel ouvert avec toutes les obstructions et les différentes singularités rencontrées sur ce genre de milieux ainsi que la variabilité spatio-temporelle des cours d'eau. Alors, d'après ce qui précède : il peut être affirmé que pour des conditions géométriques et conditions aux limites bien connues, l'incertitude sur les résultats peut juste se limiter à celle engendrée par la variabilité de régime et la modélisation de singularité. Autrement, pour une section remarquable comme dans le cas du canal expérimental, il n'y a pas beaucoup d'incertitudes sur la géométrie ainsi que les conditions aux limites puisque elles sont connues et bien déterminées.

La visualisation des différents phénomènes hydrauliques (ressaut, remous) au laboratoire confirme qu'une bonne partie a été assez bien représentée sur le logiciel et aussi l'augmentation de la vitesse entre les piles de pont ou bien sa diminution à l'approche des singularités. Cependant, afin de bien présenter un écoulement il aurait fallu étudier un seul cas afin de faire des mesures plus proches au laboratoire et de bien caler les lignes d'eau sur logiciel.

Conclusion :

Au terme de ce dernier volet du travail, il est indispensable de souligner, qu'il n'est pas visé de caler le mode du calcul du logiciel lui-même, mais in fine d'évaluer la simulation de l'écoulement, de limiter les incertitudes engendrées par l'estimation a priori du coefficient effectif de rugosité et de déterminer une procédure de calage de ce paramètre. Ainsi, on a résumé les différentes étapes suivies et une brève comparaison entre valeurs simulées et valeurs mesurées.



Conclusion générale

Au travers de ce qui a précédé, il a été procédé à un calage des résultats de simulation et le réglage des entrées du logiciel HEC-RAS pour qu'il reproduise effectivement les mêmes caractéristiques d'écoulements que celles observées au laboratoire. Ça consiste à ajuster les coefficients empiriques de la formulation qui est le nombre de Manning dans le cas présent, il permet aussi de façon globale de vérifier que la schématisation adoptée respecte les conditions d'écoulements expérimentales.

De façon globale HEC-RAS à simuler l'écoulement à surface libre sur le canal expérimental d'une manière assez acceptable, notamment, la visualisation de différents phénomènes hydrauliques (ressaut, remous). Cependant, en se fixant sur le coefficient de Nash-Sutcliffe les hauteurs mesurées ne se calent pas parfaitement dans tous les cas. Pour le canal simple la plupart des valeurs simulées s'approchent d'une façon admissible des hauteurs mesurées quoique il y a eu nécessité de calage du coefficient de Manning pour quelques cas isolés.

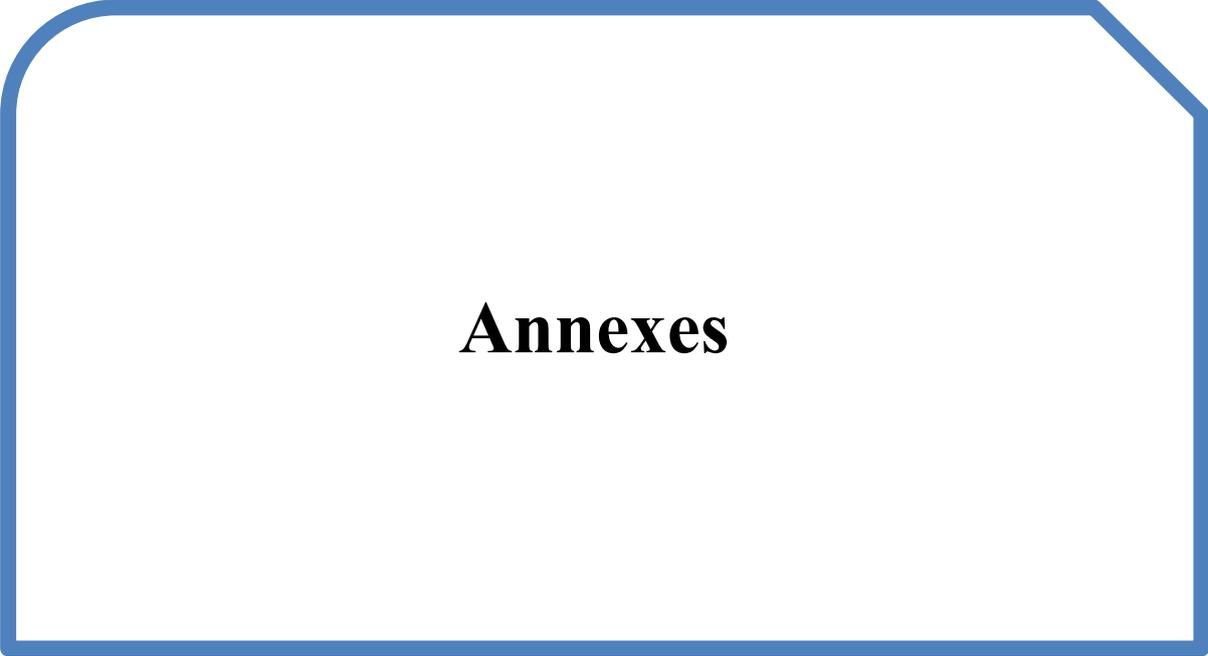
Les quelques décalages perçus dans le cas des piles de pont sont dus à l'incapacité du logiciel à modéliser la forme exacte des piles qui sont en réalité de forme rectangulaire rongée, que ce dernier prend comme rectangles. En ce qui concerne le cas des plaques rugueuses, les simulations ont divergés dans la plupart des cas cela est forcément dû, à une fausse estimation a priori de la rugosité des plaques, et aussi la difficulté de modéliser la section d'approche à l'entrée des plaques.

Les hauteurs simulées obtenues après calage s'approchent mieux, même si elle ne se conforme pas totalement, une condition difficile à atteindre vu les incertitudes sur la valeur du coefficient de Manning qui s'ajoute à chaque fois qu'on fait intervenir la relation d'Einstein pour le calcul du coefficient composé. En plus, pour faire une simulation qui concorde parfaitement avec le cas réel un très grand nombre de sections en travers est demandé sur HEC-RAS et même avec l'option d'interpolation, il est n'est pas évident de corriger le n à chaque fois colonne par colonne dans les tableaux proposés sur le programme, une fonctionnalité non disponible sur HEC-RAS.

Afin de mieux évaluer les résultats, il aurait été plus intéressant de se limiter à un seul cas et faire intervenir plus d'une singularité à la fois le long du canal. Cela aurait permis de prendre plus de sections de mesures tout en se conformant à la reproductivité des valeurs, et même d'avoir recours à des méthodes statistiques pour la comparaison et l'ajustement.

Bibliographie :

- [1] Gary W. Brunner HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, US ARMY CORPS OF ENGINEERS HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, January 2010.
- [2] Gary W. Brunner, CEIWR-HEC, HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 4.1, US ARMY CORPS OF ENGINEERS HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, January 2010.
- [3] John C. Warner, Gary W. Brunner, Brent C. Wolfe, and Steven S. Piper, HEC-RAS, River Analysis System Applications Guide, US ARMY CORPS OF ENGINEERS HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, January 2010.
- [4] Guide de laboratoire HEC-RAS Version 3.1.1, Université du Québec École de technologie supérieure, Mars 2005.
- [5] PAPPENBERGER F., BEVEN K., HORRITT M., & BLAZKOVA S. (2005) — Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*. 302 46-69.
- [6] GUINOT V., & GOURBESVILLE P. (2003) - Calibration of physically based models: back to basics? *Journal of Hydroinformatics*. 5(4) 233-244
- [7] CUNGE J. A., F. M. HOLLY, ET AL. (1980) - Practical aspects of computational river hydraulics. Pitman Advanced Publishing Program
- [8] BENNIS.S (2009) : « Hydraulique et hydrologie », 2ème Edition, École de technologie supérieure-Canada.
- [9] Armando LENCASTRE, Hydraulique Générale, 2eme édition, éditions EYROLLES, 1996.
- [10] Cyril Mazauric, Assimilation de données pour les modèles d'hydraulique fluviale. Estimation de paramètres, analyse de sensibilité et décomposition. Modélisation et simulation. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2003. Français. <tel-00004632>
- [11] Beven, K. J. and Binley, A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Process*, 1992, 6, 279–298.
- [12] Horritt, M.S., Bates, P.D., 2002. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology* 268 (1–4), 87–99.
- [13] Benoît Hingray, Cécile Picouet, André Musy, Hydrologie une science pour l'ingénieur 1ère édition, Science et ingénierie de l'environnement, PPUR 2014.



Annexes

A.I. Valeurs accordées aux coefficients de Strickler:

Nature de la surface de l'écoulement	K coefficient de Strickler
Canaux artificiels, galeries ou conduites à surface lisse	
Surface très lisses et sans saillies (verre neuf et net; pyroline - cuivre)	100 à 110
Surfaces lisses, sans saillies (bois net raboté; métal soudé non peint; ciment mortier ou béton bien lissé, bien soigné et sans débris; surfaces très lisses avec courbures moyennes)	80 à 90
Surfaces avec légères aspérités (acier riveté ou peint; fer forgé ou coulé; bois non raboté; ciment et mortier; béton coffré avec de l'acier ou du bois lisse sans débris et pas de courbures; canaux en béton très lisse avec joints; tuyau de drainage ordinaire; égout vitrifié sans saillie; brique vernissée, grès; asphalte lisse; moellons dressés avec joints cimentés; surfaces lisses ou très lisses avec fortes courbures)	70 à 80
Surfaces avec aspérités moyennes (métal incrusté; métal riveté avec rivets grossiers; canaux en métal avec larges saillies vers l'intérieur; bois très grossier (madriers); béton avec bord lisse et fond rugueux; petit canal en béton, assez droit et régulier dont la surface est recouverte d'un léger dépôt; bois ou béton avec développement d'algues et de mousses; égouts avec regards; drains enterrés avec joint ouvert; terre particulièrement régulière; canaux avec plafond en sable fin (surfaces non ridées); surfaces lisses avec courbes excessives)	65
Surfaces rugueuses (métal très incrusté; béton coulé non lissé; béton coulé aux coffrages en bois rugueux; béton très rugueux ou vieux; maçonnerie vieille ou mal soignée; canaux en maçonnerie moyenne avec joints nombreux ou nombreuses courbes; bois ou béton avec développement dense d'algues ou de mousse; canaux en terre très régulière, état neuf, bon alignement; sable moyen; pierres dressées, joints cimentés)	55 à 60
Surfaces très rugueuses (canaux en métal avec très fortes saillies vers l'intérieur ou fortes courbures, ou développement de végétation importante ou débris accumulés; canaux en béton avec maçonnerie en très mauvais état ou très grossière; canaux très larges en gravier fin plus sable ou en terre régulière meuble, sans développement de végétation; radiers pavés; moellons bruts assemblés au ciment)	50
Surfaces à rugosité très importante (lit en gravier fin; canaux avec dépôts ou végétation; canaux en terre moyenne, dimensions modérées; moellons bruts grossièrement assemblés au ciment)	45
Surfaces assez grossières (aqueducs métalliques à section semi-circulaire en tôle plissée; terre en mauvais état; gravier moyen; canaux en terre de petites dimensions ou plus larges avec développement de végétation ou gros galets; fossés en bon état; canaux en terre sinueux sans végétation; blocage cimenté; béton sur roche régulièrement excavée)	40
Surfaces grossières (excavation rocheuse très régulière; gros graviers; pierre sèche; canaux en terre, dragués, sans végétation ou enherbés; chenaux d'évacuation de crue, larges et entretenus; béton sur roche irrégulièrement excavée; canaux et fossés avec nombreuses pierres lisses; canaux et fossés avec pierres rugueuses au fond et végétation sur les bords)	35
Surfaces très grossières (excavations rocheuses uniformes; canaux avec développements considérable de végétation; chenaux d'évacuation de crues, larges, mais peu entretenus; blocage sec; canaux en terre sinueux avec mauvaises herbes plus ou moins denses ou plantes aquatiques; canaux en terre sinueux avec fond en terre et berges en blocage au fond pierreux ou recouvertes de mauvaises herbes)	30
Surfaces excessivement grossières (excavations rocheuses irrégulières; canaux en terre en très mauvais état, très sinueux avec pierres rugueuses et végétation importante; lits majeurs d'évacuation de crue dégagés, mais entretenus de façon discontinue)	25

A.II. Valeurs corrigées des coefficients de Manning:

Tableau A.1: Valeurs corrigées Manning canal simple $I = 0.5, I = 1.0\%$

	0.5%, 2 m		0.5%, 8 m		1%, 2 m		1%, 8 m	
	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}
10	0.0149	0.0100	0.0135	0.0273	0.0141	0.0074	0.0126	0.0291
20	0.0176	0.0096	0.0146	0.0584	0.0167	0.0081	0.0151	0.0403
30	0.0193	0.0122	0.0176	0.0347	0.0188	0.0083	0.0163	0.0426
40	0.0206	0.0134	0.0190	0.0350	0.0206	0.0080	0.0176	0.0567
50	0.0217	0.0130	0.0199	0.0390	0.0217	0.0088	0.0183	0.0509
60	0.0226	0.0132	0.0210	0.0378	0.0218	0.0112	0.0193	0.0585
70	0.0234	0.0162	0.0218	0.0371	0.0226	0.0126	0.0200	0.0595
80	0.0241	0.0149	0.0226	0.0367	0.0233	0.0148	0.0206	0.0591
90	0.0248	0.0159	0.0231	0.0399	0.0247	0.0117	0.0213	0.0652
100	0.0255	0.0140	0.0243	0.0353	0.0253	0.0115	0.0221	0.0637

Tableau A.2 : Valeurs corrigées Manning canal simple $I = 1.5, I = 2.0\%, I = 2.5\%$

	1.5%, 8m		2%, 8 m		2.5%, 8 m	
	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}
10	0.0122	0.0347	0.0119	0.0262	0.0115	0.0271
20	0.0141	0.0298	0.0138	0.0303	0.0138	0.0239
30	0.0154	0.0395	0.0151	0.0311	0.0146	0.0320
40	0.0169	0.0383	0.0160	0.0299	0.0160	0.0276
50	0.0176	0.0288	0.0171	0.0356	0.0169	0.0292
60	0.0187	0.0354	0.0180	0.0343	0.0174	0.0308
70	0.0196	0.0361	0.0185	0.0356	0.0182	0.0270
80	0.0200	0.0372	0.0193	0.0347	0.0188	0.0317
90	0.0204	0.0431	0.0199	0.0358	0.0196	0.0299
100	0.0213	0.0375	0.0206	0.0353	0.0202	0.0285

Tableau A.3 : Valeurs corrigées Manning canal avec piles de pont $I = 1.5\%$

	0.5%, 1 m		0.5%, 2 m		0.5%, 8.5 m	
	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}
10	0.0154	0.0070	0.0163	0.0233	0.0135	0.0096
20	0.0190	0.0072	0.0197	0.0121	0.0160	0.0071
30	0.0215	0.0133	0.0221	0.0171	0.0171	0.0078
40	0.0232	0.0159	0.0237	0.0166	0.0182	0.0087
50	0.0245	0.0178	0.0249	0.0190	0.0190	0.0078
60	0.0257	0.0189	0.0261	0.0212	0.0197	0.0105
70	0.0267	0.0168	0.0271	0.0214	0.0204	0.0124
80	0.0276	0.0206	0.0280	0.0188	0.0211	0.0157
90	0.0284	0.0195	0.0287	0.0209	0.0215	0.0171
100	0.0291	0.0190	0.0295	0.0203	0.0222	0.0180

Tableau A.4 : Valeurs corrigées Manning canal simple $I = 1\%$

	1.0%, 1 m		1.0%, 2 m		1.0%, 8.5 m	
	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}
10	0.0146	0.0058	0.0144	0.0065	0.0132	0.0092
20	0.0180	0.0069	0.0182	0.0047	0.0158	0.0113
30	0.0182	0.0114	0.0208	0.0042	0.0171	0.0097
40	0.0215	0.0074	0.0226	0.0039	0.0182	0.0114
50	0.0231	0.0070	0.0241	0.0046	0.0188	0.0076
60	0.0244	0.0073	0.0253	0.0046	0.0196	0.0088
70	0.0255	0.0077	0.0263	0.0047	0.0203	0.0107
80	0.0265	0.0067	0.0273	0.0053	0.0213	0.0111
90	0.0274	0.0081	0.0281	0.0050	0.0218	0.0160
100	0.0281	0.0067	0.0288	0.0057	0.0223	0.0174

Tableau A.5 : Valeurs corrigées Manning canal simple $I = 1.5\%$

	1.5%, 2 m		1.5%, 4.5 m	
	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}
10	0.0141	0.0061	0.0138	0.0069
20	0.0163	0.0084	0.0156	0.0156
30	0.0178	0.0090	0.0173	0.0073
40	0.0188	0.0115	0.0183	0.0075
50	0.0188	0.0200	0.0187	0.0104
60	0.0244	0.0048	0.0199	0.0123
70	0.0255	0.0049	0.0204	0.0157
80	0.0265	0.0050	0.0208	0.0208
90	0.0274	0.0050	0.0213	0.0204
100	0.0282	0.0036	0.0218	0.0228

Tableau A.6 : Valeurs corrigées Manning canal avec plaques $I = -0.5\%$

	-0.5%, 2 m		-0.5%, 4.5 m	
	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}
10	0.0293	0.0217	0.0244	0.0523
20	0.0315	0.0184	0.0272	0.0336
30	0.0330	0.0161	0.0290	0.0295
40	0.0342	0.0170	0.0305	0.0259
50	0.0353	0.0158	0.0317	0.0239
60	0.0362	0.0156	0.0327	0.0226
70	0.0370	0.0156	0.0337	0.0194
80	0.0378	0.0150	0.0344	0.0199
90	0.0384	0.0151	0.0352	0.0195
100	0.0391	0.0147	0.0359	0.0186

Tableau A.7 : Valeurs corrigées Manning canal avec plaques $I = 0\%$

	0%, 2 m		0%, 4m		0%, 5.5 m		0%, 7 m	
	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}	n_{sim}	n_{cor}
10	0.0282	0.0150	0.0232	0.0497	0.0223	0.0473	0.0178	0.0178
20	0.0306	0.0134	0.0262	0.0317	0.0251	0.0296	0.0178	0.0178
30	0.0322	0.0130	0.0282	0.0255	0.0271	0.0259	0.0203	0.0155
40	0.0335	0.0125	0.0297	0.0223	0.0285	0.0219	0.0219	0.0015
50	0.0346	0.0121	0.0310	0.0200	0.0297	0.0203	0.0173	0.0159
60	0.0356	0.0116	0.0321	0.0194	0.0308	0.0176	0.0182	0.0157
70	0.0364	0.0118	0.0330	0.0181	0.0317	0.0186	0.0191	0.0138
80	0.0372	0.0117	0.0339	0.0174	0.0325	0.0187	0.0199	0.0149
90	0.0379	0.0117	0.0347	0.0165	0.0332	0.0174	0.0206	0.0158
100	0.0386	0.0117	0.0354	0.0164	0.0339	0.0179	0.0212	0.0167