

جامعة سعيدة - د. الطاهر مولاي -

UNIVERSITÉ DE SAÏDA – Dr MOULAY TAHAR –

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil et d'Hydraulique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER en Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Par : MEFTAH Ameer

ADEL Billal

CALCUL DES COURBES DE REMOUS AVEC HEC - RAS

Soutenu, le 30 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M^r YLES .F

Président

M^r HAFIANE .M

Encadreur

M^{me} ZAÏRI .S

Examinateur

Remerciement

- En premier, je tiens à remercier DIEU le miséricordieux de m'avoir donné la santé et m'accordé la volonté et la possibilité de réussir dans mes études.
- Je remercie Monsieur HAFIANE MOHAMED pour son encadrement pour ses idées, son soutien durant la préparation de ce mémoire .
- Mes hommages à tous mes professeurs qui m'ont transmis leurs savoirs,
- Je remercie aussi tous les membres du jury pour m'avoir accordé l'honneur d'accepter d'examiner mon travail et juger sa valeur.
- Enfin, mes remerciements à toutes les personnes, qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement du projet, tant au niveau humain qu'au niveau scientifique.

SOMMAIRE

Introduction générale

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

I.1. Introduction.....	2
I.2. Généralité sur les écoulements à surface libre	2
I.3. Quelques définitions de l'écoulement.....	2
I.3.1. Définition de l'écoulement à surface libre	2
I.3.2. Définition de l'écoulement stationnaire (permanent)	2
I.3.3. Définition de l'écoulement non stationnaire (non permanent)	2
I.3.4. Définition de l'écoulement uniforme	2
I.3.5. Définition de l'écoulement non uniforme	3
I.3.6. Définition de l'écoulement laminaire.....	3
I.3.7. Définition de l'écoulement turbulent.....	3
I.4. Les canaux	3
I.4.1. Définition d'un canal	3
I.4.2. Les différents types de canaux.....	3
I.4.2.1. Les canaux naturels	4
I.4.2.2. Les canaux artificiels.....	4
I.4.3. Définition d'un canal prismatique.....	5
I.4.4. Propriétés géométriques et hydrauliques des canaux	5
I.4.5. La section	5
I.4.7.1. La section mouillée (ω)	5
I.4.7.2. Le périmètre mouillé (χ)	6
I.4.7.3. La profondeur d'eau (h)	6
I.4.7.4. La largeur superficielle de la surface libre (B)	7
I.4.7.5. La profondeur moyenne (h_m).....	7
I.4.7.6. Les pentes	7
I.4.6. La surface libre et la turbulence.....	8
I.4.7. Classification des écoulements	9
I.4.8.1. Variations rapides.....	10
I.4.8.2. Variations graduelles	10
I.4.8. Présentation rapide des différents régimes d'écoulement	10

I.4.8.1.	Régime permanent.....	10
I.4.8.2.	Écoulement permanent uniforme.....	10
I.4.8.3.	Écoulement permanent varié	11
I.4.8.4.	Régime transitoire.....	11

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

II.1.	Introduction.....	12
II.2.	Présentation du logiciel HEC-RAS	12
II.3.	Le mode de fonctionnement de HEC-RAS.....	13
II.3.1.	Les fichiers constituant un projet HEC-RAS	13
II.3.1.1.	Projet (Project)	14
II.3.1.2.	Géométrie (Geometry)	14
II.3.1.3.	Débit (Flow).....	14
II.3.1.4.	Plan (Plan)	14
II.3.1.5.	Simulation (Run).....	14
II.3.2.	Les données géométriques.....	15
II.3.3.	Les données de débit en écoulement uniforme	16
II.3.3.1.	Hauteur d'eau connue	16
II.3.3.2.	La hauteur critique	17
II.3.3.3.	La hauteur normale	17
II.3.3.4.	Courbe de tarage.....	17
II.3.4.	La simulation en écoulement uniforme	17
II.4.	Extensions et programmes associés.....	17
II.4.1.	AutoCAD, RiverCAD.....	17
II.4.2.	HEC-GeoRAS.....	17
II.5.	Fonctionnement de HEC-RAS	18
II.5.1.	Démarrage de HEC-RAS	18
II.5.2.	Barre de menu HEC-RAS	19
II.5.3.	Barre de bouton HEC-RAS.....	22

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

III.1.	Introduction.....	23
III.2.	Écoulement graduellement varié.....	23
III.3.1.	Définition	23
III.3.2.	Equation simplifiée de Saint Venant	24

III.3.	Forme de la surface d'eau	27
III.3.1.	Courbe de remous.....	27
III.3.2.	Canaux à pente faible	29
III.3.3.1.	Courbe M_1	29
III.3.3.2.	Courbe M_2	30
III.3.3.3.	Courbe M_3	31
III.3.3.	Canaux à pente forte	31
III.3.3.1.	Courbe S_1	31
III.3.3.2.	Courbe S_2	32
III.3.3.3.	Courbe S_3	33
III.3.4.	Canaux à pente critique	33
III.3.4.1.	Courbe C_1	34
III.3.4.2.	Courbe C_2	34
III.3.4.3.	Courbe C_3	34
III.3.5.	Canaux horizontaux	35
III.3.6.	Canaux à contre pente.....	36
III.4.	Calcul du profil de la ligne d'eau à la surface d'eau	37
III.4.1.	Définition	37
III.4.2.	Méthode par approximations successives	37
III.4.2.1.	Méthode des tronçons (Δx est fixée)	39
III.4.2.2.	Méthode des variations de profondeur (Δh est fixée)	40
III.4.3.	Méthode par intégration directe.....	40
III.4.4.1.	Méthode de Bresse.....	43
III.4.4.	Méthode par intégration graphique	44
III.4.4.1.	Méthode directe	45
III.5.	CONCLUSION	45

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1.	Introduction.....	47
IV.2.	Résultats obtenues par l'application hydraulics-channel-gvf	48
IV.2.1.	Méthode de variations de profondeur (dy fixe)	48
IV.2.1.1.	Méthode a pas direct (canal prismatique).....	48
IV.2.1.1.1.	Pente positive	48
IV.2.1.1.2.	Pente negative	50

IV.2.1.2.	Méthode de Bresse.....	52
IV.2.1.2.1.	Pente positive	52
IV.2.1.2.2.	Pente négative	54
IV.2.2.	Méthode des tronçons (dx fixe).....	54
IV.2.2.1.	Méthode de Newton-Raphson.....	54
IV.2.2.1.1.	Pente positive	54
IV.2.2.1.2.	Pente negative	56
IV.2.2.2.	Méthode de Runge-Kutta	58
IV.2.2.2.1.	Pente positive	58
IV.2.2.2.2.	Pente négative	60
IV.2.2.3.	Méthode de Kutta-Merson	63
IV.2.2.3.1.	Pente positive	63
IV.2.2.3.2.	Pente négative	65
IV.2.2.4.	Méthode de Trapèzes	67
IV.2.2.4.1.	Pente positive	67
IV.2.2.4.2.	Pente négative	69
IV.3.	Résultats obtenues par HEC-RAS.....	72
IV.3.1.	Description de la méthode d’HEC-RAS dans la pente positive	72
IV.3.2.	Résultats d’HEC-RAS de la pente positive.....	78
IV.3.3.	Description de la méthode d’HEC-RAS dans la pente négative	79
IV.3.4.	Résultats d’HEC-RAS de la pente négative	80
IV.4.	Conclusion	81

Conclusion générale

Conclusion générale	82
---------------------------	----

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie.....	83
--------------------	----

Liste des figures

Figure I-1: Schéma représentatif d'un canal	3
Figure I-2: Canal naturel	4
Figure I-3: Types de canaux artificiels	4
Figure I-4: Canal rectangulaire	5
Figure I-5: Le périmètre mouillé d'un canal à section transversale rectangulaire	6
Figure I-6: La profondeur d'eau dans un canal	6
Figure I-7: La largeur superficielle d'un canal	7
Figure I-8: Présentation graphique des différentes pentes en hydraulique	8
Figure II-9: Schéma de fichiers constituant un projet sur HEC-RA	13
Figure II-10: Exemple de section en travers sur HEC-RAS	15
Figure II-11: Schéma d'un réseau de cours d'eaux	16
Figure II-12: Fenêtre principale de HEC-RAS	18
Figure II-13: Menu dans HEC-RAS	19
Figure II-14: Barre d'outils dans HEC-RAS	21
<i>Figure III- 1: Ecoulement non uniforme</i>	<i>23</i>
<i>Figure III- 2: Branche M1 (courbe remous d'exhaussement)</i>	<i>30</i>
<i>Figure III- 3: Branche M2 (courbe remous d'abaissement)</i>	<i>30</i>
<i>Figure III- 4: Branche M3 (courbe remous d'abaissement)</i>	<i>31</i>
<i>Figure III- 5: Branche S1 (Courbe remous d'exhaussement)</i>	<i>32</i>
<i>Figure III- 6: Branche S2 (courbe remous d'abaissement)</i>	<i>32</i>
<i>Figure III- 7: Branche S3 (Courbe remous d'exhaussement)</i>	<i>33</i>
<i>Figure III- 8: Branche C1 (courbe remous d'exhaussement)</i>	<i>34</i>
<i>Figure III- 9: Branche C3 (Courbe remous d'exhaussement)</i>	<i>34</i>
<i>Figure III- 10: Branche H2 (courbe remous d'abaissement)</i>	<i>35</i>
<i>Figure III- 11: Branche H3 (courbe remous d'exhaussement)</i>	<i>35</i>
<i>Figure III- 12: Branche A2 (courbe remous d'abaissement)</i>	<i>36</i>
<i>Figure III- 13: Branche A3 (courbe remous d'exhaussement)</i>	<i>37</i>
<i>Figure III- 14: Schéma d'écoulement non uniforme entre deux sections</i>	<i>39</i>
<i>Figure III- 15: Schéma de la méthode par intégration graphique</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV- 1: Interface de l'application développée (hydraulics-channel-gvf)</i>	<i>47</i>
<i>Figure IV- 2: Courbes de remous type S1 calculés par obtenues par la méthode de variations de profondeur (dy fixe) (Méthode a pas direct)</i>	<i>48</i>
<i>Figure IV- 3: Comparaison des résultats expérimentaux et ceux théorique de la pente positive par la méthode numérique de profondeur fixe (Méthode a pas direct)</i>	<i>49</i>
<i>Figure IV- 4: Courbes de remous type A2 calculés par obtenues par la méthode de variations de profondeur (dy fixe) (Méthode a pas direct)</i>	<i>50</i>
<i>Figure IV- 5: Comparaison des résultats expérimentaux et ceux théorique pente négative par la méthode numérique de profondeur fixe (Méthode a pas direct)</i>	<i>51</i>

<i>Figure IV- 6: Courbes de remous type S1 calculés par obtenues par la méthode de variations de profondeur (dy fixe) (Méthode de Bresse)</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV- 7: Comparaison des résultats expérimentaux et ceux théorique pente positive par la méthode numérique de profondeur fixe (Méthode de Bresse).....</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV- 8: Paramètres de simulation de la méthode de Newton-Raphson dans la pente positive.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure IV- 9: Paramètres de simulation de la méthode de Newton-Raphson dans la pente positive.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure IV- 10: Paramètres de simulation de la méthode de Newton-Raphson dans la pente positive.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure IV- 11: Paramètres de simulation de la méthode de Newton-Raphson dans la pente négative</i>	<i>56</i>
<i>Figure IV- 12: Courbes de remous de type A2 de la méthode de Newton-Raphson dans la pente négative</i>	<i>57</i>
<i>Figure IV- 13: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Newton-Raphson avec les résultats expérimentaux dans la pente négative.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure IV- 14: Paramètres de simulation de la méthode de Runge-Kutta dans la pente positive</i>	<i>58</i>
<i>Figure IV- 15: Courbes de remous de type S1 de la méthode de Runge-Kutta dans la pente positive.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV- 16: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Runge-Kutta avec les résultats expérimentaux dans la pente positive</i>	<i>60</i>
<i>Figure IV- 17: Paramètres de simulation de la méthode de Runge-Kutta dans la pente négative</i>	<i>60</i>
<i>Figure IV- 18: Courbes de remous de type A2 de la méthode de Runge-Kutta dans la pente négative</i>	<i>61</i>
<i>Figure IV- 19: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Runge-Kutta avec les résultats expérimentaux dans la pente négative</i>	<i>62</i>
<i>Figure IV- 20: Paramètres de simulation de la méthode de Kutta-Merson dans la pente positive</i>	<i>63</i>
<i>Figure IV- 21: Courbes de remous de type S1 de la méthode de Kutta-Merson dans la pente positive....</i>	<i>63</i>
<i>Figure IV- 22: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Kutta-Merson avec les résultats expérimentaux dans la pente positive</i>	<i>64</i>
<i>Figure IV- 23: Paramètres de simulation de la méthode de Kutta-Merson dans la pente négative.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure IV- 24: Courbes de remous de type A2 de la méthode de Kutta-Merson dans la pente négative ..</i>	<i>65</i>
<i>Figure IV- 25: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Kutta-Merson avec les résultats expérimentaux dans la pente négative</i>	<i>66</i>
<i>Figure IV- 26: Paramètres de simulation de la méthode de Trapèzes dans la pente positive.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure IV- 27: Courbes de remous de type S1 de la méthode de Trapèzes dans la pente positive</i>	<i>67</i>
<i>Figure IV- 28: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Trapèzes avec les résultats expérimentaux dans la pente positive</i>	<i>68</i>
<i>Figure IV- 29: Paramètres de simulation de la méthode de Trapèzes dans la pente négative.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure IV- 30: Courbes de remous de type A2 de la méthode de Trapèzes dans la pente négative.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure IV- 31: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Trapèzes avec les résultats expérimentaux dans la pente négative</i>	<i>71</i>
<i>Figure IV- 32: Comparaison des résultats d'HEC-RAS avec les méthodes numériques de la pente positive</i>	<i>78</i>
<i>Figure IV- 33: Comparaison des résultats d'HEC-RAS avec les méthodes numériques de la pente négative</i>	<i>80</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau III- 1: Formes de la surface libre (y_{ref} = profondeur de la référence)</i>	28
<i>Tableau IV- 1: Résultats numériques de la pente positive obtenue par la méthode de variations de profondeur (dy fixe)-Méthode à pas direct</i>	48
<i>Tableau IV- 2: Résultats numériques de la pente négative obtenue par la méthode de variations de profondeur (dy fixe) (Méthode a pas direct)</i>	50
<i>Tableau IV- 3: Résultats numériques de la pente positive obtenue par la méthode de variations de profondeur (dy fixe) (Méthode de Bresse)</i>	52
Tableau IV- 4: Résultats de simulation de la méthode de Newton-Raphson dans la pente positive	55
Tableau IV- 5: Résultats de simulation de la méthode de Newton-Raphson dans la pente négative	57
Tableau IV- 6: Résultats de simulation de la méthode de Runge-Kutta dans la pente positive	59
Tableau IV- 7: Résultats de simulation de la méthode de Runge-Kutta dans la pente négative	61
Tableau IV- 8: Résultats de simulation de la méthode de Kutta-Merson dans la pente positive	64
Tableau IV- 9: Résultats de simulation de la méthode de Kutta-Merson dans la pente négative	66
Tableau IV- 10: Résultats de simulation de la méthode de Trapèze dans la pente positive	68
Tableau IV- 11: Résultats de simulation de la méthode de Trapèze dans la pente négative	70
Tableau IV- 12: Résultats de simulations d'HEC-RAS avec les résultats de toute les autres méthodes numériques de la pente positive	78
Tableau IV- 13: Résultats de simulations d'HEC-RAS avec les résultats de toute les autres méthodes numériques de la pente négative	80

Introduction générale

Introduction générale

L'objectif de notre travail est d'étudier et calculer les courbes de remous pour les écoulements graduellement varié à surface libre dans les canaux rectangulaire dans les deux pentes positive et négative, en basant sur plusieurs méthodes numériques programmées dans une application développée par notre encadreur, les résultats sont comparés avec les résultats expérimentaux des deux pentes positive et négative. L'évaluation de ses méthodes est basée sur une comparaison avec les résultats obtenus par le logiciel de simulation HEC-RAS.

Plusieurs méthodes sont proposées pour le calcul des remous tels que les méthodes des variations de profondeur (dy fixe) et les méthodes des tronçons (dx fixe). Ces dernières visent le même objectif, cependant leur principe de calcul est différent.

Dans le premier chapitre, nous commençons par une présentation générale sur les écoulements à surface libre, les définitions des différents types d'écoulements, les différents types de canaux, puis et les différentes sections existes.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le logiciel de simulation HEC-RAS et ses fonctionnalités qui nous permettent de simuler les écoulements permanents et non permanents et calculer les courbes de remous dans un canal rectangulaire.

Le troisième chapitre est consacré à l'interprétation des courbes de remous et aux méthodes de calcul des courbes de remous pour différentes sections choisies.

Dans le dernier chapitre nous étudions et évaluons les résultats obtenus par les méthodes numériques programmées dans l'application développée dans les deux pentes positive et négative ainsi qu'une comparaison effectuée de ses résultats avec les résultats d'HEC-RAS.

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

1.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons aborder quelques définitions, que nous les avons jugé utile, pour la bonne compréhension de l'écoulement à surface libre. Avant de s'étaler sur les différents types d'écoulement à surface libre dans les canaux, nous devons mettre un aperçu sur les différents types de canaux et leurs caractéristiques géométriques et hydrauliques.

1.2. Généralité sur les écoulements à surface libre

Les équations dites "de Barré de Saint-Venant", publiées en, occupent encore aujourd'hui une place primordiale dans les études en Hydraulique fluviale ou maritime. Ces équations décrivent les écoulements à surface libre en eaux peu profondes, d'où leur appellation anglaise "Shallow Water Equations". Elles sont obtenues à partir d'une intégration verticale des équations de Reynolds en utilisant un certain nombre d'hypothèses. Les lecteurs peuvent trouver les détails de la dérivation des équations de Saint Venant dans les littératures. On peut citer, parmi elles, les travaux de Hervouet. (**ROMDHANE, 2019**)

1.3. Quelques définitions de l'écoulement

1.3.1. Définition de l'écoulement à surface libre

Un écoulement à surface libre est un écoulement dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique.

1.3.2. Définition de l'écoulement stationnaire (permanent)

L'écoulement est dit permanent si les caractéristiques d'écoulement, en tout point, sont invariantes dans le temps.).

1.3.3. Définition de l'écoulement non stationnaire (non permanent)

L'écoulement est dit non stationnaire si les caractéristiques d'écoulement, en tout point, sont en fonction du temps.

1.3.4. Définition de l'écoulement uniforme

L'écoulement uniforme implique deux conditions : la permanence et la continuité. L'écoulement est uniforme si la profondeur, la pente, la vitesse et la section droite demeurent constantes sur une longueur donnée du canal.

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

I.3.5. Définition de l'écoulement non uniforme

L'écoulement est non uniforme quand la profondeur de l'écoulement varie le long du canal ouvert. L'écoulement non uniforme peut être permanent ou non. On peut également le qualifier de tranquille, rapide ou critique.

I.3.6. Définition de l'écoulement laminaire

L'écoulement laminaire se produit généralement dans les canaux ouverts pour des valeurs du nombre de Reynolds, Re , inférieures ou égales à 2320. (Lors du calcul du nombre de Reynolds en utilisant le rayon hydraulique RH , la valeur limite de Re est de 580).

I.3.7. Définition de l'écoulement turbulent

L'écoulement turbulent se produit généralement dans les canaux ouverts pour des valeurs du nombre de Reynolds, Re , supérieures à 10000.

I.4. Les canaux

I.4.1. Définition d'un canal

On appelle canal un système de transport dans lequel l'eau s'écoule et dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique.

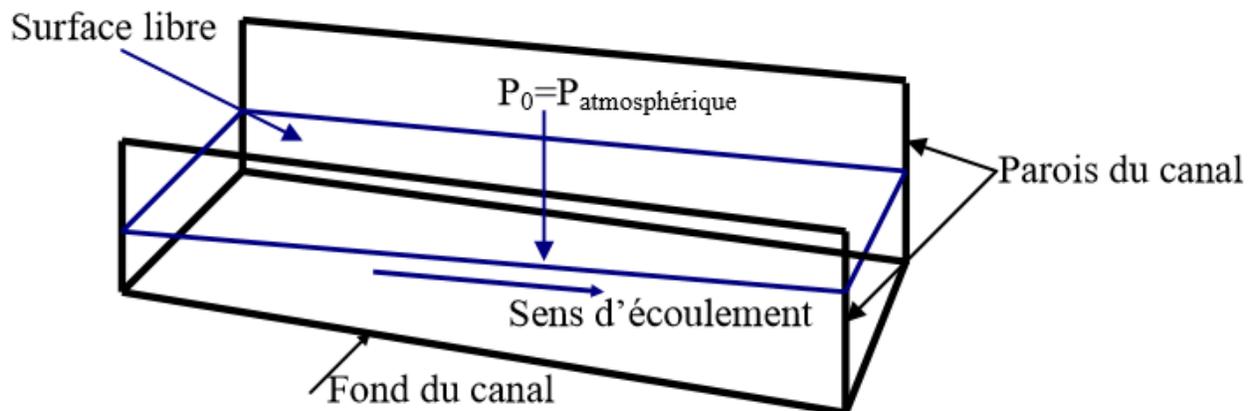


Figure I-1: Schéma représentatif d'un canal

I.4.2. Les différents types de canaux

On distingue deux catégories de canaux

- a) Les canaux naturels
- b) Les canaux artificiels

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

I.4.2.1. Les canaux naturels

On peut ajouter aux canaux naturels les cours d'eau qui existent naturellement sur ou sous la surface de la terre tels que : les ruisselets, ruisseaux, torrents, ravins, rivières, fleuves et estuaires.

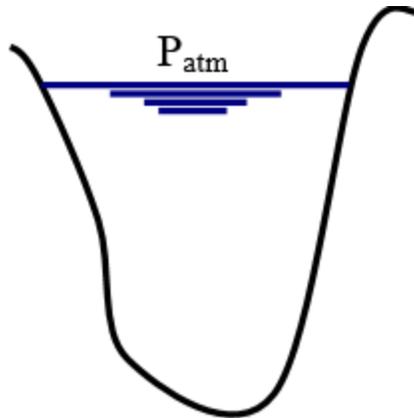


Figure I-2: Canal naturel

I.4.2.2. Les canaux artificiels

Ce sont les cours d'eau réalisés par l'homme sur ou sous la surface de la terre tels que : les canaux découverts construits au ras du sol (canaux de navigation, d'adduction, d'évacuation, d'irrigation et de drainage ou les canaux couverts dans lesquels l'eau ne remplit pas toute la section du canal tels que : tunnels hydrauliques, aqueducs, drains et égouts. (Abdelouaheb, 2016)

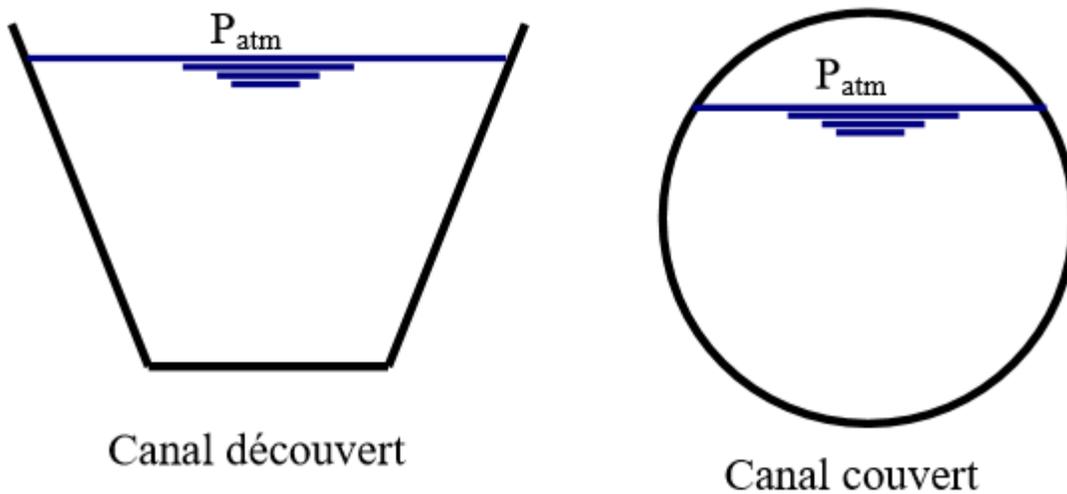


Figure I-3: Types de canaux artificiels

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

1.4.3. Définition d'un canal prismatique

Un canal prismatique est un canal dont la section transversale, la pente longitudinale et la rugosité sont constantes, alors que la hauteur pourrait être variable.

Ultérieurement, nous allons utiliser la notion d'un canal prismatique artificiel ou tout court canal prismatique. On peut mettre dans cette catégorie les canaux ouverts ceux dont les paramètres (sauf la profondeur) caractérisant la forme de la section transversale restent constants le long du canal. En général, les canaux naturels ne sont pas prismatiques.

1.4.4. Propriétés géométriques et hydrauliques des canaux

Les propriétés géométriques et hydrauliques des canaux naturels sont irrégulières et l'application des théories hydrauliques donne des résultats approximatifs. Par ailleurs, les propriétés hydrauliques des canaux artificiels sont généralement assez régulières. L'application des théories hydrauliques sur ces derniers donne souvent des résultats réalistes.

1.4.5. La section

Les éléments géométriques d'une section liquide en hydraulique à surface libre sont les suivants

1.4.7.1. La section mouillée (ω)

c'est une section plane, normale à la direction de l'écoulement, dans le système international (S.I) son unité est le mètre carré (m²).

Exemple : Prenons le cas le plus simple des canaux artificiels, le canal à section transversale rectangulaire.

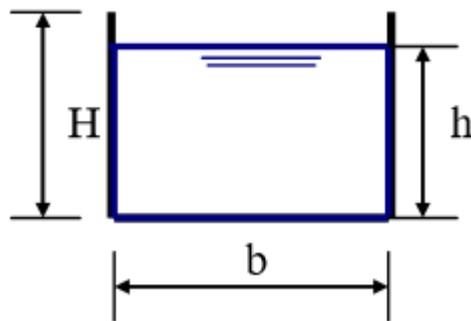


Figure I-4: Canal rectangulaire

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

Pour le canal rectangulaire représenté sur la figure 4, la section géométrique $S=b.H$ alors que la section mouillée $\omega=b.h$

1.4.7.2. Le périmètre mouillé (χ)

c'est la partie du canal en contact avec l'eau, il a comme unité le mètre (m). Exemple : Prenons l'exemple précédent.

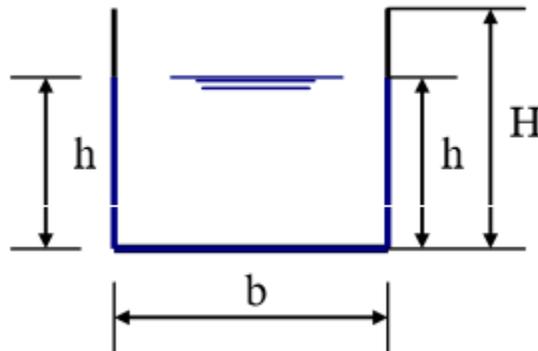


Figure I-5: Le périmètre mouillé d'un canal à section transversale rectangulaire

Le périmètre géométrique $P=b+2.H$ alors que le périmètre mouillé $\chi=b+h+h$ soit $\chi=b+2.h$ c) Le rayon hydraulique (RH) : c'est le rapport entre la section mouillée et le périmètre mouillé $RH=\omega/\chi$

1.4.7.3. La profondeur d'eau (h)

c'est la profondeur du point le plus bas de la section transversale.

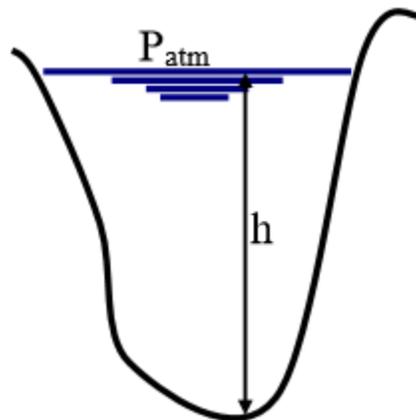


Figure I-6: La profondeur d'eau dans un canal

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

1.4.7.4. La largeur superficielle de la surface libre (B)
c'est la distance qui sépare la rive droite de la rive gauche normalement à la direction de l'écoulement.

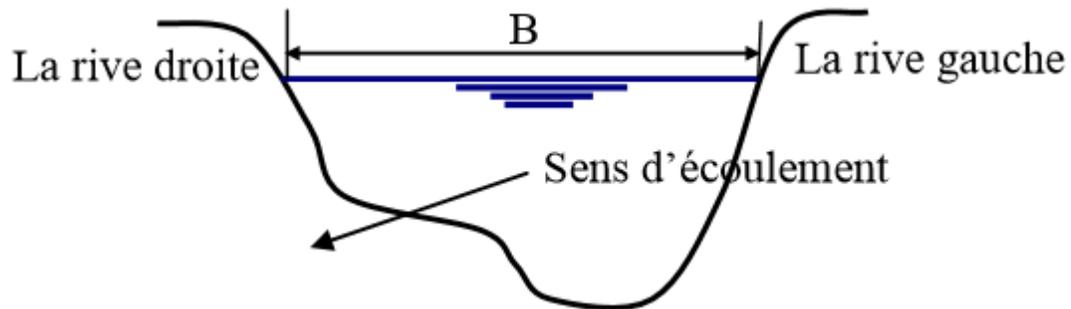


Figure I-7: La largeur superficielle d'un canal

1.4.7.5. La profondeur moyenne (h_m)
Elle est définie comme étant le rapport entre la section mouillée (ω) et la largeur au miroir (largeur superficielle de la surface libre « B »)

1.4.7.6. Les pentes
On distingue trois (3) types de pentes :

Pente géométrique (pente longitudinale du radier « I_r ») ;

Pente piézométrique (IP) ;

Pente hydraulique ou gradient hydraulique (I). (Abdelouaheb, 2016)

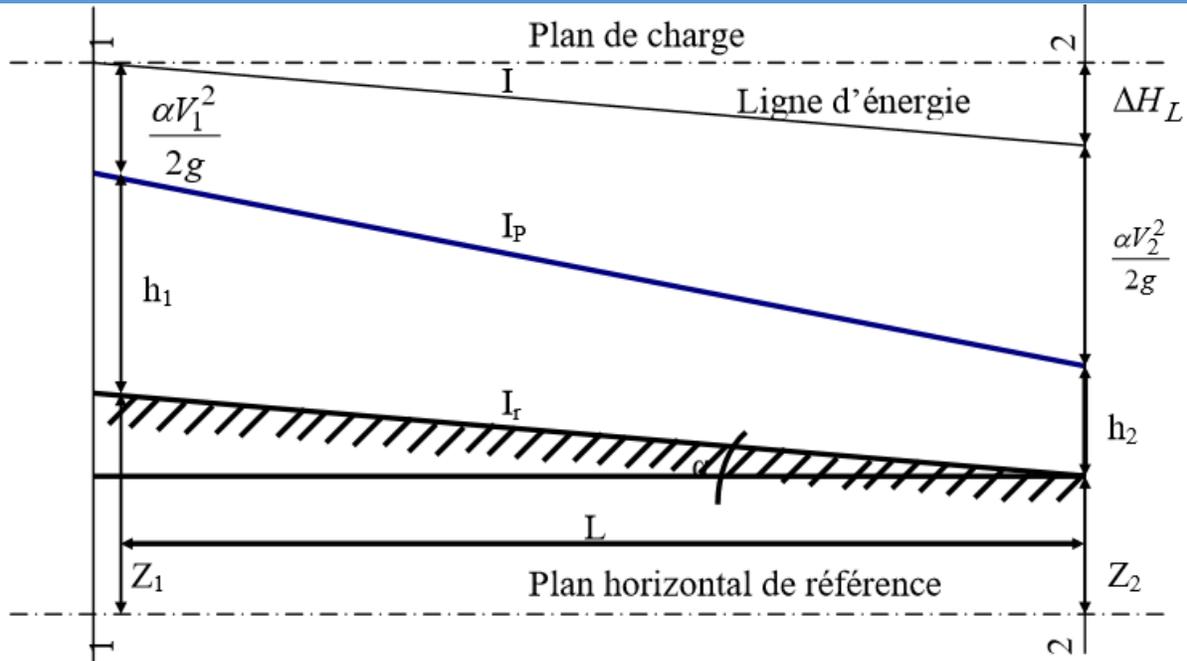


Figure I-8: Présentation graphique des différentes pentes en hydraulique

1.4.6. La surface libre et la turbulence

L'écoulement à surface libre fait partie de l'écoulement gaz-liquide ou liquide-liquide. La modélisation de ce type d'écoulement nécessite un découpage du domaine global de calcul en deux sous domaines non miscibles séparés par une interface bien définie qui présente la surface libre. Le premier est constitué d'un volume d'eau et le deuxième, situé dans la partie supérieure du domaine d'étude, est rempli d'air. La turbulence se développe dans la plupart des écoulements qui conditionnent notre environnement immédiat (canaux naturels, rivières, océans, atmosphère). La turbulence est caractérisée par un nombre adimensionnel, le nombre de Reynolds, qui correspond au rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses :

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu}$$

Où : ρ est la masse volumique

μ est la viscosité dynamique moléculaire

U et D sont la vitesse et distance caractéristiques de l'écoulement

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

Dans un écoulement, la transition entre un régime laminaire et un régime turbulent s'effectue généralement pour un nombre de Reynolds supérieur à 2300. Un écoulement est considéré pleinement turbulent lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 5000. Les écoulements turbulents sont essentiellement tridimensionnels et rotationnels. Ils sont le siège de très intenses fluctuations de la vitesse.

1.4.7. Classification des écoulements

Un écoulement qui ne varie pas dans le temps est un écoulement permanent autrement, il est non permanent. A l'échelle de quelques heures, un écoulement en rivière peut être considéré comme permanent, par contre l'écoulement dans un estuaire est continuellement en changement sous l'effet des marées.

Dans le cas d'un régime d'écoulement le long d'un bief où les caractéristiques d'écoulement sont constantes ($\partial h / \partial x = 0$) dans les diverses sections du canal, on parle de régime uniforme.

En régime uniforme, la hauteur normale est atteinte quand la ligne d'eau est parallèle au fond, la charge est alors elle-même parallèle à la ligne d'eau et donc la perte de charge est égale à la pente du fond : $I_f = J$. Dans ce cas, on obtient la formule suivante, à partir de laquelle, on peut calculer analytiquement le débit Q , la pente I_f et le Strickler K_s :

Formule de Manning Strickler :

$$V = K_s R_h^{\frac{2}{3}} I_f^{\frac{1}{2}}$$

Un écoulement permanent, le long d'une rivière, est une succession d'écoulements uniformes. Dans le cas contraire, les paramètres caractérisant l'écoulement varient le long du canal. Un écoulement non uniforme peut être soit permanent soit instationnaire. Un débit non uniforme peut être classé suivant la rapidité des variations :

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

I.4.8.1. Variations rapides

La profondeur change brusquement sur une distance relativement courte. Un écoulement variant rapidement est un phénomène local. Par exemple en présence d'un ressaut hydraulique ou d'une chute d'eau.

I.4.8.2. Variations graduelles

Les paramètres hydrauliques varient graduellement sur une longue distance.

De plus, en fonction du rapport de la vitesse du fluide sur la célérité d'une onde de surface (nombre de Froude, Fr), on peut donner une autre classification pour l'écoulement.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D \cdot h}}$$

Par définition, un écoulement dont le nombre de Froude est inférieur à 1 est dit fluvial, sinon il est dit torrentiel. Lors d'un écoulement en régime fluvial, c'est l'aval qui pilote l'écoulement, lors d'un écoulement en régime torrentiel, c'est l'amont seul qui influence l'écoulement. Au nombre de Froude critique égal 1 correspond un tirant d'eau particulier h_c appelé hauteur d'eau critique. **(ROMDHANE, 2019)**

I.4.8. Présentation rapide des différents régimes d'écoulement

I.4.8.1. Régime permanent

En régime permanent, le chenal véhicule un débit Q constant dans le temps. Le tirant d'eau y en un point donné est donc aussi constant. En pratique, on peut calculer en régime permanent des canaux d'irrigation, des écoulements en rivière à l'étiage ou en régime moyen. Mais le calcul d'un écoulement en crue rapide ne peut pas être abordé par le régime permanent. Le régime permanent peut être uniforme ou varié selon la géométrie du chenal.

I.4.8.2. Écoulement permanent uniforme

Les caractéristiques géométriques du chenal sont constantes tout au long du tronçon considéré : section mouillée S , pente i ainsi que la rugosité des parois. Le tirant d'eau est constant tout au long du tronçon (appelé tirant d'eau normal). Dans le cas contraire l'écoulement est dit varié.

Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

1.4.8.3. Écoulement permanent varié

L'écoulement est varié lorsque la géométrie ou la rugosité ne sont pas constantes. Mais il l'est aussi dans un tronçon dont la géométrie et la rugosité sont constantes si le tirant d'eau n'est pas constant. Nous distinguerons les écoulements graduellement ou rapidement variés.

1.4.8.4. Régime transitoire

En régime transitoire, le débit varie en fonction du temps, et il en va donc de même du tirant d'eau en chaque point du cours d'eau. Le calcul du laminage d'une crue par un barrage est typiquement un problème de calcul transitoire ; de même le calcul d'un écoulement de rivière en crue. (DEGOUTTE)

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

II.1. Introduction

HEC-RAS est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Center du U.S Army Corps of Engineers. Il s'agit d'une nouvelle version d'un modèle hydraulique auparavant nommé HEC-2, qui comporte maintenant une interface graphique permettant d'éditer, de modifier et de visualiser les données d'entrée, de même qu'observer les résultats obtenus. Il est présentement utilisé dans plusieurs firmes d'ingénierie et organismes gouvernementaux. La version 3.1.3 de HEC-RAS permet de simuler les écoulements permanents et non permanents, le transport de sédiments et certaines fonctions facilitant la conception d'ouvrages hydrauliques. Toutefois, avant d'utiliser un logiciel de calcul des écoulements à surface libre, il est primordial de connaître certaines notions théoriques, sinon le logiciel deviendra une boîte noire (**HEC-RAS, Guide de laboratoire, Mars 2005**).

II.2. 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. (**L'hachimi, 2016**)

II.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. (L'hachimi, 2016)

II.3.1. Les fichiers constituant un projet HEC-RAS

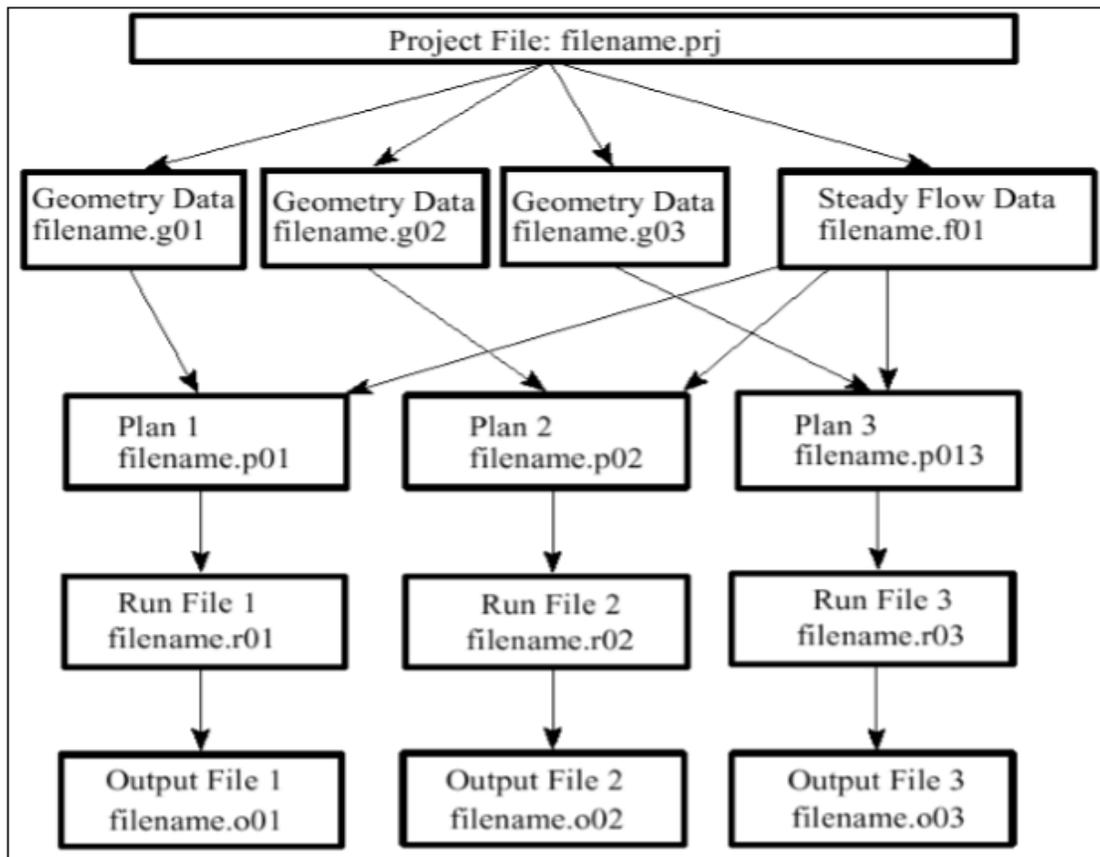


Figure II-9: Schéma de fichiers constituant un projet sur HEC-RA

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

II.3.1.1. 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.

II.3.1.2. 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.

II.3.1.3. 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.

II.3.1.4. 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.

II.3.1.5. 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

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

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.

II.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)

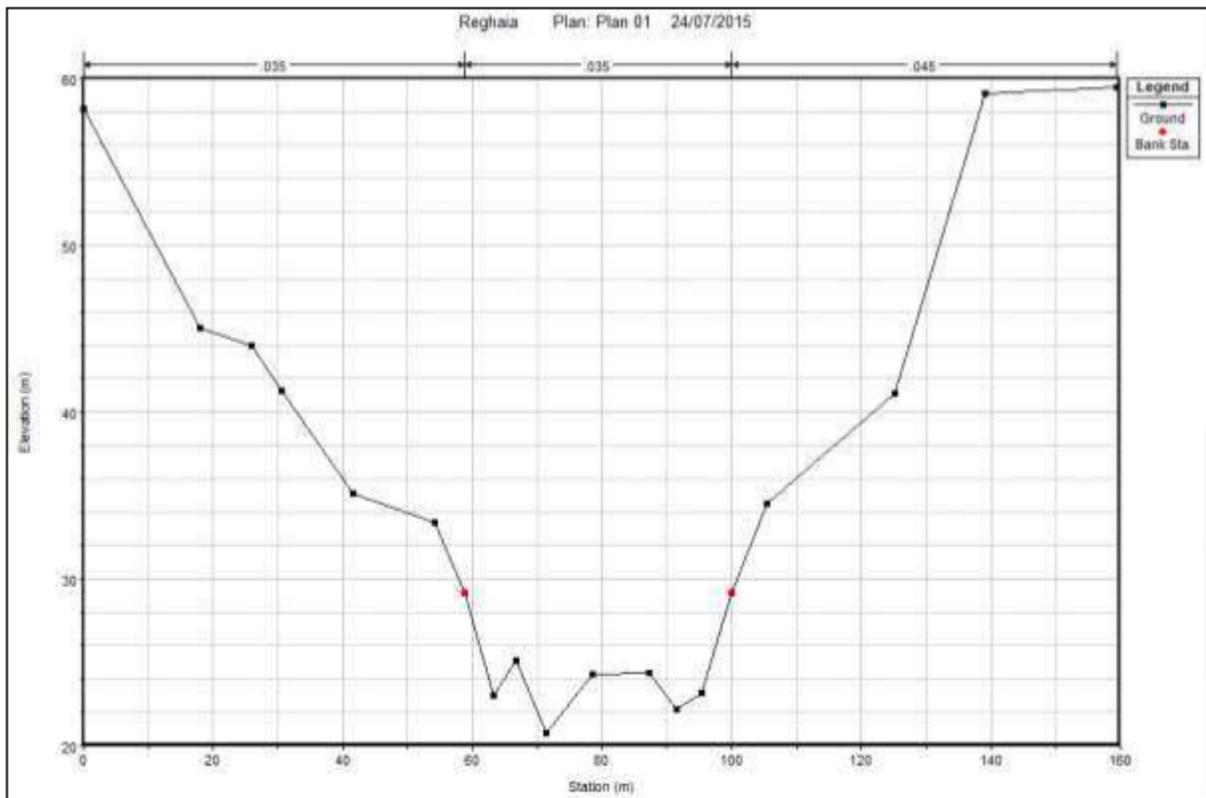


Figure II-10: Exemple de section en travers sur HEC-RAS

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

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

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.

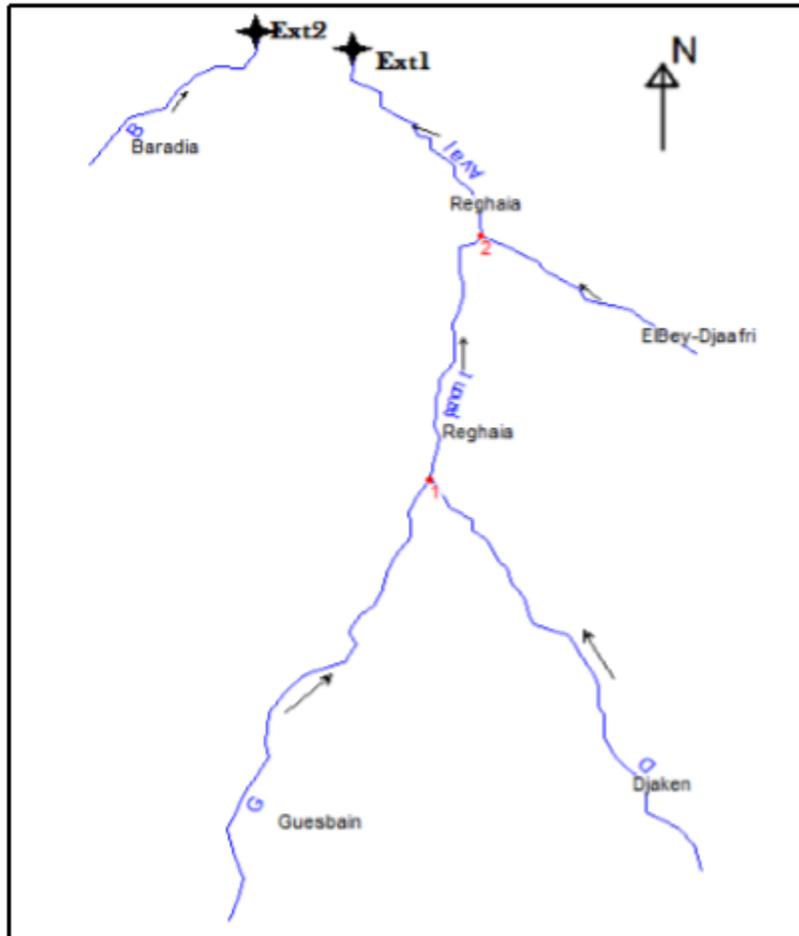


Figure II-11: Schéma d'un réseau de cours d'eau

II.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 profils 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, January 2010)**

II.3.3.1. Hauteur d'eau connue

Pour chaque profil d'écoulement la hauteur est connue.

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

II.3.3.2. La hauteur critique

Le programme calcule lui-même la hauteur critique et l'utilise comme condition aux limites.

II.3.3.3. 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.

II.3.3.4. Courbe de tarage

le logiciel nous demande d'introduire la courbe débit-hauteur.

II.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...

II.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 :

II.4.1. AutoCAD, RiverCAD

Fonctions d'import des fichiers de modèle numérique de terrain (MNT) depuis AutoCAD et AutoCAD civil 3D.

II.4.2. HEC-GeoRAS

Module d'import/export de données compatible avec le logiciel SIG ArcGIS.

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

II.5. Fonctionnement de HEC-RAS

II.5.1. Démarrage de HEC-RAS

Pour démarrer HEC-RAS, double-cliquez sur l'icône suivant placé sur le Bureau, ou bien allez dans le menu Démarrer et choisissez le programme HEC-RAS. Fait important à noter, HEC-RAS utilise comme symbole décimal le point, et non la virgule utilisée habituellement dans notre système d'unité. Un message d'erreur peut apparaître lors du démarrage de HEC-RAS si le symbole décimal spécifié pour votre ordinateur n'est pas le point. Vous pouvez changer ce symbole dans le Panneau de configuration de Windows, à l'item Paramètres régionaux, à l'onglet Nombre (**HEC-RAS, Guide de laboratoire, Mars 2005**).

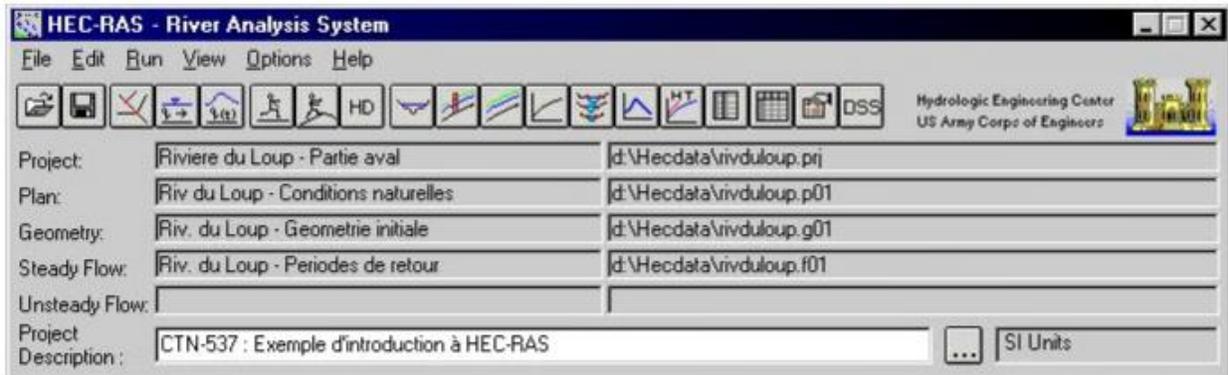


Figure II-12: Fenêtre principale de HEC-RAS

La barre de menu comprend toutes les fonctions disponibles de HEC-RAS et la figure de la page suivante présente son contenu. Le menu File permet d'ouvrir, de créer et de sauvegarder un Projet (fichiers avec l'extension .prj). Les autres options permettent de modifier le titre du Projet ou d'effacer tous les fichiers reliés à un projet. Utilisez cette dernière option avec précaution. Outre le menu File, le menu Edit est également important et permet de spécifier les données de base décrivant le système hydrographique devant être modélisé ainsi que les conditions de débit dans ce système (**HEC-RAS, Guide de laboratoire, Mars 2005**).

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

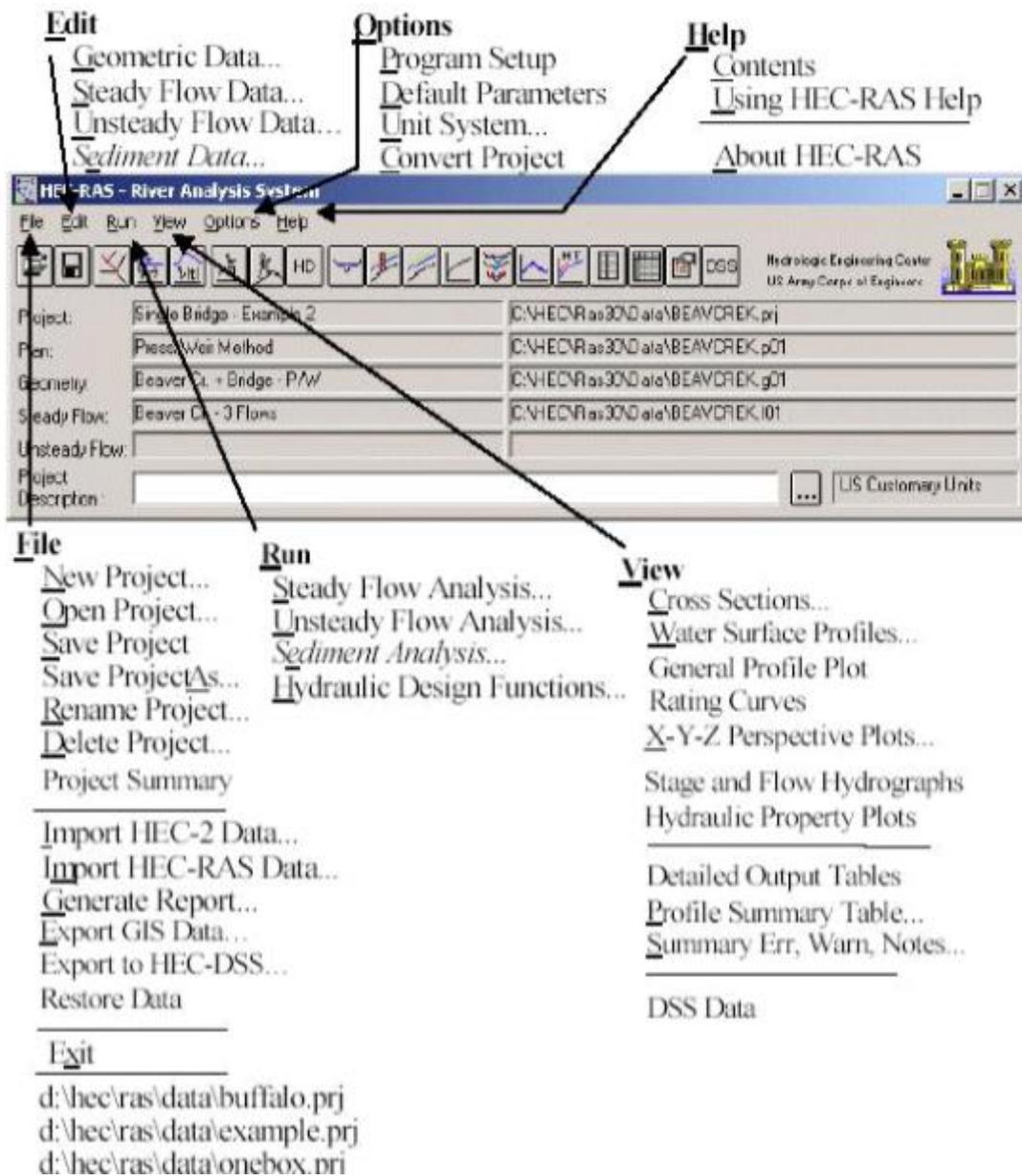


Figure II-13: Menu dans HEC-RAS

II.5.2. Barre de menu HEC-RAS

La principale étape de la création d'un projet de modélisation avec HEC-RAS est de définir la géométrie de notre cours d'eau, au moyen de sections transversales. Cette étape est réalisée en choisissant l'option Geometric Data. Toutes les données liées à la géométrie du cours d'eau sont

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

sauvegardées dans les fichiers dont l'extension est .G** où ** désigne des chiffres représentant une numérotation séquentielle (**HEC-RAS, Guide de laboratoire, Mars 2005**).

Une autre option disponible dans le menu Edit pour l'étude des écoulements permanents dans le cours d'eau est Steady Flow Data. Cette option permet de spécifier la ou les valeurs de débits dans le cours d'eau qui devront être modélisés, ainsi que les conditions aux limites de l'écoulement. Un Profile désigne l'ensemble des niveaux d'eau calculés pour des conditions particulières de débit. Les informations qui sont spécifiées avec cette option sont contenues dans les fichiers .F**. L'option Unsteady Flow Data désigne l'écoulement non permanent et y contenu dans les fichiers .U**

L'autre élément important de la fenêtre principale pour la création d'un projet et la réalisation de simulations est le menu Run. Trois options y sont disponibles :Steady Flow Analysis, Unsteady Flow Analysis et Hydraulic Design.

Les deux premières options permettent de définir le Plan, qui contient la référence au régime d'écoulement modélisé, à la géométrie du cours d'eau et aux débits simulés (écoulement permanent et non permanent). Après avoir réalisé une simulation, vous pouvez consulter le menu View. Il permet de consulter les différents résultats obtenus, soit graphiquement avec les fonctions de la partie supérieure du menu, ou bien de façon tabulaire avec les autres .

Même s'il n'y a pas de résultats calculés, les fonctions graphiques peuvent être utilisées pour visualiser de façon schématique les données entrées et ainsi percevoir certaines incohérences, s'il y a lieu. Le menu Options contient certains paramètres de fonctionnement de HEC-RAS. Dans Program Setup, allez à Set Time for Automatic Backup.Cette option permet de spécifier l'intervalle de temps qui sera utilisé pour la sauvegarde automatique des données de votre projet. Dans le même menu, vérifiez que Automatically Backup Data est coché.

Ainsi, par mesure de sécurité, toutes vos données seront sauvegardées dans le fichier RasBackup.prj, situé dans le répertoire d'installation de HEC-RAS. La fonction Default Parameters permet de spécifier les coefficients d'expansion et de rétrécissement utilisés par défaut pour chaque nouvelle section transversale. Unit System permet de spécifier quel système d'unité est utilisé pour

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

le projet en cours (actuellement US customary) et permet aussi de changer le système d'unité utilisé par défaut pour chaque nouveau projet (HEC-RAS, Guide de laboratoire, Mars 2005).

Finalement, la dernière fonction, Convert Project Units, permet de convertir un projet d'un système d'unité à un autre. Le dernier item de la barre de menu, Help, peut être consulté pour obtenir de l'aide sur différents sujets d'intérêt

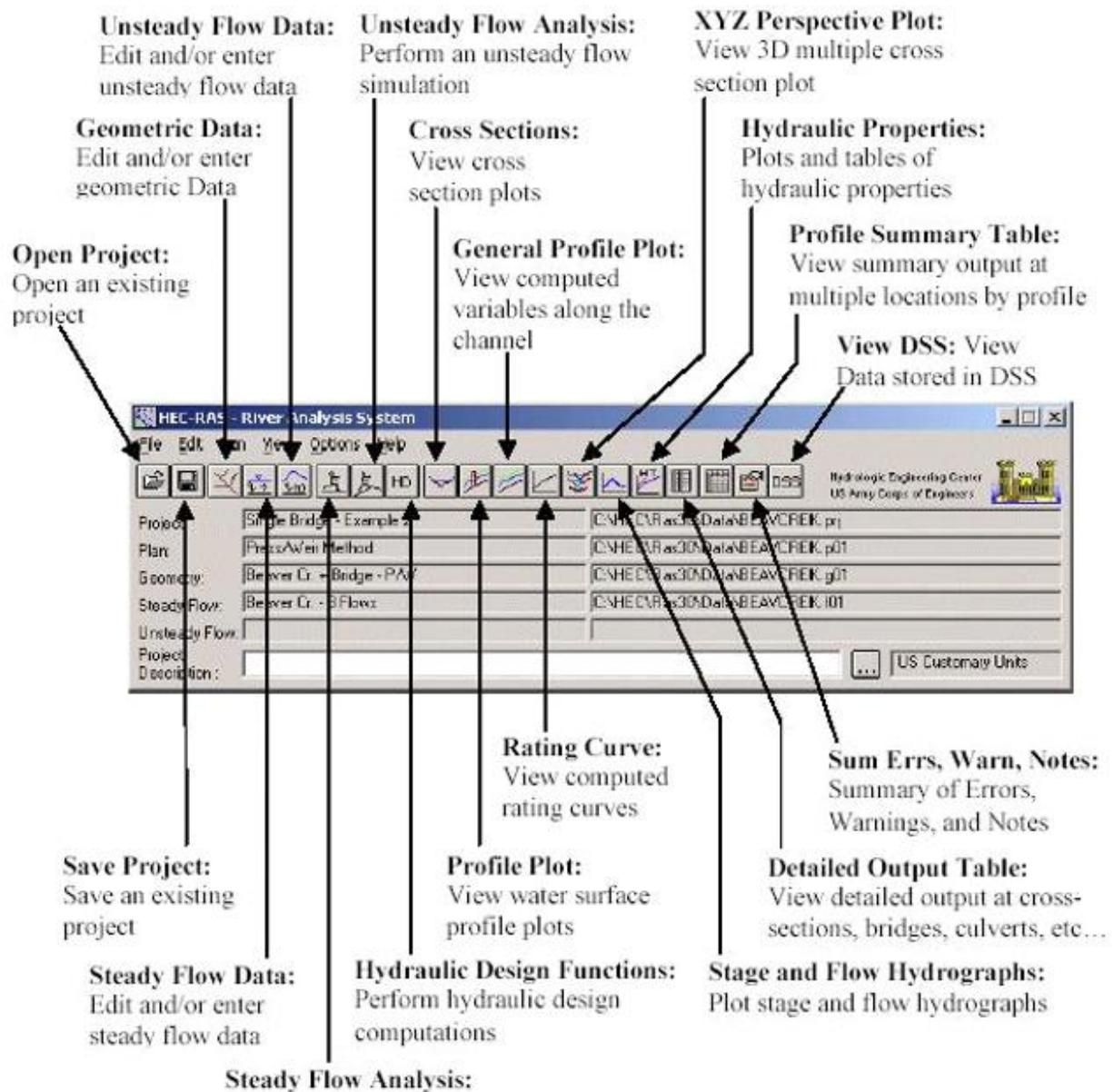


Figure II-14: Barre d'outils dans HEC-RAS

Chapitre II : Présentation du logiciel de simulation de l'écoulement HEC-RAS

II.5.3. Barre de bouton HEC-RAS

Finalemment, la barre de bouton constitue un accès aux fonctions utilisées le plus couramment dans HEC-RAS. La figure ci-dessus présente leur description. En plaçant le curseur de la souris au-dessus d'un bouton, la description est affichée dans la barre de titre de la fenêtre ainsi que dans un élément textuel. L'icône utilisé est aussi représentatif de cette fonction. Elles ont pour la plupart été abordées précédemment. Fait à noter, les éléments de la barre de boutons sont placés dans un ordre logique de réalisation d'un Projet avec HEC-RAS, mais ce ne sont pas toutes ces fonctions qui doivent nécessairement être utilisées dans un projet (**HEC-RAS, Guide de laboratoire, Mars 2005**).

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

Lorsque la surface libre de l'eau et le fond du canal ne sont pas parallèles, l'écoulement est dit variant. Quand la vitesse croît et, en corollaire, la profondeur diminue dans le sens de l'écoulement, ce dernier est accélérer. Dans le cas contraire, l'écoulement est retardé.

Quand la profondeur varie progressivement d'une section à l'autre, comme dans le bief de transition entre une rivière et un barrage, l'écoulement est dit variant graduellement. (BENNIS, 2004)

III.3.2. Equation simplifiée de Saint Venant

Dans un écoulement graduellement varié, l'application des équations de Saint Venant permet de calculer les hauteurs d'eau et les vitesses moyennes le long de la direction d'écoulement en fonction du temps. Ces équations sont l'ensemble d'équation de continuité et l'équation dynamique de mouvement après des simplifications, et les solutions en sont souvent extrêmement compliquées. Dans certains cas physiquement simples mais réalistes, explicites sont possible.

Dans le cas général l'équation dynamique pour un écoulement non permanent et non uniforme dans un canal découvert se donne comme suit : (DEGOUTTE G.)

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - J_f = -J_e \quad (\text{III-1})$$

Cette équation peut aussi être obtenue en utilisant le théorème de quantité de mouvement, on obtiendra pratiquement le même résultat.

Avec :

$$J_f = -\frac{\partial z}{\partial x}$$

comme pente de fond.

$$h_r = J_e \partial x$$

Comme perte de charge et J_e comme pente énergétique donnent par une relation établie pour écoulement uniforme permanent et strictement valable de type Weisbach- Darcy ou Chézy, et aussi pour les écoulements non permanents ou non uniformes.

L'étude d'un écoulement permanent et non uniforme rend l'équation (III-1) se forme:

$$\frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - J_f = -J_e \quad (\text{III-2})$$

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

Dans l'équation (III-2) les différents termes peuvent être considérés comme présentation des pentes définies successivement par ordre, dans le premier la pente est due à la variation de la vitesse en espace, le deuxième et la troisième donnent la pente de la surface libre J_f et le quatrième est la pente énergétique J_e .

Peut aussi s'écrire ainsi :

$$\frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{s} \right) + S \frac{\partial h}{\partial x} + S \frac{\partial z}{\partial x} = -S J_e \quad (\text{III-3})$$

D'autre part l'étude des écoulements graduellement variés pose un problème de déterminer position x , et la forme $h(x)$ de la surface libre pour un débit Q et une forme géométrique de section S donnée.

Faite à partir de l'équation de l'énergie et l'équation de continuité. La dérivation de l'équation d'énergie par rapport à x et lorsque on utilise une relation de type Chézy en fonction de x et de h donné.

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{Q/S}{2g} \right)^2 + \frac{dh}{dx} - J_f = -J_e = -\frac{(Q/S)^2}{C^2 R_h} \quad (\text{III-4})$$

Dans ce chapitre nous nous intéressons à des écoulements graduellement dont les courbes de remous résultent de ce type d'écoulement.

$$S = f(h(x), x) \text{ et } \frac{dS}{dx} = B$$

dont la pente où la géométrie de section variante dans la direction longitudinale du canal. Par cette définition on exprime le premier terme de l'équation (III-4) par :

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{2 S^2 g} \right) = \frac{Q^2}{2g} \left(-\frac{2}{S^3} \frac{dS}{dx} \right) = -\frac{Q^2}{g S^3} \left(\frac{dS}{dh} \frac{dh}{dx} + \frac{dS}{dx} \Big|_{h=cte} \right) \quad (\text{III-5})$$

Cette équation constitue une équation différentielle du premier ordre s'écrit par conséquent :

$$-\frac{(Q/S)^2}{g s} \left(\frac{dS}{dh} \frac{dh}{dx} + \frac{dS}{dx} \right) + \frac{dh}{dx} - J_f = -\frac{(Q/S)^2}{C^2 R_h} \quad (\text{III-6})$$

Elle permet de déterminer la profondeur d'eau $h(x)$ en fonction de la distance, par un débit Q donné.

Après des simplifications une équation différentielle de l'écoulement graduellement varié résulte de forme :

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

$$\frac{dh}{dx} = J_f \frac{1 - \frac{(Q/S)^2}{C^2 R_h J_f} + \frac{(Q/S)^2}{gS J_f} \frac{ds}{dx}}{1 - \frac{(Q/S)^2}{Sg} B} \quad (III-7)$$

Où le terme

$$\frac{(Q/S)^2}{gS J_f} \frac{ds}{dx}$$

exprime le changement de section (largeur au miroir). Cette équation permet de définir l'inclinaison (pente) par rapport au fond du canal et non pas la pente de la ligne d'eau, et la profondeur h , pas la cote. Prend la valeur positive si la profondeur d'eau h , croît et négative dans le cas contraire.

A noter que l'équation (III-4), tout comme l'équation (III-3), est l'équation simplifiée de Saint Venant ; elle est valable pour les canaux prismatiques et non prismatiques.

Si le canal est prismatique l'équation (III-7) devient:

$$\frac{dh}{dx} = J_f \frac{1 - \frac{(Q/S)^2}{C^2 R_h J_f}}{1 - \frac{(Q/S)^2}{Sg} B} \quad (III-7a)$$

On remarque que l'argument dh/dx devient la valeur de pente critique quand :

$$C^2 R_h J_f = \frac{gS}{B} \quad (III-8)$$

C'est-à-dire la profondeur normale et la profondeur critique sont égales ceci donne la définition de la pente critique

$$J_f \equiv J_c = \frac{gS}{C^2 R_h B} \quad (III-9)$$

Cette pente en fonction de la profondeur d'eau h qui définit une pente de manière que cette profondeur soit à la fois profondeur normale h_n et profondeur critique h_c quel que soit le débit. Et joue un rôle important comme paramètre de référence dans l'étude de l'écoulement graduellement varié.

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

III.3. Forme de la surface d'eau

Dans les écoulements graduellement variés les différentes courbes intégrales obtenue par l'équation (III-7) en fonction de la pente du fond J_f qui définit leurs classification pour un débit Q donné.

Ces courbes ne cherchent pas à donner une solution explicite mais on s'intéresse à donner les formes semi quantitatives de la variation de la profondeur, h , avec la distance x par des conditions au limite permet de tracer la surface d'eau pour les différents cas possibles. Cette classification de la ligne d'eau désignant cinq cas suivantes :

	$J_f < J_c$	Canaux à pente faible	: M
$J_f > 0$	$J_f > J_c$	Canaux à pente forte	: S
	$J_f = J_c$	Canaux à pente critique	: C
$J_f = 0$		Canaux a pente zéro	: H
$J_f < 0$		Canaux a contre pente	: A

Chaque courbe comporte différentes branches qui donnent leur ensemble ne représentant pas une ligne réelle de la surface d'eau, mais plutôt un ensemble de divers cas possibles. Une surface d'eau réelle est alors représentée par une seule branche. Si la surface d'eau est composée de plusieurs branches, ces dernières appartiendront à des classes distinctes. (VAZQUEZ)

III.3.1. Courbe de remous

Dans les canaux à ciel ouvert, L'écoulement est uniforme si seulement la hauteur, la vitesse et la section mouillée ne varient pas d'une section à l'autre. Par contre, si ces paramètres varient on aura un écoulement graduellement varié. On voit ce type d'écoulement près d'un déversoir, changement de la pente ou bien présence d'une vanne. La courbe de la ligne d'eau s'appelle la courbe de remous qui est définis par la différence entre la hauteur d'eau et la hauteur normale d'un écoulement uniforme du débit considéré. Les classes de la courbe de remous arrangé selon la pente du canal. Chaque classe est occupée par 3 régions de ligne d'eau. Les limites des régions sont

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

connues par le niveau normal et le niveau critique noté de haut vers le bas en ordre croissant. Ils sont représenté dans le tableau suivant : (BENNIS, 2004)

	Profils de la zone 1 $y_{ref} > y_n; y_{ref} > y_c$	Profils de la zone 2 $y_n \geq y_{ref} \geq y_c; y_c \geq y_{ref} \geq y_n$	Profils de la zone 3 $y_n > y_{ref}; y_c > y_{ref}$
Fond horizontal $y_n > y_c$			
Pente douce $y_n > y_c$			
Pente critique $y_n = y_c$			
Pente forte $y_n < y_c$			
Pente adverse			

Tableau III- 1: Formes de la surface libre (y_{ref} = profondeur de la référence)

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

III.3.2. Canaux à pente faible

Dans le cas où la pente du canal est positive $J_f > 0$ et inférieure à la pente critique J_c par conséquent la hauteur normale h_n supérieure à la hauteur critique h_c c'est-à-dire pente faible, dans ce cas les formes de la surface libre dans un canal descendant comprend trois branches ou courbes M_1 , M_2 et M_3

III.3.3.1. Courbe M_1

La hauteur normale, h_n , plus grande que la hauteur critique, h_c , et plus petite que la hauteur d'écoulement h , ($h > h_n > h_c$), on a donc un rapport dh/dx positif et un écoulement de type fluvial. La courbe vient en amont elle tend vers la pente de la profondeur normale, et en aval croissant tend vers une tangente horizontale et le canal progresse de l'aval vers l'amont. On rencontre cette branche par exemple:

- L'entrée d'un écoulement permanent uniforme dans un réservoir.
- En amont d'un barrage.
- Dans certains changements brusque de pente.

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

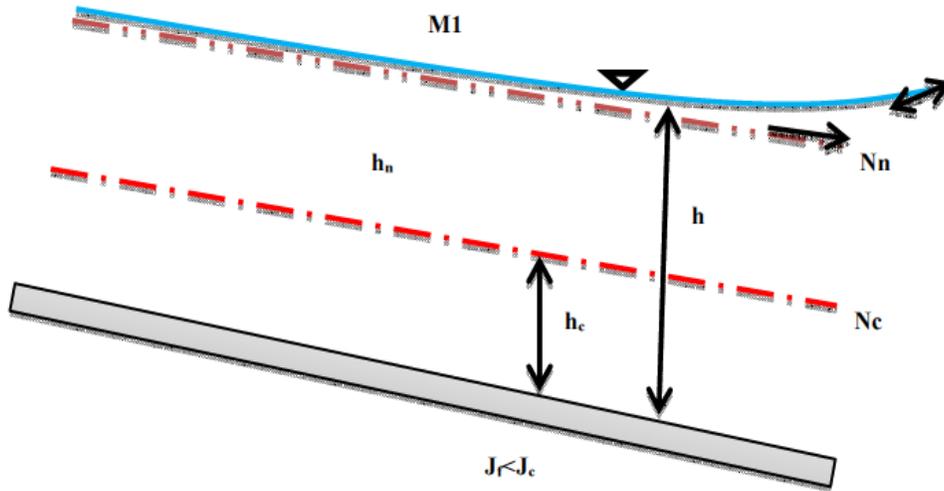


Figure III- 2: Branche M1 (courbe remous d'exhaussement).

III.3.3.2. Courbe M₂

Ce type de courbe correspond à un écoulement fluvial et un rapport de dh/dx négatif, la hauteur d'écoulement est comprise entre la hauteur critique, h_c et la hauteur normale, h_n , ($h_n > h > h_c$), tend vers la pente de profondeur normale en amont, et une chute brusquement vers la hauteur critique (décroissant perpendiculairement) pour tendre vers l'aval. Le calcul est le même de la courbe M1, elle représente le passage d'un écoulement permanent uniforme vers une section critique comme une chute ou encore une augmentation forte de la pente d'écoulement.

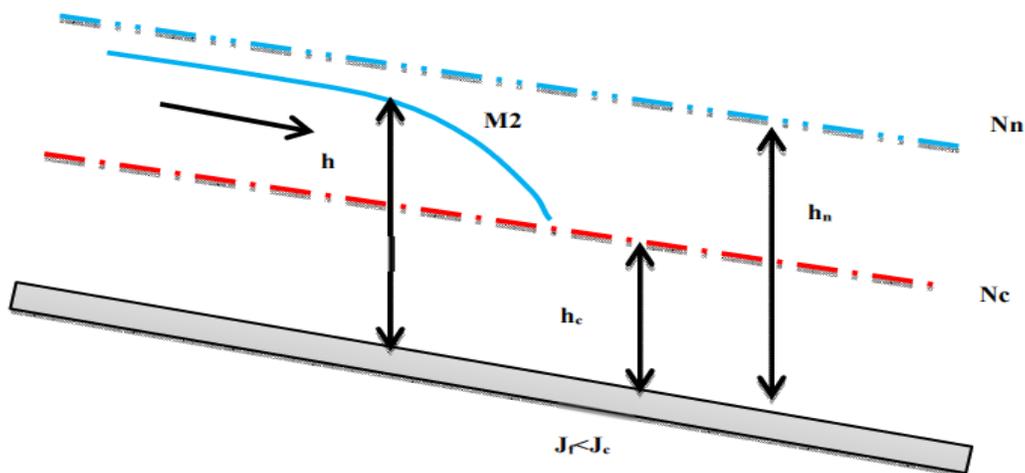


Figure III- 3: Branche M2 (courbe remous d'abaissement).

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

III.3.3.3. Courbe M₃

Cette branche désignant une hauteur critique, h_c , supérieure à la hauteur d'écoulement, h , et inférieure à la hauteur normale h_n , ($h_n > h_c > h$), ou l'écoulement est torrentielle et le Rapport dh/dx , est positif, souvent prolongé par un ressaut hydraulique. La courbe vient de l'amont en augmentation, pour tendre en aval vers la profondeur critique, h_c , se rencontre dans un écoulement à grande vitesse à pente faible ou dans certains changements de pente.

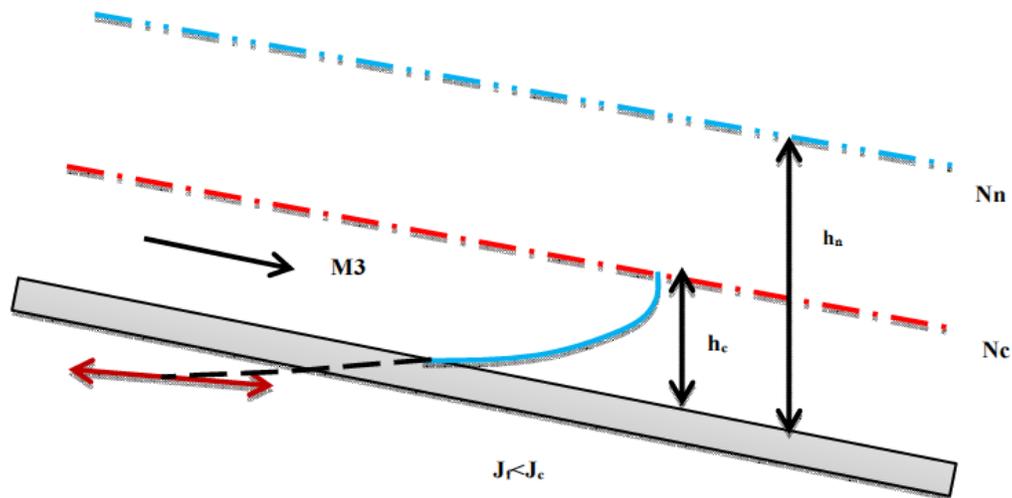


Figure III- 4: Branche M3 (courbe remous d'abaissement).

III.3.3. Canaux à pente forte

Les écoulements dans les canaux descendant à pente forte comprend trois branches ou des formes de la surface d'eau différents. Si la pente de fond J_f , positive et supérieur à la pente critique, J_c et la hauteur normal, h_n , inférieur à la hauteur critique h_c , on a donc un écoulement de type torrentiel.

III.3.3.1. Courbe S₁

Si le type d'écoulement torrentielle et le rapport, dh/dx , est positif, la hauteur d'écoulement h est plus grand que la hauteur normale, h_n , en amont elle coupe perpendiculairement la ligne de la hauteur critique, h_c , c'est le cas de ressaut hydraulique, en aval elle tend vers

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

l'horizontale. Elle rencontre en amont (au remous) d'un barrage, ou dans certains changements de pente.

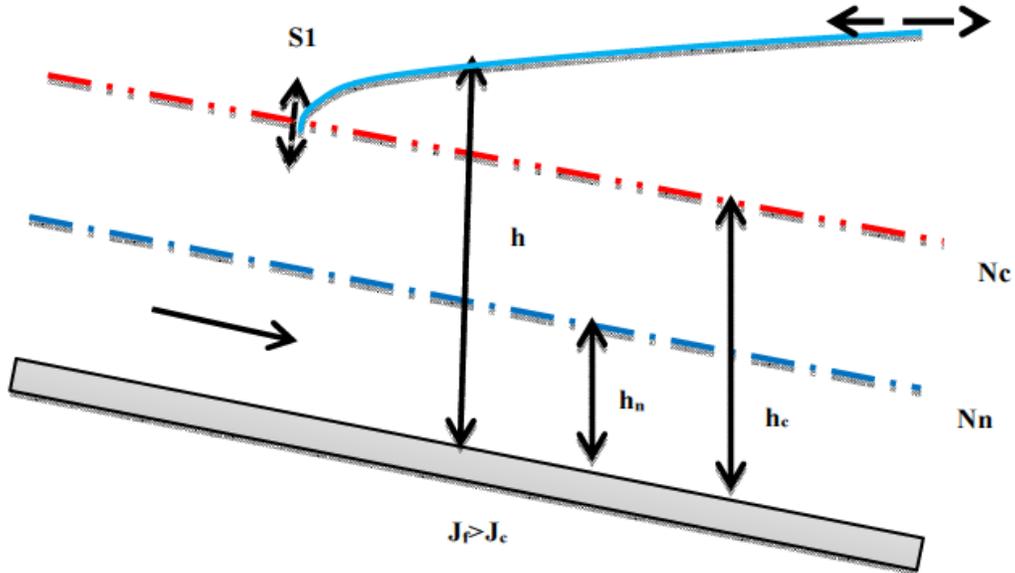


Figure III- 5: Branche $S1$ (Courbe remous d'exhaussement).

III.3.3.2. Courbe S_2

Dans ce type de cette courbe la profondeur d'eau h décroît, correspondant à un rapport de, dh/dx , négatif et un régime d'écoulement torrentiel. La hauteur d'écoulement, h , supérieure à la hauteur normale, h_n , et inférieure à la hauteur critique, h_c , en amont, elle nait brusquement de la hauteur critique, en aval elle tend vers la hauteur normale. Se rencontre en aval d'une augmentation brusque de pente, ou dans l'élargissement de la section.

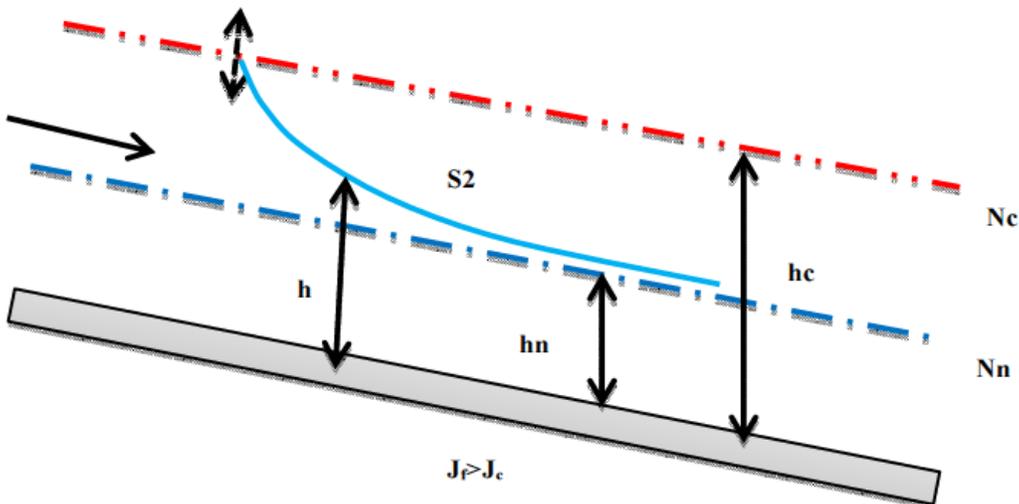


Figure III- 6: Branche $S2$ (courbe remous d'abaissement)

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

III.3.3.3. Courbe S_3

L'écoulement est torrentiel et la hauteur d'écoulement, h , est inférieure de la hauteur normale, h_n , le rapport dh/dx est positif, dans ce type de courbe, en amont, sa pente commence rapidement, et en aval, elle remonte brusquement vers la hauteur normale.

Par exemple on rencontre :

- Dans un écoulement sous une vanne dénoyée débouchant dans un canal a pente forte.
- Lorsque la pente diminue brusquement tout en restant supérieure à la pente critique.

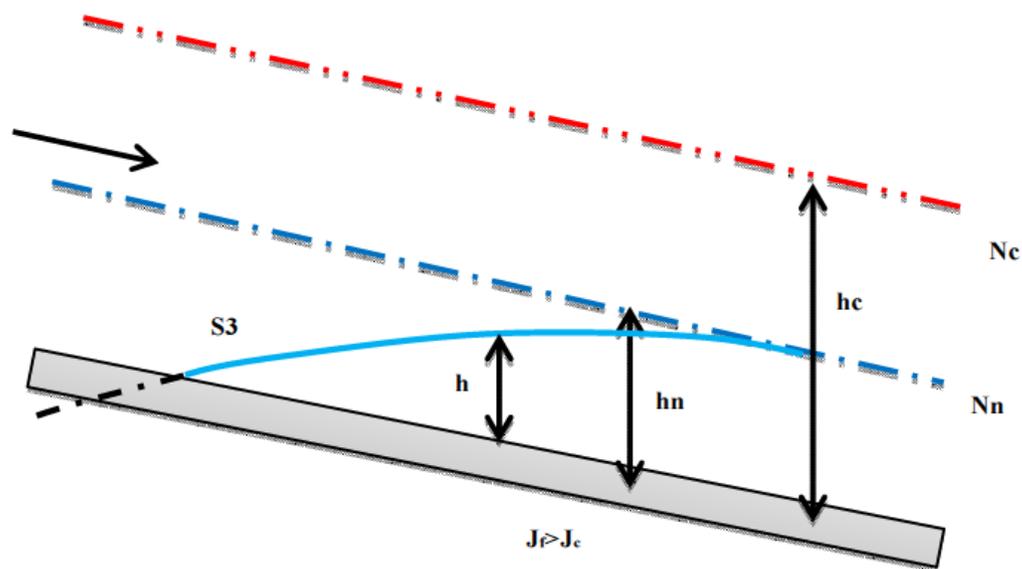


Figure III- 7: Branche S_3 (Courbe remous d'exhaussement)

III.3.4. Canaux à pente critique

Dans un canal à pente critique où la pente de fond identique à la pente critique, et la hauteur normale, h_n , équivalent à la hauteur critique, h_c , les courbes C intermédiaires entre les courbes M et les courbes S. par conséquent le rapport, $dh/dx = J_f$. La courbe représentative est donc horizontale. Dans ce cas l'écoulement à profondeur critique h_c est souvent instable ce qui se traduit par des fluctuations de la surface libre.

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

III.3.4.1. Courbe C_1

La hauteur d'écoulement h , est plus grande que la hauteur normale h_n , par conséquent, h_c , et le régime d'écoulement est fluviale. Représente le passage entre M_1 concave et S_1 convexe. Elle est donc droite et horizontale.

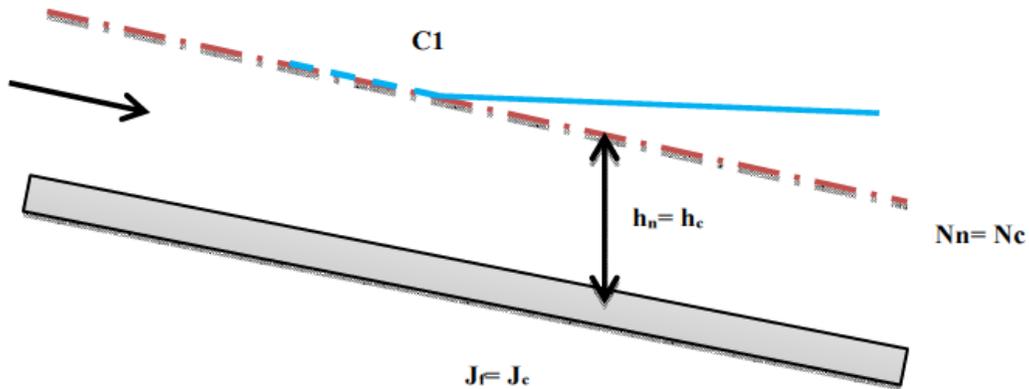


Figure III- 8: Branche C_1 (courbe remous d'exhaussement)

III.3.4.2. Courbe C_2

Lorsque la hauteur normale et la hauteur critique sont confondues la courbe (branche) C_2 n'existe pas.

III.3.4.3. Courbe C_3

Dans le cas contraire, la hauteur d'écoulement h , inférieur à la hauteur normale, $h_n(\equiv h_c)$ et le régime d'écoulement torrentielle. La courbe C_3 représente le passage entre M_3 convexe et S_3 concave, elle est aussi horizontale.

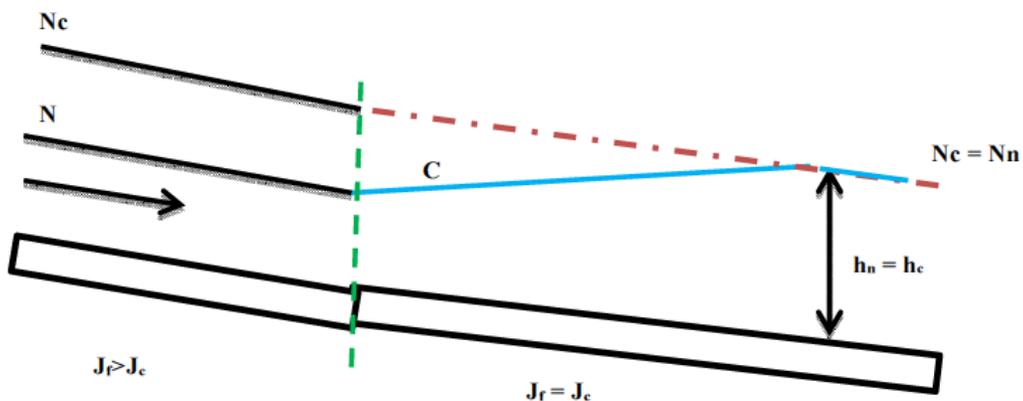


Figure III- 9: Branche C_3 (Courbe remous d'exhaussement)

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

III.3.5. Canaux horizontaux

Dans les canaux horizontaux la pente de fond J_f est nulle est la profondeur normale h_n n'existe pas puisqu'elle devient inférieure, dans ce cas la courbe comporte deux branches H_2 et H_3 qui sont les limites des branches M_2 et M_3 et la branche H_1 disparaît. Se rencontre à une chute brusque pour la courbe H_2 et d'un écoulement à grande vitesse entrant dans un canal horizontal pour la courbe H_3

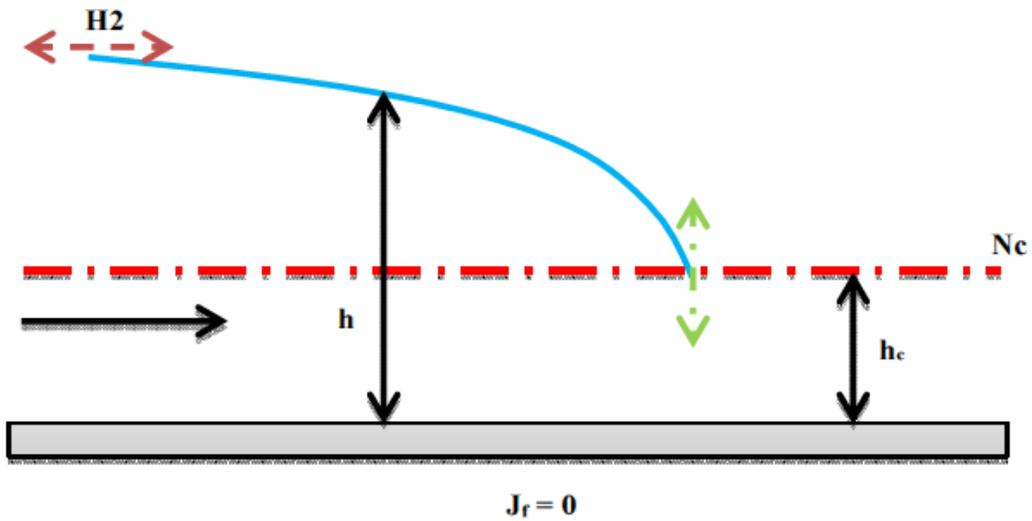


Figure III- 10: Branche H2 (courbe remous d'abaissement)

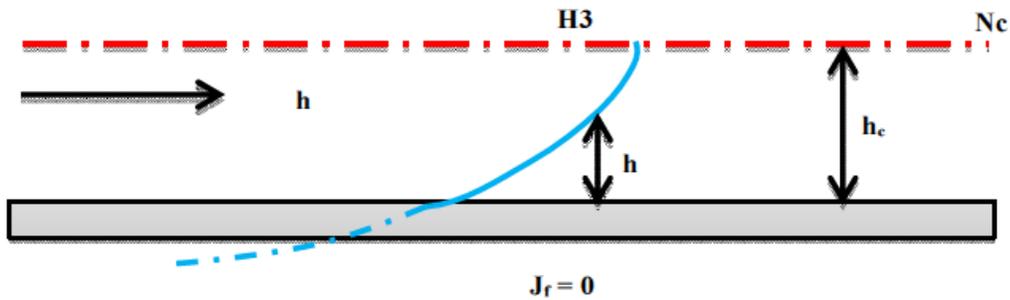


Figure III- 11: Branche H3 (courbe remous d'exhaussement)

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

III.3.6. Canaux à contre pente

D'après l'équation de Manning suivante :

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2}$$

Où V est la vitesse, R le rayon hydraulique (surface d'écoulement divisée par le périmètre mouillé), S_f est la pente du gradient hydraulique et n est le coefficient de Manning varie selon le type de canal.

Pour calculer la profondeur d'un canal de forme donnée avec la formule de débit on constate que l'écoulement uniforme est seulement possible dans un canal à pente descendante $J_f > 0$. Dans le cas contraire $J_f < 0$ (contre pente) il n'y a pas de profondeur normale h_n en conséquence la branche A1 n'existe pas. Et la courbe comportant les deux branches A2 et A3 qui se rencontre successivement par exemple dans un changement brusque de pente et à une vanne dont l'ouverture est inférieure à la profondeur critique.

D'une manière générale les courbes H et A sont des cas particuliers des courbe M pour les quelles, on ne peut pas définir de régime uniforme donc la hauteur normale n'existe pas puisqu'elle devient infinie.

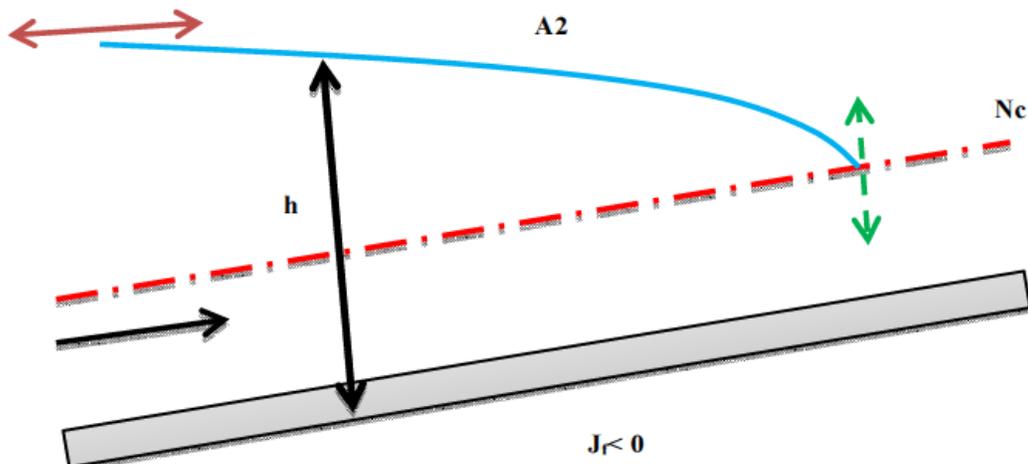


Figure III- 12: Branche A2 (courbe remous d'abaissement)

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

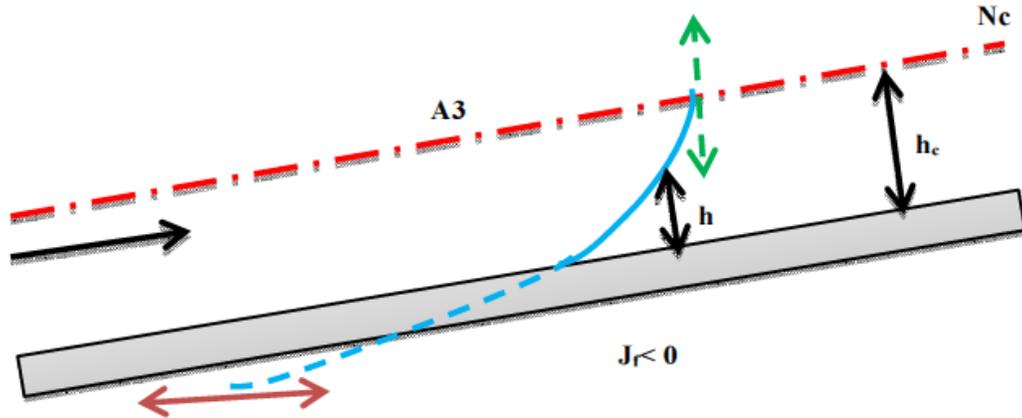


Figure III- 13: Branche A3 (courbe remous d'exhaussement)

III.4. Calcul du profil de la ligne d'eau à la surface d'eau

III.4.1. Définition

Dans l'écoulement graduellement varié, l'équation de la surface d'eau permet de tracer les formes de la surface libre (ligne d'eau), par les différents cas possibles, le calcul et la construction exacte de ces formes nécessitent l'intégration de cette équation (III-7). Dans le cas général on utilise diverses méthodes mathématiques ou graphiques tel que :

- La méthode par approximations successives.
- La méthode par intégration directe.
- La méthode par intégration graphique.

III.4.2. Méthode par approximations successives

Cette méthode est valable pour les canaux prismatique et non prismatique, lorsque on multiplie le terme dx par l'équation simplifiée de Saint Venant (Eq.III-4) et transforme en suite aux différences finies. (SILBER, 1968)

$$dx \frac{dh}{dx} = \left(J_f - \frac{Q^2}{R_h S^2 C^2} \right) dx - dx \frac{d \left(\frac{Q}{S} \right)^2}{2g} \quad (\text{III-10})$$

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

$$dh = \left(J_f - \frac{Q^2}{R_h S^2 C^2} \right) dx - \frac{(Q)^2}{2g} d \left(\frac{1}{S^2} \right)$$

En passant des différentielles aux différences finies l'équation (III-11) se transforme comme suit :

$$(h_{i+1} - h_i) = \left(J_f - \frac{Q^2}{C^2 S^2 R_h} \right) (x_{i+1} - x_i) - \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{S_{i+1}^2} - \frac{1}{S_i^2} \right) \quad \text{(III-12)}$$

Avec la profondeur h_i , apparaît à l'abscisse x_i , tandis que la profondeur d'eau très Proche h_{i+1} à l'abscisse très proche x_{i+1} , et les valeurs $\bar{C}, \bar{S}, \bar{R}_h$ à la valeur moyenne de la profondeur d'eau supposée $\bar{h} = \frac{h_{i+1} + h_i}{2}$ peut être utilisée comme suit pour tracer la surface d'eau. Cette méthode en général la plus longue à appliquer, mais souvent aussi la plus précise. divisé en deux méthodes différentes, l'un est la méthode des tronçons lorsque on a un tronçon de faible distance $\Delta x = (x_{i+1} - x_i)$ donnée arbitrairement on trace la variation de la profondeur $\Delta h = (h_{i+1} - h_i)$ et l'autre est la méthode des variations de profondeur si on a une légère différence de profondeur $\Delta h = (h_{i+1} - h_i)$ donnée, on trace la distance, $\Delta x = (x_{i+1} - x_i)$ entre les deux profondeurs. L'équation (III-12) peut aussi s'écrire: **(SILBER, 1968)**

$$(h + z)_{i+1} - (h + z)_i = \left(- \frac{Q^2}{C^2 S^2 R_h} \right) (x_{i+1} - x_i) - \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{S_{i+1}^2} - \frac{1}{S_i^2} \right) \quad \text{(III-12a)}$$

D'autre façon on peut s'applique cette méthode aussi lorsque on multiplie le terme dx par l'équation (III-7), et transforme en suite aux différences finies.

$$dx \frac{dh}{dx} = dx \left(\frac{1 - \frac{(Q/S)^2}{C^2 R_h} + \frac{(Q/S)^2 ds}{g S J_f dx}}{1 - \frac{(Q/S)^2}{Sg} B} \right) J_f \quad \text{(III-13)}$$

$$dh = \left(\frac{1 - \frac{(Q/S)^2}{C^2 R_h} dx + \frac{(Q/S)^2 ds}{g S}}{1 - \frac{(Q/S)^2}{Sg} B} \right) \quad \text{(III-14)}$$

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul (III-15)

$$(h_{i+1} - h_i) = \left(\frac{\left(J_f - \frac{Q^2}{c^2 S^2 R_h} \right) (x_{i+1} - x_i) + \left(\frac{Q^2}{g S^3} (S_{i+1}^2 - S_i^2) \right)}{1 - \frac{Q^2}{S^3 g} B} \right)$$

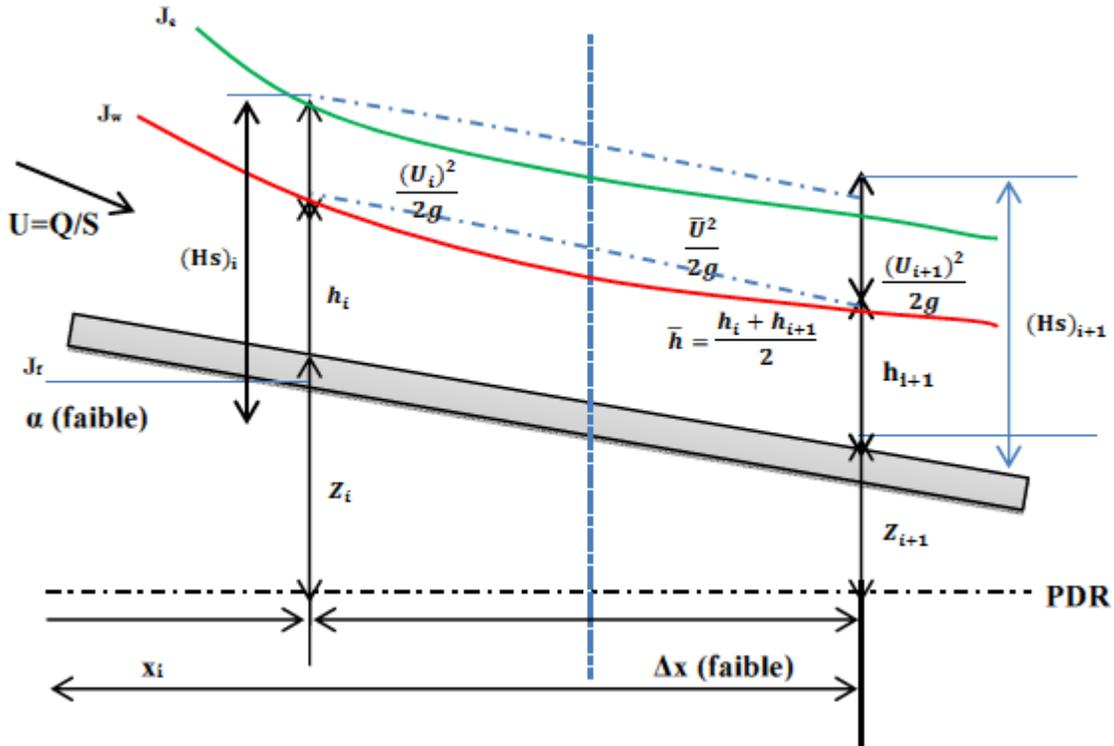


Figure III- 14: Schéma d'écoulement non uniforme entre deux sections

La résolution se fait de deux manières : (GRAF W. H., 2000)

Méthode des tronçons (Δx fixé).

Méthode des variations de profondeur (Δh fixé).

III.4.2.1. Méthode des tronçons (Δx est fixée)

La méthode (implicite) des tronçons ou à pas standard est utilisée pour les tronçons à faibles distance. Elle s'applique à l'équation du mouvement non uniforme sous la forme :

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{J_f - J_{moy}} \quad (III-16)$$

Il faut signaler que les calculs avec cette méthode sont longs et compliqués.

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

La méthode des tronçons consiste à déterminer la profondeur d'eau h_2 à l'abscisse x_2 , très proche de h_1 , à une abscisse x_1 . En choisissant une première valeur h'_2 de section A'_2 , on calcule les valeurs J'_2, J_1, A_1 . En portant ces valeurs dans l'équation suivante :

$$h_1 - h_2 = (x_2 - x_1) \left(J_f - \frac{J(h_2) + J(h_1)}{2} \right) - \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right). \quad (\text{III-17})$$

Et on obtient alors la valeur de h_2 qui sera probablement différente de la valeur choisie h'_2 . On recommence par approximations successives jusqu'à ce que la valeur de h_2 donnée par l'équation (III.17) soit égale à la dernière valeur choisie h'_2, h''_2, \dots on passera ensuite au tronçon suivant, etc....

III.4.2.2. Méthode des variations de profondeur (Δh est fixée)

La méthode des variations de profondeur ou méthode à pas directs convient particulièrement bien aux canaux prismatiques. Elle est utilisée pour une légère déférence de profondeur, et pour réduire les erreurs, il convient de resserrer la variation des profondeurs h_2 et h_1 . Cette méthode consiste à chercher la valeur de l'abscisse x_2 pour une profondeur h_2 très proche de h_1 à l'aide de l'équation suivante (III.18)

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \frac{\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right)}{J_f - \frac{J(h_2) + J(h_1)}{2}} \quad (\text{III-18})$$

On calcule l'abscisse x_2 et on passera ensuite au tronçons suivant, etc.

III.4.3. Méthode par intégration directe

Cette méthode est plus valable et directe quel que soit la distance entre ces sections, que la méthode par approximation successive qui passe d'une section à l'autre d'une petite distance.

L'intégration de l'équation différentielle du mouvement dans les canaux prismatiques en forme générale permet de calculer et tracer la surface d'eau, si on connaît le débit Q , la pente de fond J_f et le coefficient de frottement n ou c , par conséquent les variables sont l'abscisse x , et la

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

profondeur d'eau h , correspondent. Cette équation développée par Bakhmeteff pour quelques sections du canal, tel que la forme rectangulaire, trapézoïdale, triangulaire et parabolique.

La forme générale de l'équation de mouvement des canaux non prismatiques est :

$$\frac{dh}{dx} = J_f \frac{1 - \left(\frac{K_n}{K}\right)^2 + \left(\frac{K_n}{K}\right)^2 \frac{1}{J_{cB}} \frac{ds}{dx}}{1 - \left(\frac{K_n}{K}\right)^2 \frac{J_f}{j_c}} \quad (\text{III-19})$$

Ou $k(h)$ est la débitante, représente uniquement une fonction de la profondeur d'écoulement h équivalent à la profondeur normale h_n déterminée comme suit

$$K(h) = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S = C R_h^{1/2} S \quad (\text{III-20})$$

Pour l'écoulement uniforme, cette relation prend la valeur suivante:

$$K(h) = Q / \sqrt{J_f} \quad (\text{III-20a})$$

Lorsque la vitesse moyenne donnée par la formule de Manning dans sa forme particulière comme suit:

$$U = \frac{1}{n} R_h^{2/3} J_f^{1/2} \quad (\text{III-21})$$

Cette relation se base sur de nombreuses mesures dans les canaux naturels et artificiels. Le débit $Q = U.S$ on a donc :

$$Q = \frac{1}{n} R_h^{2/3} J_f^{1/2} S \quad (\text{III-22})$$

On compare l'égalité (III-17) et (III-19) on obtient :

$$Q = \frac{1}{n} R_h^{2/3} J_f^{1/2} S \quad (\text{III-23})$$

Ou

$$Q / \sqrt{J_f} = f(h) \quad (\text{III-24})$$

Peut-être tracer point par point pour une forme de section donnée.

La débitance K , caractérise le canal, elle représente une mesure de la capacité de transport d'eau dans cette section.

Le membre à droite de l'équation de mouvement sous forme générale (équation (III-19)), fonction de la profondeur h et de la l'arguer B , de sorte qu'une relation de cette équation est une équation différentielle à variables séparées.

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

$$dx = f(h)dh + f(B)dB$$

L'intégration entre deux sections x_i et x_{i+1} donne une quantité rarement à une expression simple, par conséquent la résolution analytique est difficile. Mais l'intégration est possible tel que le canal à section rectangulaire de largeur importante, dans le cas d'un canal parabolique ou dans quelques autres sections du canal.

$$(x_i - x_{i+1}) = \int_{h_{i+1}}^{h_i} f(h)dh + \int_{B_{i+1}}^{B_i} f(B)dB \quad (III-25)$$

Si le canal est non prismatique, L'expression dans le dénominateur de l'équation différentielle équation (III-7), peut alors être exprimée ainsi :

$$\begin{aligned} \frac{Q^2}{g S^3 B} &= \frac{Q^2}{C^2 S^2 R_h J_f} \frac{C^2 S^2 R_h J_f}{g S^3 / B} = \frac{(Q/\sqrt{J_f})^2}{(C S R_h^{1/2})^2} \frac{J_f}{g S / C^2 B R_h} = \frac{K_n^2 J_f}{K^2 J_c} \\ \frac{(Q/S)^2}{C^2 R_h J_f} &= \frac{Q^2}{C^2 S^2 R_h J_f} = \frac{(Q/\sqrt{J_f})^2}{(C S R_h^{1/2})^2} = \frac{K_n^2}{K^2} \end{aligned}$$

En utilise les trois relations des équations ((III-9), (III-17), (III-17a)) pour exprimer le numérateur d'équation (III-7)

$$\begin{aligned} \frac{Q^2}{g S^3 J_f} &= \frac{Q^2}{C^2 S^2 R_h J_f} \frac{C^2 S^2 R_h J_f}{g S^3 J_f} = \frac{(Q/\sqrt{J_f})^2}{(C S R_h^{1/2})^2} \frac{C^2 R_h}{g S} = \frac{(Q/\sqrt{J_f})^2}{(C S R_h^{1/2})^2} \frac{C^2 R_h}{g S} \\ &= \frac{K_n^2 C^2 R_h}{K^2 g S} = \frac{K_n^2 C^2 R_h}{K^2 g S} \end{aligned}$$

Par cette définition nous avons proposé de multiplier et diviser ce terme par la largeur de miroir (B), ainsi on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{Q^2}{g S^3 J_f} &= \frac{Q^2}{C^2 S^2 R_h J_f} \frac{C^2 S^2 R_h J_f}{g S^3 J_f} = \frac{(Q/\sqrt{J_f})^2}{(C S R_h^{1/2})^2} \frac{C^2 R_h}{g S} = \frac{(Q/\sqrt{J_f})^2}{(C S R_h^{1/2})^2} \frac{C^2 R_h B}{g S B} \\ &= \frac{K_n^2 C^2 R_h B}{K^2 g S B} = \frac{K_n^2}{K^2} \frac{1}{J_c B} \end{aligned}$$

Donc l'équation (III-7) devient:

$$\frac{dh}{dx} = J_f \frac{1 - \left(\frac{K_n}{K}\right)^2 + \left(\frac{K_n}{K}\right)^2 \frac{1}{J_c B} \frac{ds}{dx}}{1 - \left(\frac{K_n}{K}\right)^2 \frac{J_f}{J_c}} \quad (III-26)$$

Forme générale de l'équation de mouvement.

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

III.4.4.1. Méthode de Bresse

La méthode de Bresse qui est une méthode simple et rapide, s'applique aux cours d'eau avec un lit très large par rapport à la profondeur (canaux rectangulaires de largeur infinie).

Pour un canal rectangulaire de largeur importante ($b \gg h$) où $h \approx R_h$, en introduisant le débit par unité de largeur $q=Q/b$. (GRAF W. H., 2000)

On écrit par définition :

$$h_n^3 = \frac{q^2}{C^2 J_f} \quad \text{III.27}$$

Et la profondeur critique :

$$h_c^3 = \frac{q^2}{g} \quad \text{III.28}$$

La débitance ,K, du calcul est donnée par :

$$K^2 = C^2 R_h A^2 = C^2 h^3 b^2. \quad \text{III.29}$$

En conséquence, on a ensuite :

$$\left(\frac{h_c}{h_n}\right)^3 = \frac{C^2 J_f}{g} \text{ et } \left(\frac{K_n}{K}\right)^2 = \left(\frac{h_n}{h_c}\right)^3 \quad \text{III.30}$$

Le coefficient de Chézy, C, étant constante .la pente critique est donnée par :

$$J_c = J_f \left(\frac{h_c}{h_n}\right)^3 \quad \text{III.31}$$

L'équation (III.22) s'écrit alors :

$$\frac{dh}{dx} = \left(J_f \frac{1 - \left(\frac{h_n}{h}\right)^3}{1 - \left(\frac{h_n}{h}\right)^3 \frac{J_f}{J_c}} \right) \quad \text{III.32}$$

Avec la relation pour la pente critique, éq (III.31) , on obtient :

$$\frac{dh}{dx} = \left(J_f \frac{1 - \left(\frac{h_n}{h}\right)^3}{1 - \left(\frac{h_c}{h}\right)^3} \right) \quad \text{III.33}$$

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

Cette relation est l'équation de Bresse valable pour un canal rectangulaire de largeur infinie . En posant :

$$h / h_n = \eta \quad \text{et} \quad dh = h_n d\eta \quad \text{III.34}$$

On écrit l'équation (III.33) comme suit :

$$dx = \frac{1}{J_f} \left(1 + \frac{1 - \left(\frac{hc}{h_n} \right)^3}{\eta^3 - 1} \right) h_n d\eta \quad \text{III.35}$$

III.4.4. Méthode par intégration graphique

Cette méthode est assez rigoureuse, mais plus s'avérer longue pour obtenir la forme complète de la surface d'eau. Elle est également utile pour les canaux non prismatiques. L'équation du mouvement pour un canal de section quelconque s'écrit dans sa forme générale d'équation (III-7) . Cette équation prend une forme simplifiée qu'on peut écrire ainsi : (Altinakar, 1993)

$$dx = f(h)dh + f(B)dB$$

La fonction $f(h)$ et $f(B)$ à une forme qu'il est en général difficile d'intégrer. Les parametres $S(h), R(h), B(h)$ et $C(h)$ ne peuvent pas être exprimés au moyen d'une fonction analytique s'impose de la profondeur d'eau h .

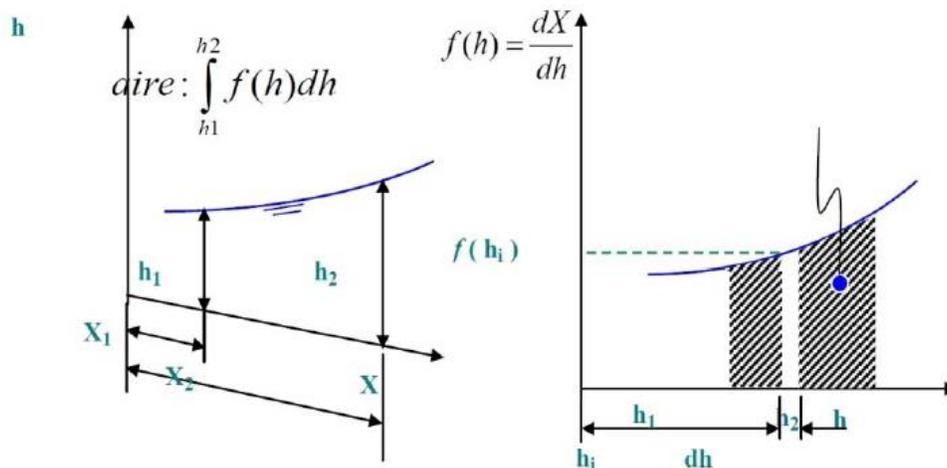


Figure III- 15: Schéma de la méthode par intégration graphique

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

On calcul et on établit la fonction, $f(h_i)$, pour différentes valeurs de la profondeur h_i . $f(h_i)$ est représentée sur la figure (III-15). L'aire comprise entre cette courbe, l'axe des h et les deux droites d'abscisses, h_1 et h_2 , donne la distance, $(x_2 - x_1)$ qui sépare les deux sections. : (GRAF W. H., 2000)

On l'écrit

$$x_2 - x_1 = \int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{h_1}^{h_2} f(h) dh. \quad (\text{III-36})$$

III.4.4.1. Méthode directe

On calcule et on établit la fonction $f(h_i, B_i)$ pour différentes valeurs de la profondeur, h_i et on trace cette courbe de $f(h, B)$ en fonction de h . L'aire comprise entre cette courbe, $f(h, B)$ l'axe des h et les deux droites d'abscisses h_1 et h_2 donne la distance $(x_2 - x_1)$ qui sépare les deux sections:

$$(x_2 - x_1) = \int_{h_1}^{h_2} f(h) dh + \int_{B_1}^{B_2} f(B) dB \quad (\text{III-37})$$

III.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons montré le concept de base pour comprendre l'écoulement graduellement varié, ensuite nous avons étudié les différentes classes de la courbe de remous avec ses interprétations et finalement nous avons présenté les méthodes de résolution de l'équation différentielle du mouvement.

Nous avons conclu que :

- La forme de la surface d'eau dépend aux types des canaux de pente et quand l'écoulement varie graduellement, la connaissance de la position de la surface libre de l'eau nécessite la connaissance de plusieurs profondeurs qui servent de points d'interpolation dans la procédure appelée « calcul de courbe de remous »

Chapitre III : Courbes de remous et leurs Méthodes de calcul

- Le calcul et la construction exacts du profil de la surface libre nécessitent la résolution de l'équation différentielle du mouvement dont plusieurs méthodes de résolutions ont été utilisées :
 - Méthode par approximations successives
 - Méthode par intégration directe
 - Méthode par intégration graphique

- L'utilisation de ces méthodes ainsi que son application à de multiples problèmes, permet de connaître des inconvénients et des avantages à chaque type de la méthode choisie.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats obtenus par les méthodes numériques présentées dans le chapitre précédent tel que la méthode par approximations successives, la méthode par intégration directe et la méthode par intégration graphique.

Nous avons utilisé les mesures sur un canal dans le mémoire master 2 (**amine**) pour les comparer avec ceux calculés avec notre application développée par monsieur l'encadreur monsieur Mohamed HAFIANE qui comporte des méthodes numériques programmées tel que : méthode des tronçons fixes, méthode des profondeurs fixe, ...) et qui nous permettra de simuler l'écoulement à surface libre en traçant les courbes de remous.

Notre objectif est de comparer les résultats expérimentaux obtenus dans le mémoire master (**amine**) avec les résultats numériques à l'aide de l'application développée. De même manière nous avons comparé aussi ses résultats en utilisant le logiciel HEC-RAS.

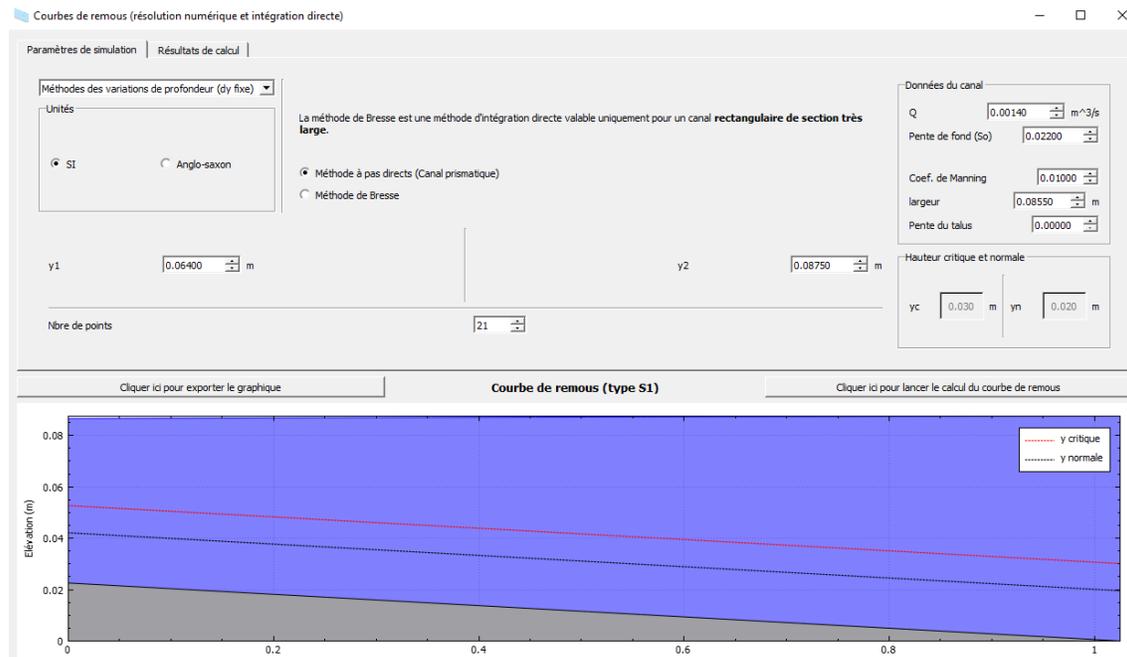


Figure IV- 1: Interface de l'application développée (hydraulics-channel-gvf)

(HAFIANE, 2020/2021)

Cette figure représente l'application développée par notre encadreur et qui comporte les méthodes numériques programmées. Elle est composée d'une partie numérique et l'autre graphique.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.2. Résultats obtenues par l'application hydraulics-channel-gvf

IV.2.1. Méthode de variations de profondeur (dy fixe)

IV.2.1.1. Méthode a pas direct (canal prismatique)

IV.2.1.1.1. *Pente positive*

		Pente de fond = 0.022			Débit = 0.0014 m ³ /s		Coef de Manning = 1/100					
i	[j] DirectSte	A	P	R	V	E	Sf	Sfmoy	dx	x[i]	Théorique	Erreur (%)
0	0.064	0.005472	0.2135	0.02563	0.255848	0.0673363	0.00086623			0	0	0.00
1	0.065175	0.00557246	0.21585	0.0258164	0.251235	0.0683921	0.00082725	0.00084674	0.0499114	0.0499114	0.05	0.18
2	0.06635	0.00567292	0.2182	0.0259987	0.246786	0.0694542	0.00079075	0.000809	0.0501187	0.10003	0.1	0.03
3	0.067525	0.00577339	0.22055	0.0261772	0.242492	0.0705221	0.00075654	0.00077364	0.0503105	0.150341	0.15	0.23
4	0.0687	0.00587385	0.2229	0.026352	0.238345	0.0715954	0.00072443	0.00074048	0.0504883	0.200829	0.2	0.41
5	0.069875	0.00597431	0.22525	0.026523	0.234337	0.0726739	0.00069425	0.00070934	0.0506533	0.251482	0.25	0.59
6	0.07105	0.00607477	0.2276	0.0266906	0.230461	0.0737571	0.00066586	0.00068006	0.0508065	0.302289	0.3	0.76
7	0.072225	0.00617524	0.22995	0.0268547	0.226712	0.0748447	0.00063913	0.0006525	0.0509491	0.353238	0.35	0.93
8	0.0734	0.0062757	0.2323	0.0270155	0.223083	0.0759365	0.00061392	0.00062653	0.0510819	0.40432	0.4	1.08
9	0.074575	0.00637616	0.23465	0.0271731	0.219568	0.0770322	0.00059014	0.00060203	0.0512058	0.455526	0.45	1.23
10	0.07575	0.00647662	0.237	0.0273275	0.216162	0.0781315	0.00056766	0.0005789	0.0513214	0.506847	0.5	1.37
11	0.076925	0.00657709	0.23935	0.027479	0.21286	0.0792344	0.00054641	0.00055704	0.0514295	0.558277	0.55	1.50
12	0.0781	0.00667755	0.2417	0.0276274	0.209658	0.0803404	0.0005263	0.00053636	0.0515306	0.609807	0.6	1.63
13	0.079275	0.00677801	0.24405	0.027773	0.20655	0.0814495	0.00050725	0.00051677	0.0516253	0.661432	0.65	1.76
14	0.08045	0.00687847	0.2464	0.0279159	0.203533	0.0825614	0.00048918	0.00049821	0.0517141	0.713147	0.7	1.88
15	0.081625	0.00697894	0.24875	0.028056	0.200604	0.0836761	0.00047204	0.00048061	0.0517975	0.764944	0.75	1.99
16	0.0828	0.0070794	0.2511	0.0281935	0.197757	0.0847933	0.00045575	0.0004639	0.0518757	0.81682	0.8	2.10
17	0.083975	0.00717986	0.25345	0.0283285	0.19499	0.0859129	0.00044028	0.00044802	0.0519493	0.868769	0.85	2.21
18	0.08515	0.00728032	0.2558	0.028461	0.192299	0.0870348	0.00042555	0.00043292	0.0520185	0.920788	0.9	2.31
19	0.086325	0.00738079	0.25815	0.0285911	0.189682	0.0881588	0.00041154	0.00041855	0.0520837	0.972871	0.95	2.41
20	0.0875	0.00748125	0.2605	0.0287188	0.187135	0.0892849	0.00039819	0.00040486	0.0521451	1.02502	1	2.50

Tableau IV- 1: Résultats numériques de la pente positive obtenue par la méthode de variations de profondeur (dy fixe)-Méthode à pas direct

Interprétation : dans le cas où la pente est positive, Nous concluons qu'il y a une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et ceux numériques pour la méthode numérique dit de profondeur fixe avec une erreur relative très faible de 2%.

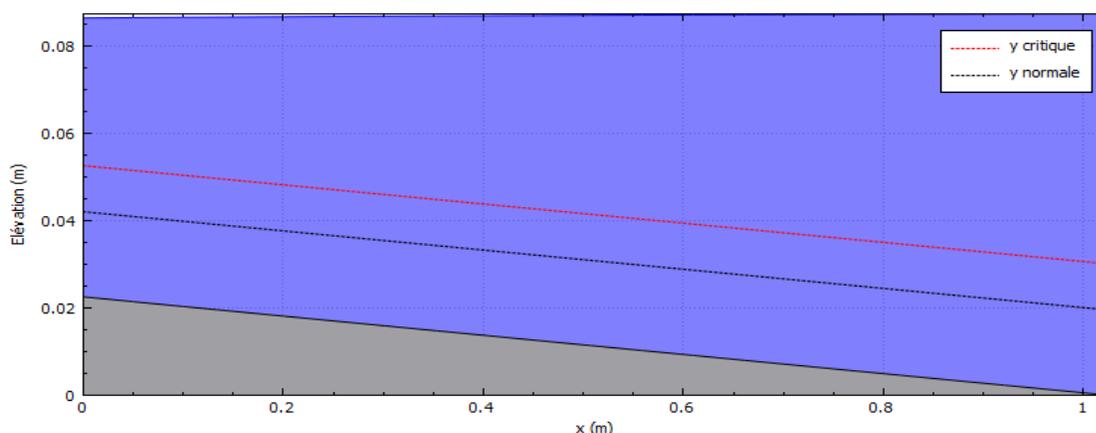


Figure IV- 2: Courbes de remous type S1 calculés par obtenues par la méthode de variations de profondeur (dy fixe) (Méthode a pas direct)

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Interprétation : La figure ci-dessous représente les courbes de remous de type S1 de la pente positive calculés à l'aide de l'application « hydraulics-channel-gvf » et obtenues par la méthode numérique de variations de profondeur (dy fixe) dont les valeurs de y critique et y normale sont définies comme suit : $Y_c=0.0301221$ et $Y_n=0.0195523$.

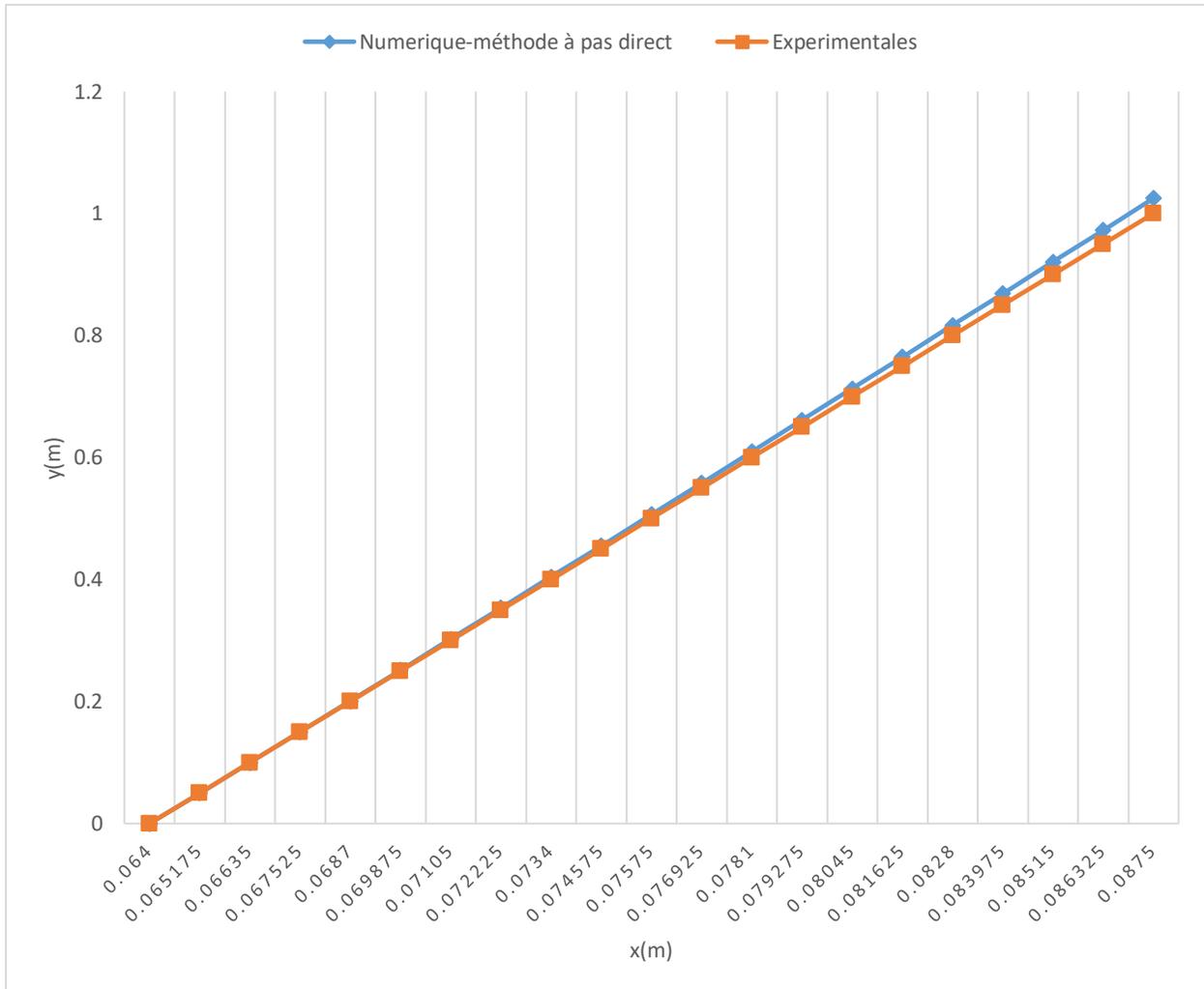


Figure IV- 3: Comparaison des résultats expérimentaux et ceux théorique de la pente positive par la méthode numérique de profondeur fixe (Méthode a pas direct)

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Interprétation : les deux courbes représentent les résultats théoriques et les résultats expérimentaux qui sont très proches ce qui nous concluons une bonne concordance entre ses deux courbes de remous, théorique et expérimentale avec une erreur relative de 2%.

IV.2.1.1.2. Pente negative

Pente de fond = -0.004 Débit = 0.00052 m ³ /s Coef de Manning = 1/100												
i	y[i] DirectStep	A	P	R	V	E	Sf	Sfmoy	dx	x[i]	Theorique	Erreur relative (%)
0	0.0312	0.0026676	0.1479	0.0180365	0.194932	0.0331367	0.00080333			0	0	
1	0.03089	0.00264109	0.14728	0.0179325	0.196888	0.0328658	0.00082588	0.00081461	0.0562731	0.0562731	0.05	12.55
2	0.03058	0.00261459	0.14666	0.0178276	0.198884	0.032596	0.00084933	0.00083761	0.0557587	0.112032	0.1	12.03
3	0.03027	0.00258808	0.14604	0.0177218	0.200921	0.0323276	0.00087372	0.00086153	0.0552286	0.16726	0.15	11.51
4	0.02996	0.00256158	0.14542	0.017615	0.203	0.0320604	0.00089911	0.00088642	0.0546822	0.221943	0.2	10.97
5	0.02965	0.00253507	0.1448	0.0175074	0.205122	0.0317945	0.00092554	0.00091233	0.0541191	0.276062	0.25	10.42
6	0.02934	0.00250857	0.14418	0.0173989	0.207289	0.0315301	0.00095307	0.00093931	0.0535387	0.3296	0.3	9.87
7	0.02903	0.00248206	0.14356	0.0172894	0.209503	0.0312671	0.00098177	0.00096742	0.0529403	0.382541	0.35	9.30
8	0.02872	0.00245556	0.14294	0.017179	0.211764	0.0310056	0.00101168	0.00099672	0.0523235	0.434864	0.4	8.72
9	0.02841	0.00242905	0.14232	0.0170676	0.214075	0.0307458	0.00104289	0.00102728	0.0516875	0.486552	0.45	8.12
10	0.0281	0.00240255	0.1417	0.0169552	0.216437	0.0304876	0.00107545	0.00105917	0.0510319	0.537584	0.5	7.52
11	0.02779	0.00237604	0.14108	0.0168418	0.218851	0.0302312	0.00110946	0.00109246	0.0503558	0.587939	0.55	6.90
12	0.02748	0.00234954	0.14046	0.0167275	0.22132	0.0299766	0.00114499	0.00112722	0.0496588	0.637598	0.6	6.27
13	0.02717	0.00232303	0.13984	0.0166121	0.223845	0.0297239	0.00118212	0.00116356	0.0489402	0.686538	0.65	5.62
14	0.02686	0.00229653	0.13922	0.0164957	0.226429	0.0294731	0.00122096	0.00120154	0.0481992	0.734738	0.7	4.96
15	0.02655	0.00227002	0.1386	0.0163782	0.229072	0.0292245	0.0012616	0.00124128	0.0474352	0.782173	0.75	4.29
16	0.02624	0.00224352	0.13798	0.0162597	0.231779	0.0289781	0.00130415	0.00128288	0.0466475	0.82882	0.8	3.60
17	0.02593	0.00221701	0.13736	0.0161402	0.23455	0.028734	0.00134873	0.00132644	0.0458354	0.874656	0.85	2.90
18	0.02562	0.00219051	0.13674	0.0160195	0.237388	0.0284922	0.00139546	0.00137209	0.0449982	0.919654	0.9	2.18
19	0.02531	0.002164	0.13612	0.0158978	0.240295	0.028253	0.00144447	0.00141996	0.0441351	0.963789	0.95	1.45
20	0.025	0.0021375	0.1355	0.0157749	0.243275	0.0280164	0.00149591	0.00147019	0.0432455	1.00703	1	0.70

Tableau IV- 2: Résultats numériques de la pente négative obtenue par la méthode de variations de profondeur (dy fixe) (Méthode a pas direct)

Interprétation : D'après les résultats numériques et celle de résultats théoriques, là où la pente est négative. Elles sont peu concluantes, nous avons calculé l'erreur relative maximale qui est égale de 12%.

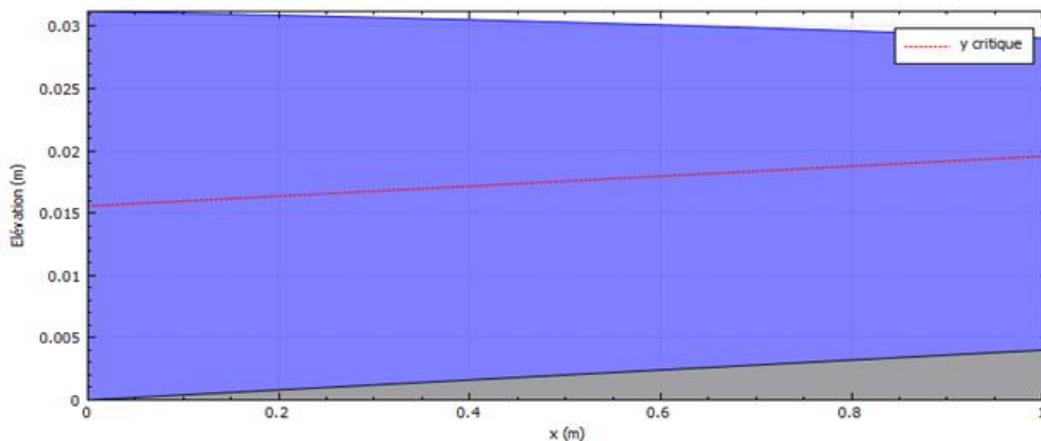


Figure IV- 4: Courbes de remous type A2 calculés par obtenues par la méthode de variations de profondeur (dy fixe) (Méthode a pas direct)

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Interprétation : La figure ci-dessous représente les courbes de remous de type A2 de la pente négative calculés à l'aide de l'application « hydraulics-channel-gvf » et obtenues par la méthode numérique de variations de profondeur (dy fixe), méthode a pas direct dont les valeurs de y critique et y normale sont définies comme suit : $Y_c=0.0301221$ et $Y_n=0.0195523$

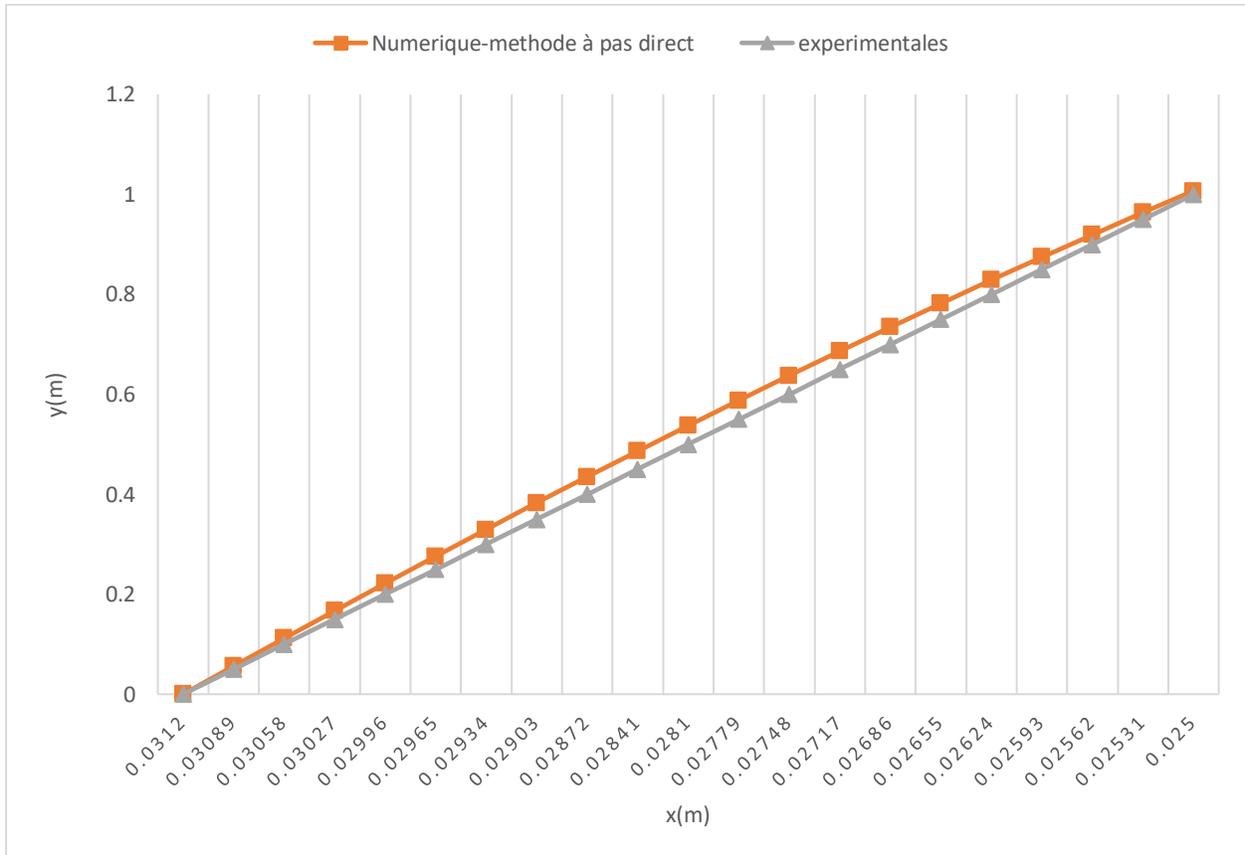


Figure IV- 5: Comparaison des résultats expérimentaux et ceux théorique pente négative par la méthode numérique de profondeur fixe (Méthode a pas direct)

Interprétation : dans le cas où la pente est négative, nous constatons une médiocre concordance entre ses deux courbes de remous, théorique et expérimentale. L'erreur relative maximale est de 12%.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.2.1.2. Méthode de Bresse

IV.2.1.2.1. Pente positive

Pente de fond=0.022 Débit = 0.00140 m ³ /s Coef de manning = 1/100				
i	y[i]Bresse	x[i]	Théorique	Erreur relative (%)
0	0.064	0	0	0.00
1	0.065175	0.0414339	0.05	17.13
2	0.06635	0.0834376	0.1	16.56
3	0.067525	0.125974	0.15	16.02
4	0.0687	0.169008	0.2	15.50
5	0.069875	0.212509	0.25	15.00
6	0.07105	0.256449	0.3	14.52
7	0.072225	0.300799	0.35	14.06
8	0.0734	0.345536	0.4	13.62
9	0.074575	0.390638	0.45	13.19
10	0.07575	0.436082	0.5	12.78
11	0.076925	0.48185	0.55	12.39
12	0.0781	0.527923	0.6	12.01
13	0.079275	0.574285	0.65	11.65
14	0.08045	0.620921	0.7	11.30
15	0.081625	0.667814	0.75	10.96
16	0.0828	0.714953	0.8	10.63
17	0.083975	0.762325	0.85	10.31
18	0.08515	0.809917	0.9	10.01
19	0.086325	0.857718	0.95	9.71
20	0.0875	0.905719	1	9.43

Tableau IV- 3: Résultats numériques de la pente positive obtenue par la méthode de variations de profondeur (dy fixe) (Méthode de Bresse)

Interprétation : D'après les résultats numériques et celle de résultats théoriques, et le calcul de l'erreur relative qui est égale à 17%. Nous constatons qu'il y'a un peu concluanes entre les deux résultats,

Chapitre IV : Résultats et interprétations

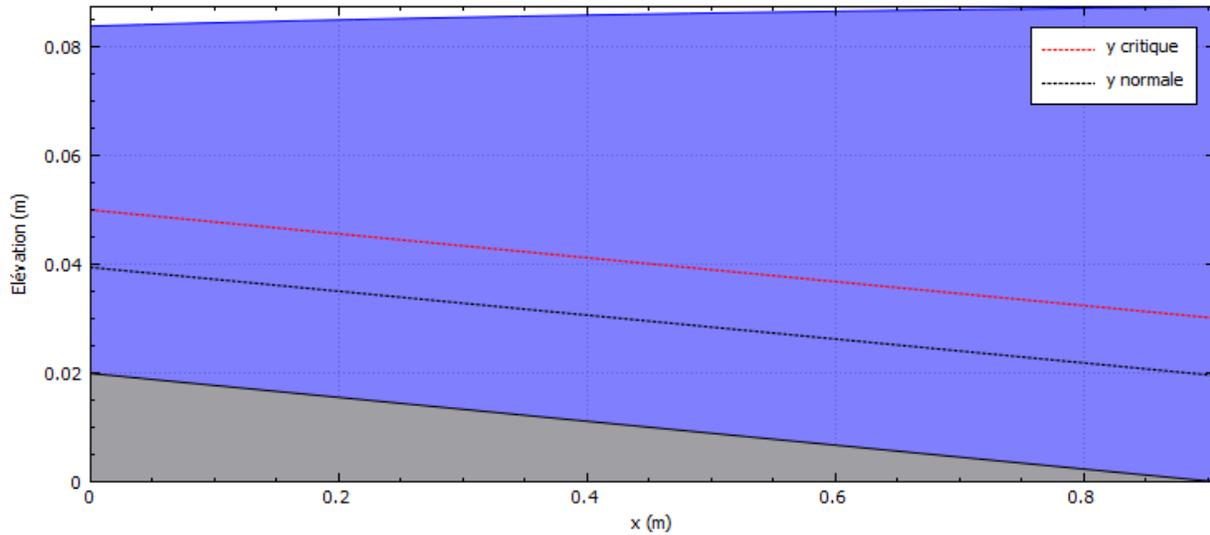


Figure IV- 6: Courbes de remous type S1 calculés par obtenues par la méthode de variations de profondeur (dy fixe) (Méthode de Bresse)

Interprétation : La figure ci-dessous représente les courbes de remous de type S1 de la pente positive calculés à l'aide de l'application « hydraulics-channel-gvf » et obtenues par la méthode numérique de variations de profondeur (dy fixe) par la méthode de Bresse dont les valeurs de y critique et y normale sont définit comme suit : $Y_c=0.0301221$ et $Y_n=0.0195523$.

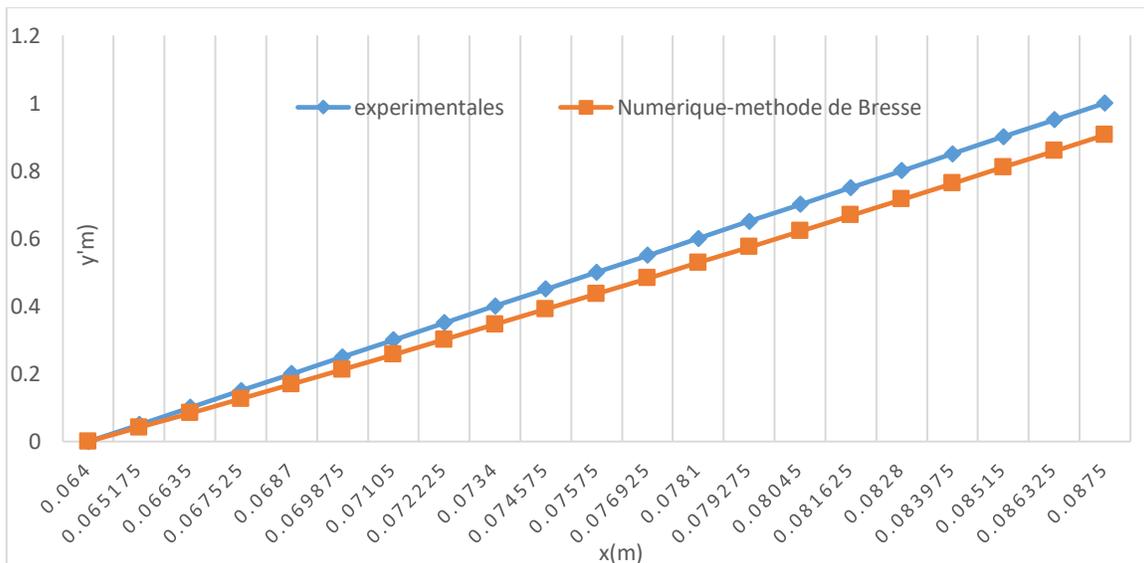


Figure IV- 7: Comparaison des résultats expérimentaux et ceux théorique pente positive par la méthode numérique de profondeur fixe (Méthode de Bresse)

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Interprétation : dans le cas où la pente est positive et l'erreur relative maximale calculé est de 17%., nous constatons un peu concordance entre ses deux courbes de remous, théorique et expérimentale.

IV.2.1.2.2. Pente négative

Remarque : La méthode de Bresse ne peut être utilisée que pour une pente de fond du canal positive.

IV.2.2. Méthode des tronçons (dx fixe)

IV.2.2.1. Méthode de Newton-Raphson

IV.2.2.1.1. Pente positive

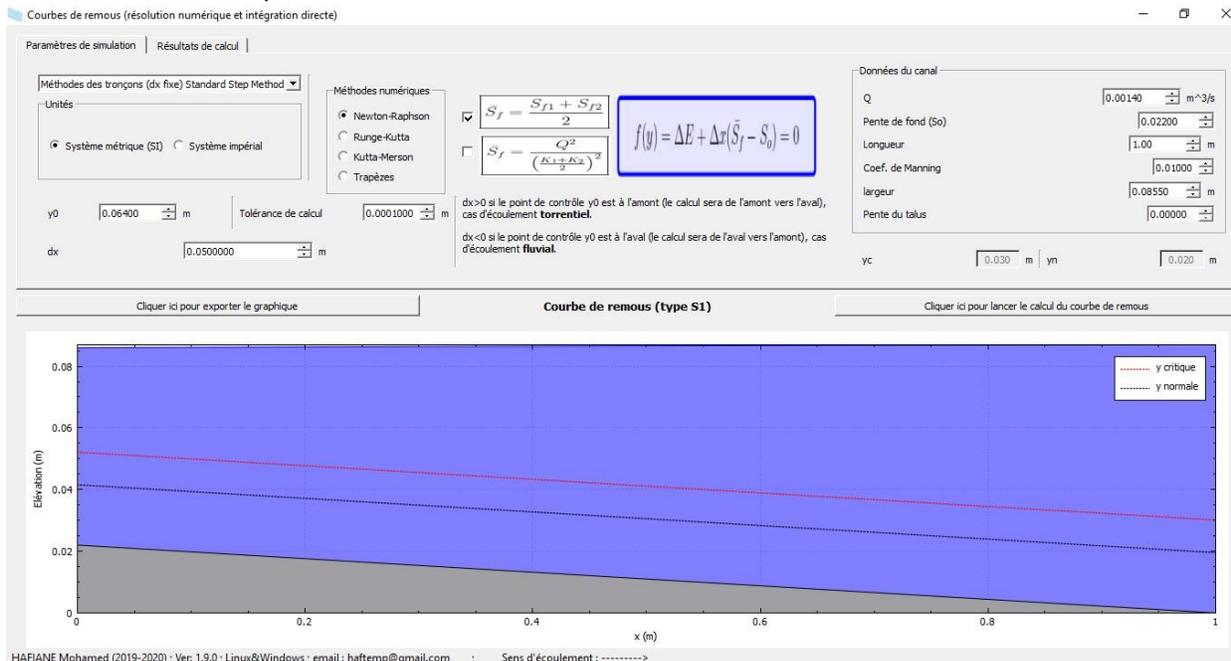


Figure IV- 8: Paramètres de simulation de la méthode de *Newton*-Raphson dans la pente positive

Chapitre IV : Résultats et interprétations

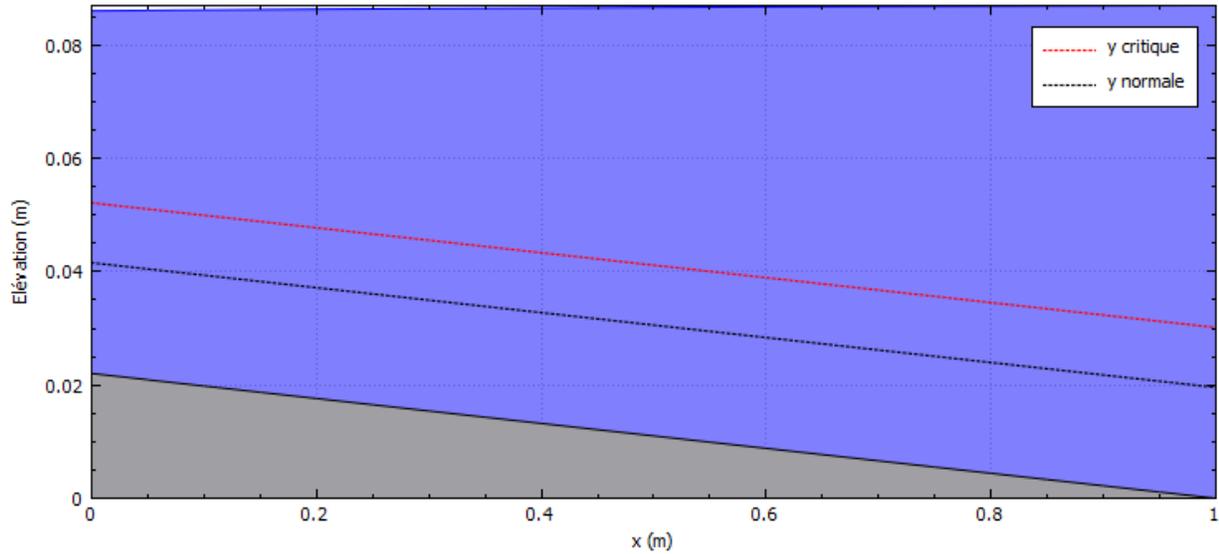


Figure IV- 9: Paramètres de simulation de la méthode de *Newton*-Raphson dans la pente positive

i	x[i]	y2[i] NR		y2[i] Tab5	x[i] Tab5		Erreur %
0	0	0.064		0.064	0		0.00
1	0.05	0.0651771		0.065	0,05		-0.27
2	0.1	0.0663493		0.067	0,1		0.97
3	0.15	0.0675171		0.068	0,15		0.71
4	0.2	0.0686807		0.069	0,2		0.46
5	0.25	0.0698407		0.071	0,25		1.63
6	0.3	0.0709971		0.072	0,3		1.39
7	0.35	0.0721504		0.073	0,35		1.16
8	0.4	0.0733008		0.074	0,4		0.94
9	0.45	0.0744483		0.076	0,45		2.04
10	0.5	0.0755934		0.077	0,5		1.83
11	0.55	0.0767361		0.078	0,55		1.62
12	0.6	0.0778766		0.079	0,6		1.42
13	0.65	0.079015		0.08	0,65		1.23
14	0.7	0.0801515		0.081	0,7		1.05
15	0.75	0.0812862		0.083	0,75		2.06
16	0.8	0.0824192		0.0835	0,8		1.29
17	0.85	0.0835507		0.0845	0,85		1.12
18	0.9	0.0846806		0.0855	0,9		0.96
19	0.95	0.0858092		0.0865	0,95		0.80
20	1	0.0869365		0.0875	1		0.64

Tableau IV- 4: Résultats de simulation de la méthode de *Newton-Raphson* dans la pente positive

Chapitre IV : Résultats et interprétations

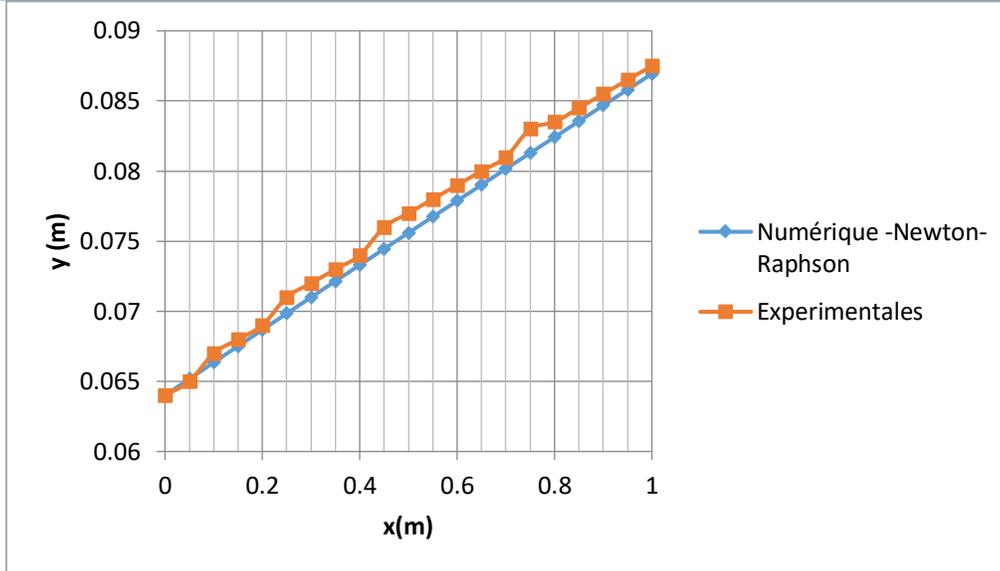


Figure IV- 10: Paramètres de simulation de la méthode de Newton-Raphson dans la pente positive

Interprétation : La méthode numérique (Newton-Raphson) est en bonne concordance avec l'expérience (l'erreur ne dépasse pas 2.1%).

IV.2.2.1.2. Pente negative

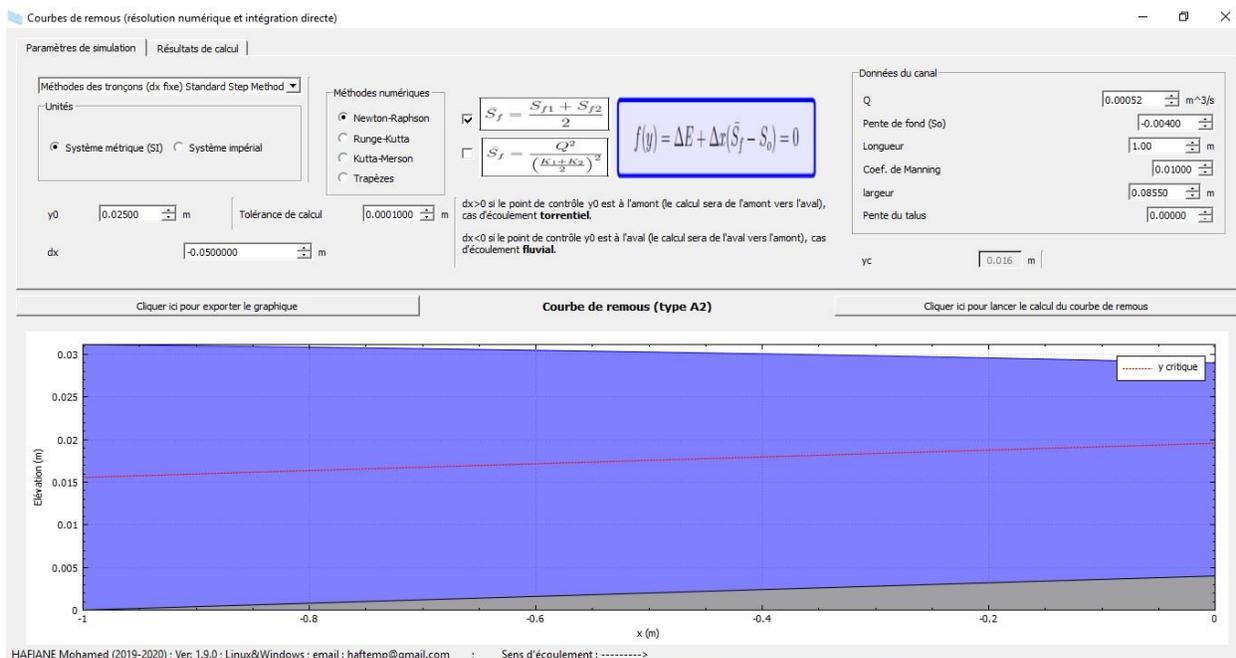


Figure IV- 11: Paramètres de simulation de la méthode de Newton-Raphson dans la pente négative

Chapitre IV : Résultats et interprétations

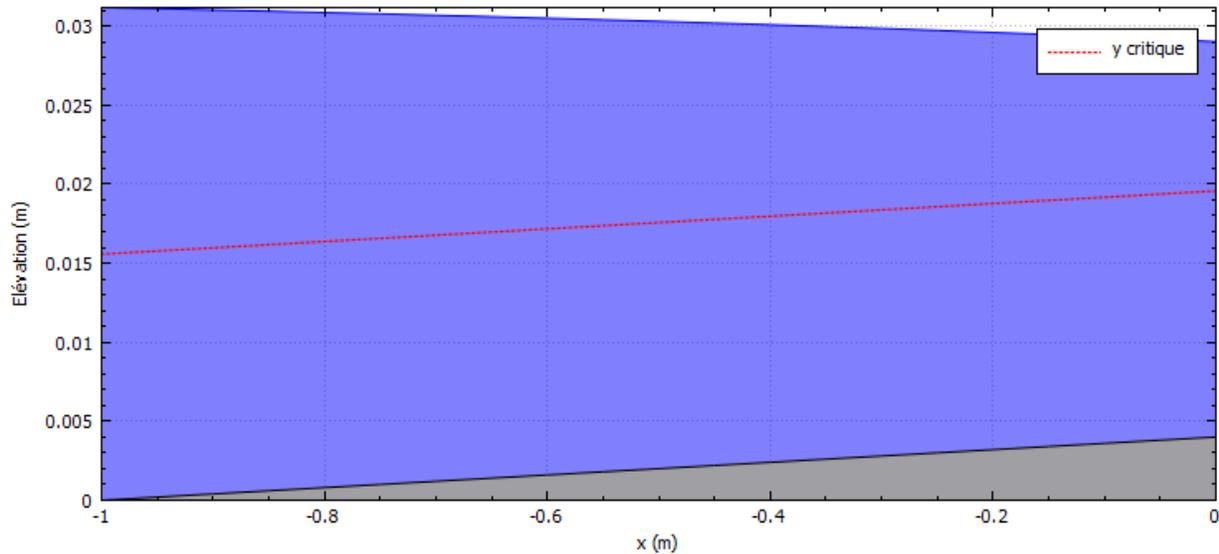


Figure IV- 12: Courbes de remous de type A2 de la méthode de Newton-Raphson dans la pente négative

i	x[i]	y2[i] NR		y2[i] Tab11	x[i] Tab11		Erreur %
0	0	0.025		0.025	0		0.00
1	-0.05	0.0253579		0.0253	0.05		0.23
2	-0.1	0.0257075		0.0256	0.1		0.42
3	-0.15	0.0260499		0.0259	0.15		0.58
4	-0.2	0.0263855		0.0262	0.2		0.71
5	-0.25	0.0267149		0.0265	0.25		0.81
6	-0.3	0.0270388		0.0268	0.3		0.89
7	-0.35	0.0273575		0.0271	0.35		0.95
8	-0.4	0.0276713		0.0274	0.4		0.99
9	-0.45	0.0279808		0.0277	0.45		1.01
10	-0.5	0.0282861		0.028	0.5		1.02
11	-0.55	0.0285875		0.0283	0.55		1.02
12	-0.6	0.0288854		0.0286	0.6		1.00
13	-0.65	0.0291798		0.0289	0.65		0.97
14	-0.7	0.0294711		0.0292	0.7		0.93
15	-0.75	0.0297594		0.0295	0.75		0.88
16	-0.8	0.0300448		0.0298	0.8		0.82
17	-0.85	0.0303276		0.0301	0.85		0.76
18	-0.9	0.0306079		0.0304	0.9		0.68
19	-0.95	0.0308858		0.0307	0.95		0.61
20	-1	0.0311614		0.0312	1		0.12

Tableau IV- 5: Résultats de simulation de la méthode de Newton-Raphson dans la pente négative

Chapitre IV : Résultats et interprétations

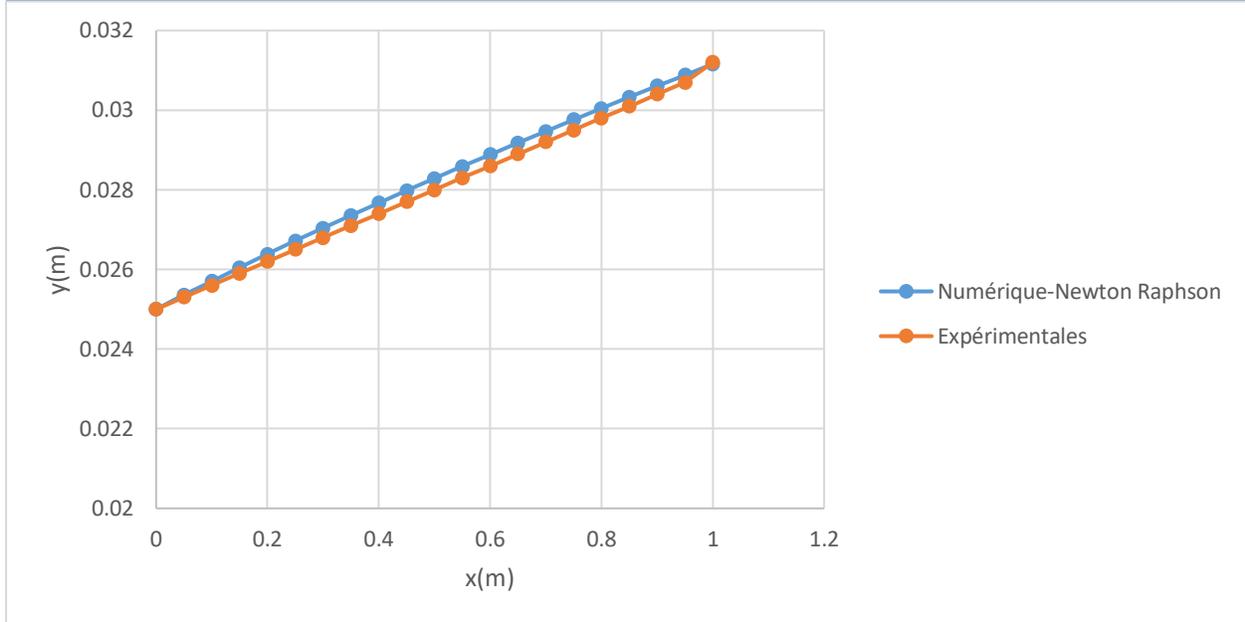


Figure IV- 13: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Newton-Raphson avec les résultats expérimentaux dans la pente négative

Interprétation : La méthode numérique (Newton-Raphson) est en bonne concordance avec l'expérience (l'erreur ne dépasse pas 1.02%).

IV.2.2.2. Méthode de Runge-Kutta

IV.2.2.2.1. Pente positive

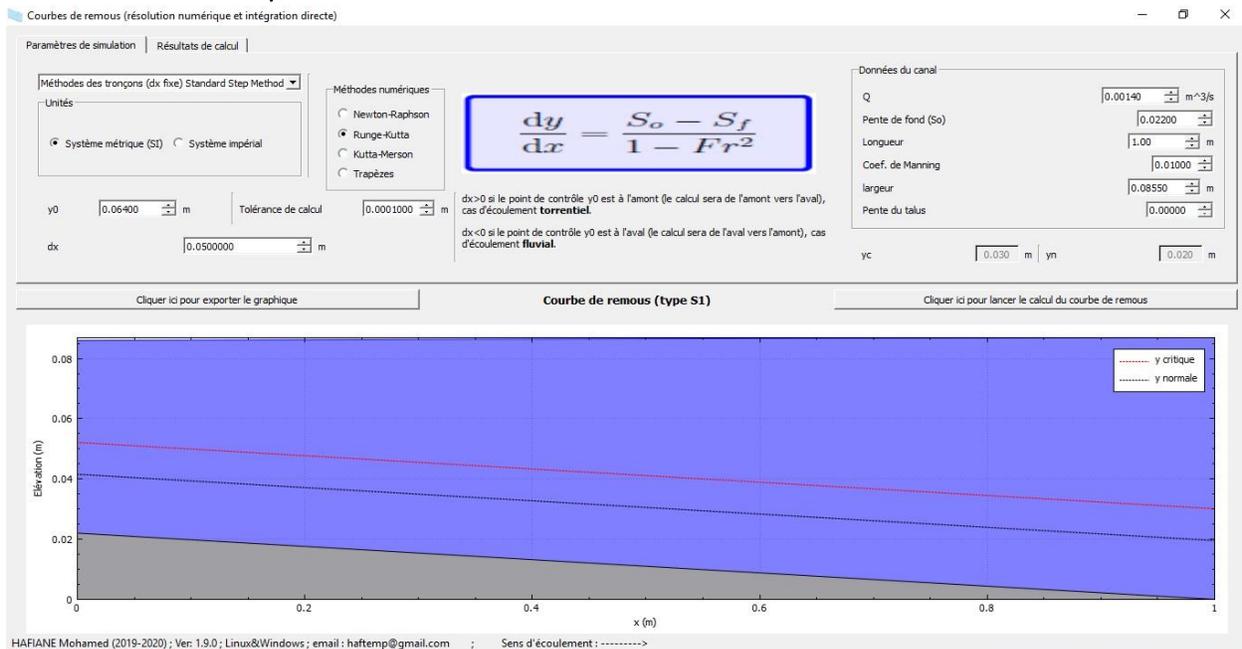


Figure IV- 14: Paramètres de simulation de la méthode de Runge-Kutta dans la pente positive

Chapitre IV : Résultats et interprétations

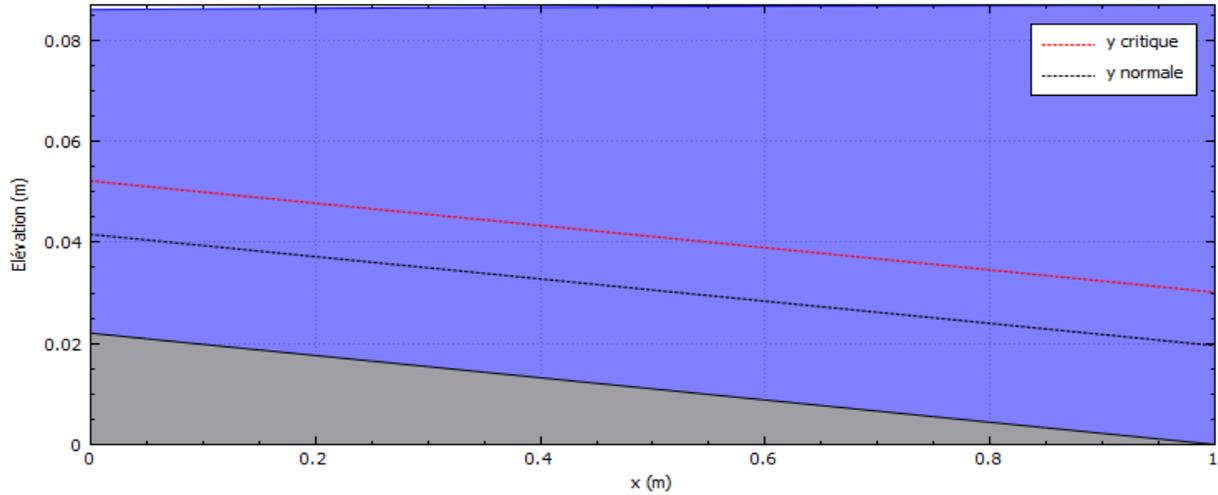


Figure IV- 15: Courbes de remous de type S1 de la méthode de Runge-Kutta dans la pente positive

i	x[i]	y2[i] YRK		y2[i] Tab5	x[i] Tab5		Erreur %
0	0	0.064		0.064	0		0.00
1	0.05	0.0651771		0.065	0.05		-0.27
2	0.1	0.0663493		0.067	0.1		0.97
3	0.15	0.0675171		0.068	0.15		0.71
4	0.2	0.0686808		0.069	0.2		0.46
5	0.25	0.0698407		0.071	0.25		1.63
6	0.3	0.0709972		0.072	0.3		1.39
7	0.35	0.0721505		0.073	0.35		1.16
8	0.4	0.0733008		0.074	0.4		0.94
9	0.45	0.0744484		0.076	0.45		2.04
10	0.5	0.0755935		0.077	0.5		1.83
11	0.55	0.0767362		0.078	0.55		1.62
12	0.6	0.0778766		0.079	0.6		1.42
13	0.65	0.0790151		0.08	0.65		1.23
14	0.7	0.0801516		0.081	0.7		1.05
15	0.75	0.0812863		0.083	0.75		2.06
16	0.8	0.0824193		0.0835	0.8		1.29
17	0.85	0.0835508		0.0845	0.85		1.12
18	0.9	0.0846808		0.0855	0.9		0.96
19	0.95	0.0858093		0.0865	0.95		0.80
20	1	0.0869366		0.0875	1		0.64

Tableau IV- 6: Résultats de simulation de la méthode de Runge-Kutta dans la pente positive

Chapitre IV : Résultats et interprétations

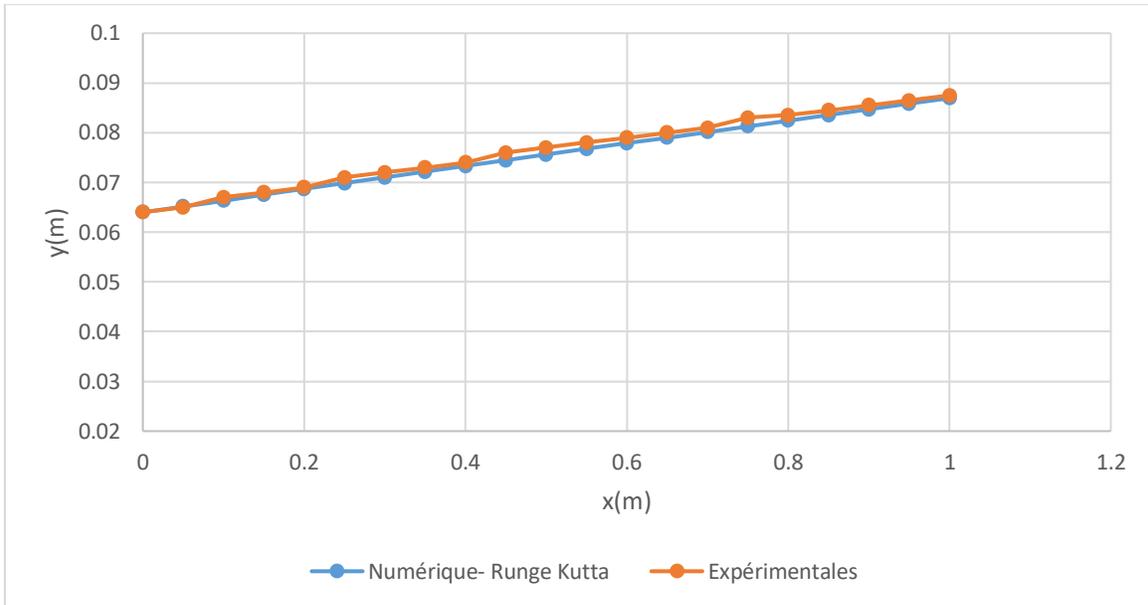


Figure IV- 16: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Runge-Kutta avec les résultats expérimentaux dans la pente positive

Interprétation : La méthode numérique (Runge-Kutta) est en bonne concordance avec l'expérience (l'erreur ne dépasse pas 2.06%).

IV.2.2.2.2. Pente négative

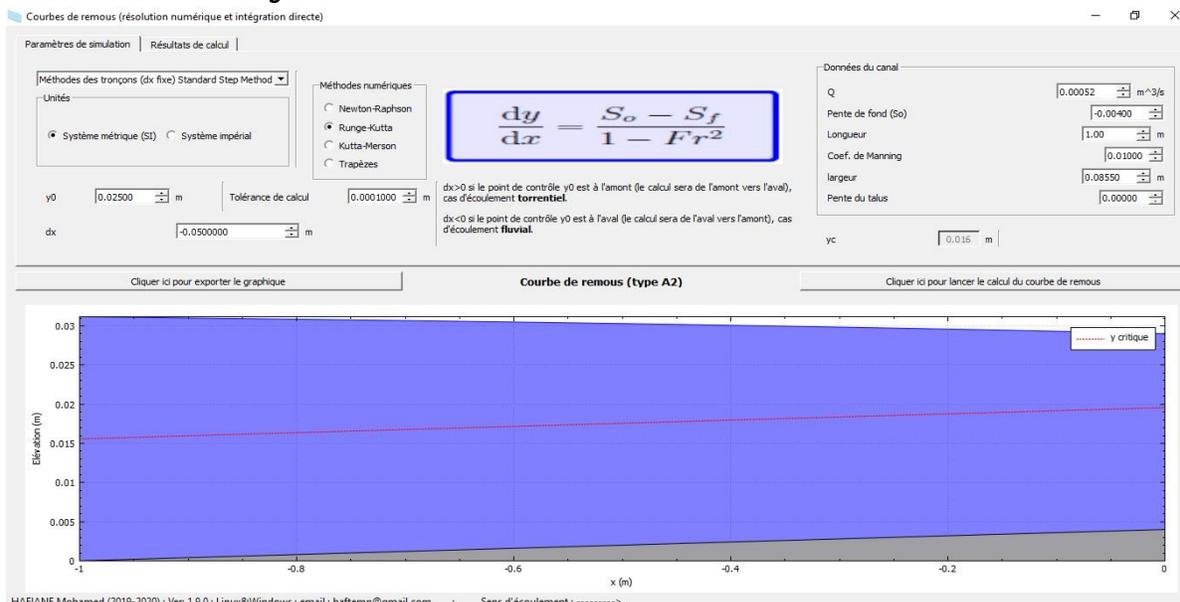


Figure IV- 17: Paramètres de simulation de la méthode de Runge-Kutta dans la pente négative

Chapitre IV : Résultats et interprétations

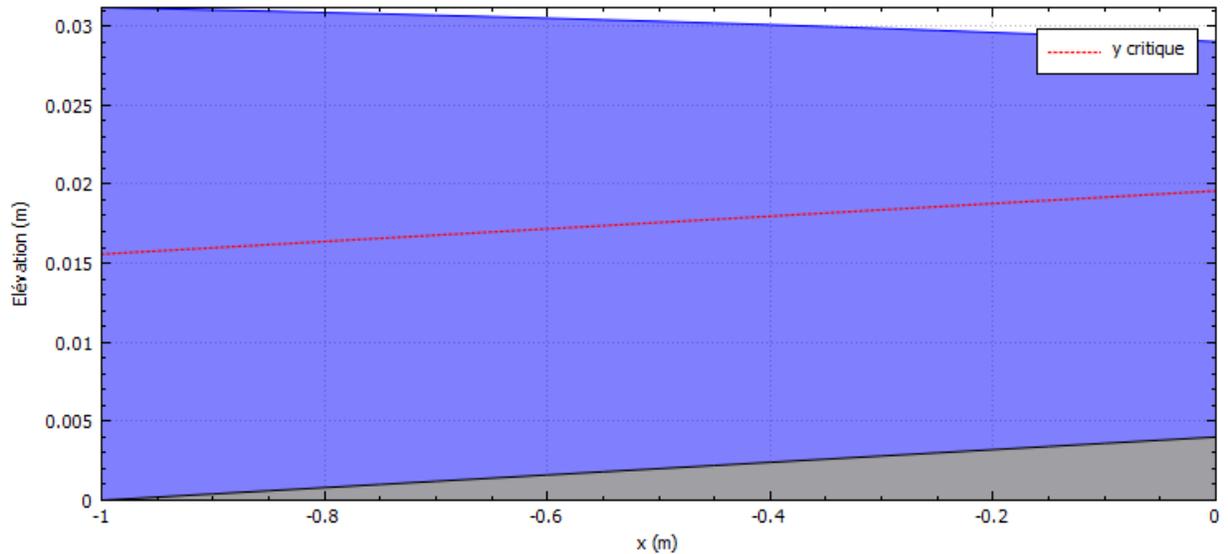


Figure IV- 18: Courbes de remous de type A2 de la méthode de Runge-Kutta dans la pente négative

i	x[i]	y2[i] RK		y2[i] Tab11	x[i] Tab11		Erreur %
0	0	0.025		0.025	0		0.00
1	-0.05	0.0253578		0.0253	0.05		0.23
2	-0.1	0.0257075		0.0256	0.1		0.42
3	-0.15	0.0260498		0.0259	0.15		0.58
4	-0.2	0.0263854		0.0262	0.2		0.71
5	-0.25	0.0267148		0.0265	0.25		0.81
6	-0.3	0.0270387		0.0268	0.3		0.89
7	-0.35	0.0273573		0.0271	0.35		0.95
8	-0.4	0.0276712		0.0274	0.4		0.99
9	-0.45	0.0279806		0.0277	0.45		1.01
10	-0.5	0.0282859		0.028	0.5		1.02
11	-0.55	0.0285874		0.0283	0.55		1.02
12	-0.6	0.0288852		0.0286	0.6		1.00
13	-0.65	0.0291797		0.0289	0.65		0.97
14	-0.7	0.0294709		0.0292	0.7		0.93
15	-0.75	0.0297592		0.0295	0.75		0.88
16	-0.8	0.0300447		0.0298	0.8		0.82
17	-0.85	0.0303275		0.0301	0.85		0.76
18	-0.9	0.0306077		0.0304	0.9		0.68
19	-0.95	0.0308856		0.0307	0.95		0.60
20	-1	0.0311612		0.0312	1		0.12

Tableau IV- 7: Résultats de simulation de la méthode de Runge-Kutta dans la pente négative

Chapitre IV : Résultats et interprétations

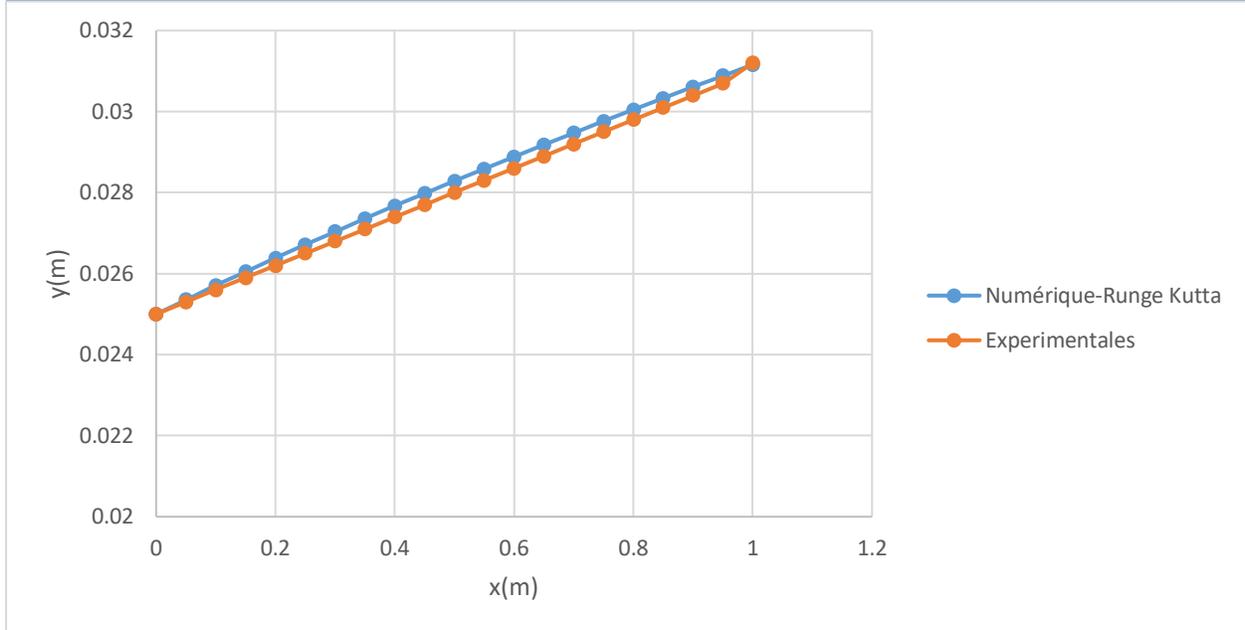


Figure IV- 19: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Runge-Kutta avec les résultats expérimentaux dans la pente négative

Interprétation : La méthode numérique (Runge-Kutta) est en bonne concordance avec l'expérience (l'erreur ne dépasse pas 1.02%).

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.2.2.3. Méthode de Kutta-Merson

IV.2.2.3.1. Pente positive

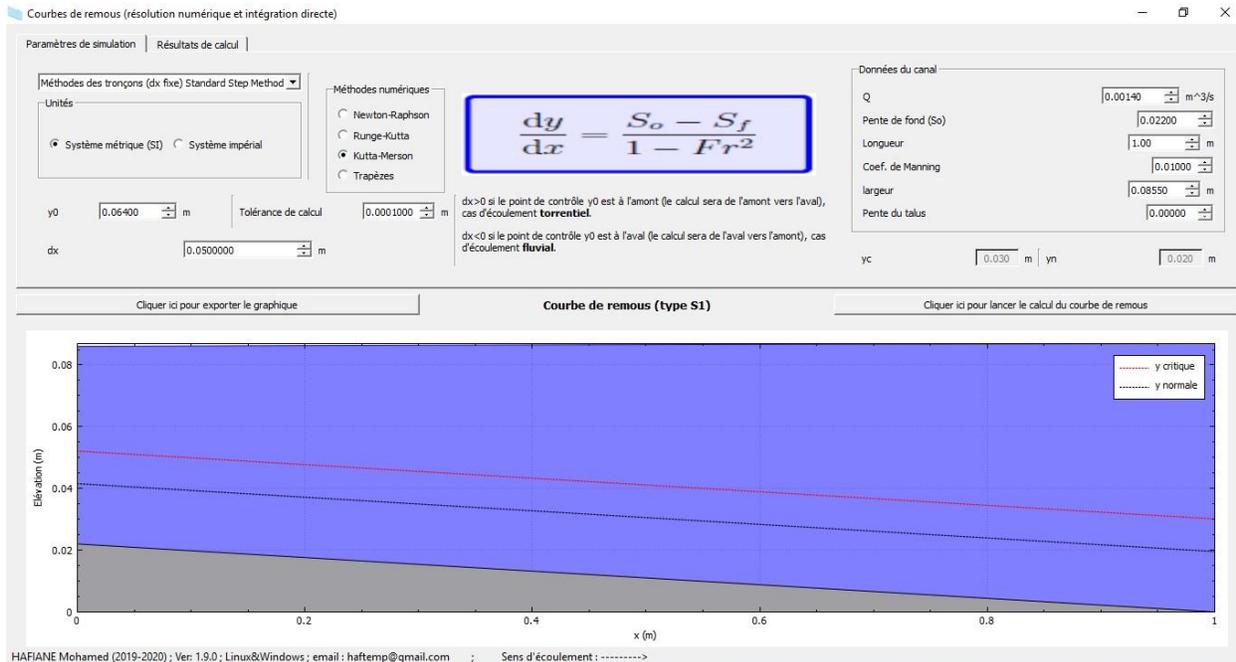


Figure IV- 20: Paramètres de simulation de la méthode de Kutta-Merson dans la pente positive

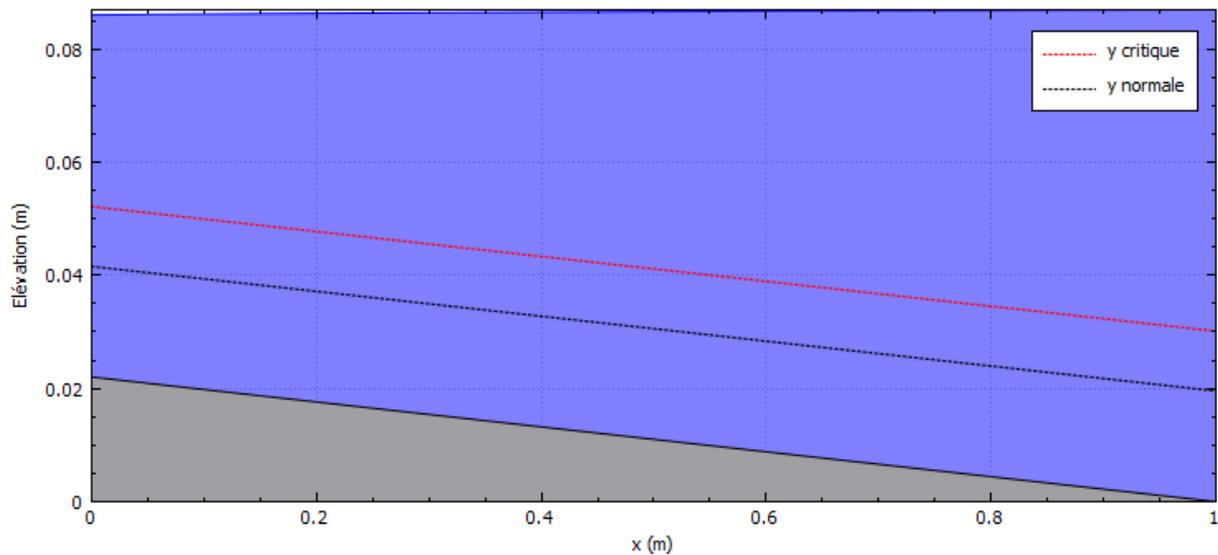


Figure IV- 21: Courbes de remous de type S1 de la méthode de Kutta-Merson dans la pente positive

Chapitre IV : Résultats et interprétations

i	x[i]	y2[i] yKM		y2[i] Tab5	x[i] Tab5		Erreur %
0	0	0.064		0.064	0		0.00
1	0.05	0.065175		0.065	0,05		-0.27
2	0.1	0.0663454		0.067	0,1		0.98
3	0.15	0.0675114		0.068	0,15		0.72
4	0.2	0.0686736		0.069	0,2		0.47
5	0.25	0.0698321		0.071	0,25		1.64
6	0.3	0.0709872		0.072	0,3		1.41
7	0.35	0.0721393		0.073	0,35		1.18
8	0.4	0.0732885		0.074	0,4		0.96
9	0.45	0.074435		0.076	0,45		2.06
10	0.5	0.0755791		0.077	0,5		1.85
11	0.55	0.0767209		0.078	0,55		1.64
12	0.6	0.0778605		0.079	0,6		1.44
13	0.65	0.0789982		0.08	0,65		1.25
14	0.7	0.080134		0.081	0,7		1.07
15	0.75	0.081268		0.083	0,75		2.09
16	0.8	0.0824004		0.0835	0,8		1.32
17	0.85	0.0835312		0.0845	0,85		1.15
18	0.9	0.0846607		0.0855	0,9		0.98
19	0.95	0.0857887		0.0865	0,95		0.82
20	1	0.0869155		0.0875	1		0.67

Tableau IV- 8: Résultats de simulation de la méthode de Kutta-Merson dans la pente positive

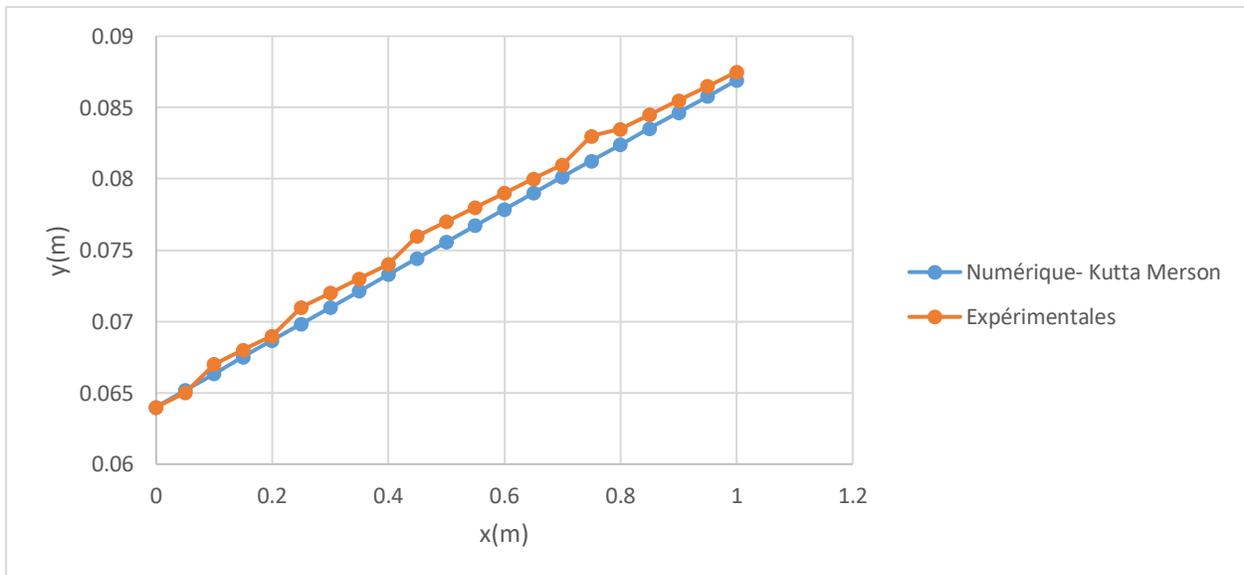


Figure IV- 22: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Kutta-Merson avec les résultats expérimentaux dans la pente positive

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Interprétation : La méthode numérique (Kutta-Merson) est en bonne concordance avec l'expérience (l'erreur ne dépasse pas 2.09%).

IV.2.2.3.2. *Pente négative*

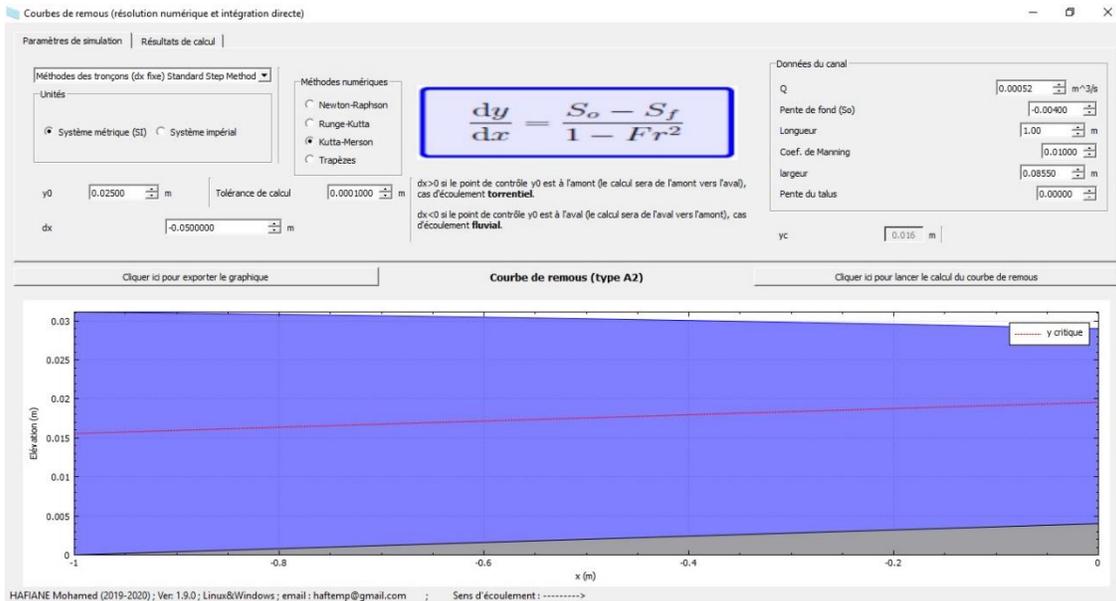


Figure IV- 23: Paramètres de simulation de la méthode de Kutta-Merson dans la pente négative

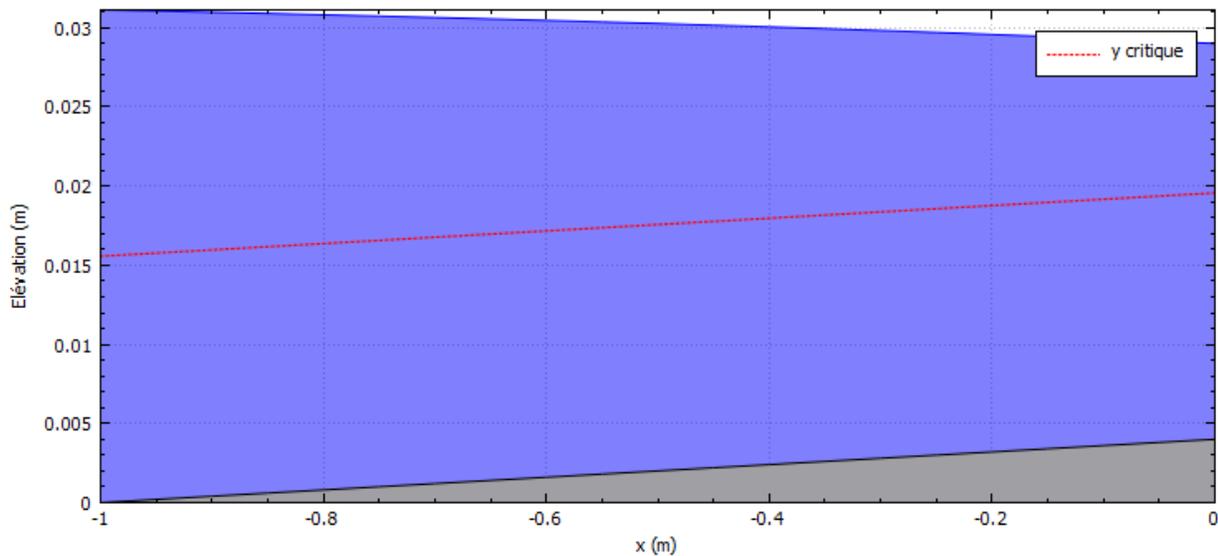


Figure IV- 24: Courbes de remous de type A2 de la méthode de Kutta-Merson dans la pente négative

Chapitre IV : Résultats et interprétations

i	x[i]	y2[i] KM		y2[i] Tab11	x[i] Tab11		Erreur %
0	0	0.025		0.025	0		0.00
1	-0.05	0.0253544		0.0253	0.05		0.22
2	-0.1	0.025701		0.0256	0.1		0.39
3	-0.15	0.0260406		0.0259	0.15		0.54
4	-0.2	0.0263737		0.0262	0.2		0.66
5	-0.25	0.026701		0.0265	0.25		0.76
6	-0.3	0.0270229		0.0268	0.3		0.83
7	-0.35	0.0273398		0.0271	0.35		0.88
8	-0.4	0.027652		0.0274	0.4		0.92
9	-0.45	0.0279599		0.0277	0.45		0.94
10	-0.5	0.0282639		0.028	0.5		0.94
11	-0.55	0.0285641		0.0283	0.55		0.93
12	-0.6	0.0288607		0.0286	0.6		0.91
13	-0.65	0.0291541		0.0289	0.65		0.88
14	-0.7	0.0294444		0.0292	0.7		0.84
15	-0.75	0.0297317		0.0295	0.75		0.79
16	-0.8	0.0300163		0.0298	0.8		0.73
17	-0.85	0.0302983		0.0301	0.85		0.66
18	-0.9	0.0305778		0.0304	0.9		0.58
19	-0.95	0.030855		0.0307	0.95		0.50
20	-1	0.0311299		0.0312	1		0.22

Tableau IV- 9: Résultats de simulation de la méthode de Kutta-Merson dans la pente négative

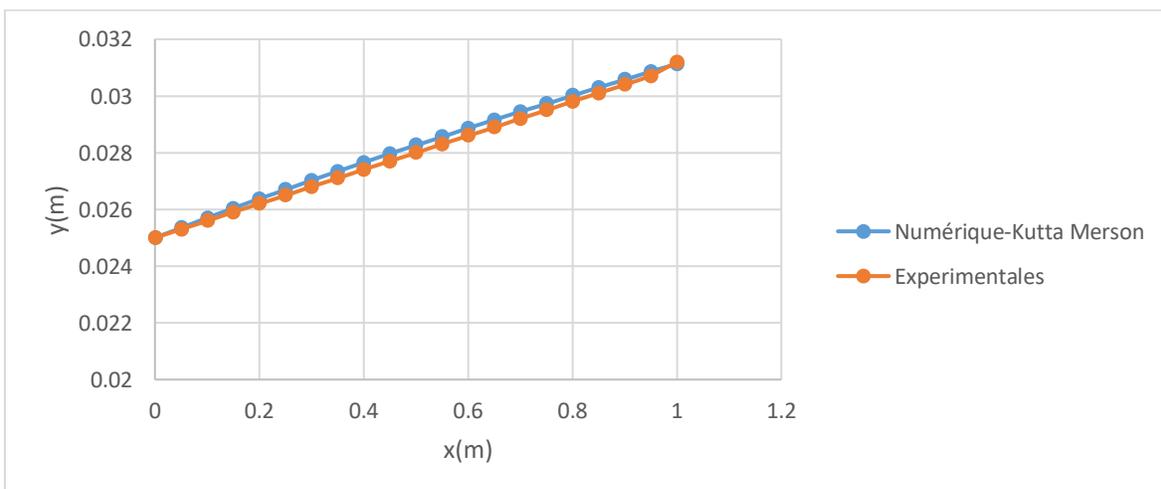


Figure IV- 25: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Kutta-Merson avec les résultats expérimentaux dans la pente négative

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Interprétation : La méthode numérique (Kutta-Merson) est en bonne concordance avec l'expérience (l'erreur ne dépasse pas 0.94%).

IV.2.2.4. Méthode de Trapèzes

IV.2.2.4.1. Pente positive

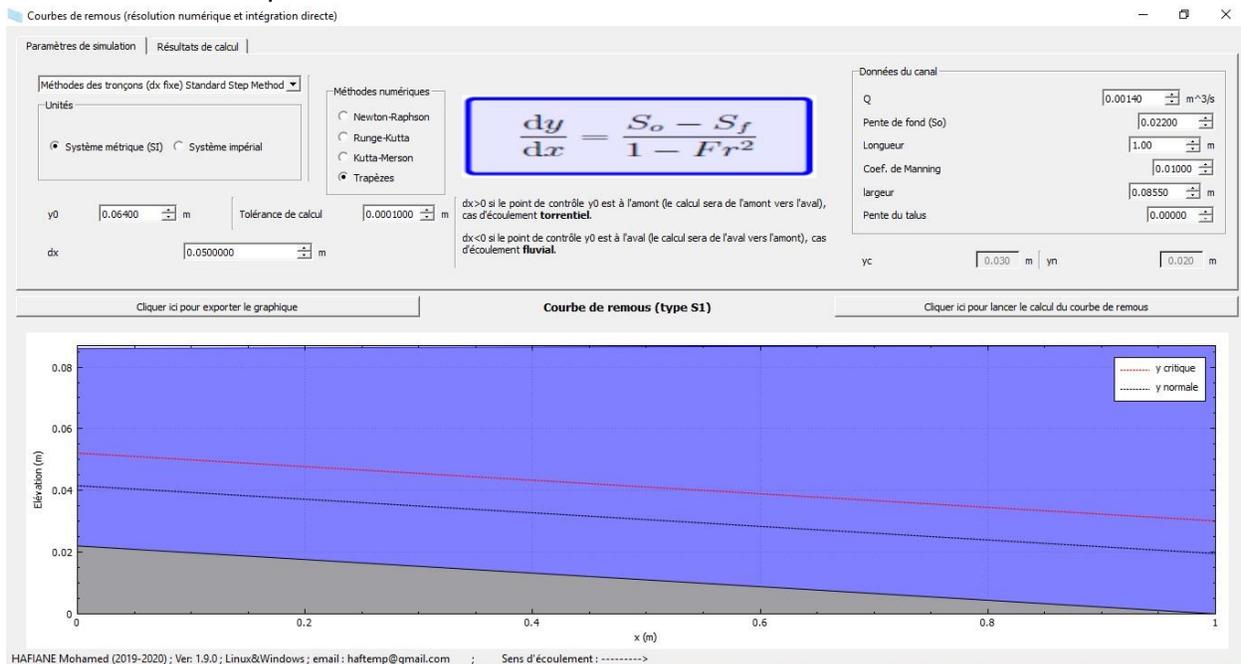


Figure IV- 26: Paramètres de simulation de la méthode de Trapèzes dans la pente positive

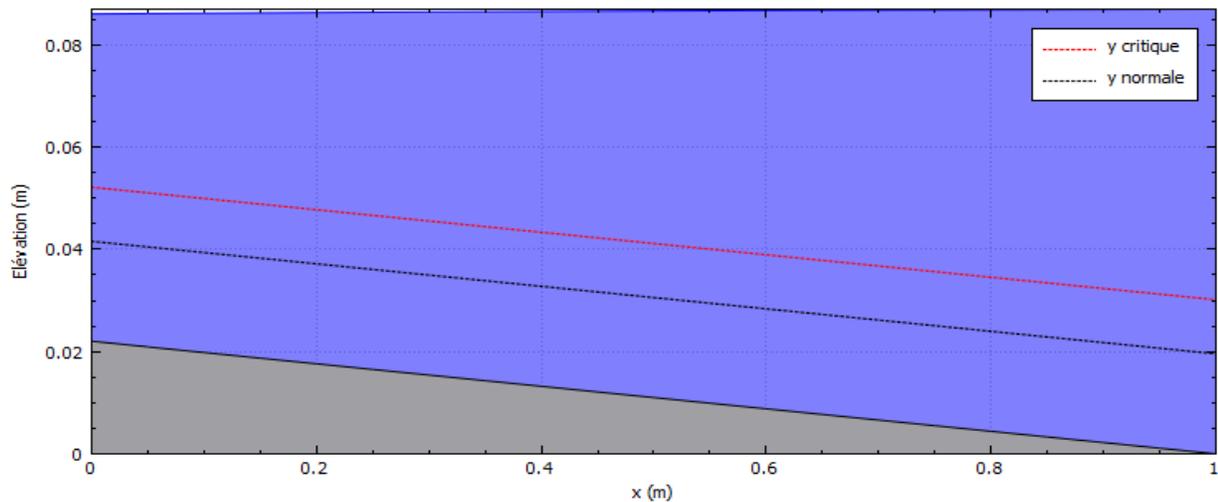


Figure IV- 27: Courbes de remous de type S1 de la méthode de Trapèzes dans la pente positive

Chapitre IV : Résultats et interprétations

i	x[i]	y2[i] Trapèze		y2[i] Tab5	x[i] Tab5		Erreur %
0	0	0.064		0.064	0		0.00
1	0.05	0.0651771		0.065	0,05		-0.27
2	0.1	0.0663494		0.067	0,1		0.97
3	0.15	0.0675172		0.068	0,15		0.71
4	0.2	0.0686809		0.069	0,2		0.46
5	0.25	0.0698409		0.071	0,25		1.63
6	0.3	0.0709974		0.072	0,3		1.39
7	0.35	0.0721507		0.073	0,35		1.16
8	0.4	0.073301		0.074	0,4		0.94
9	0.45	0.0744486		0.076	0,45		2.04
10	0.5	0.0755937		0.077	0,5		1.83
11	0.55	0.0767364		0.078	0,55		1.62
12	0.6	0.0778769		0.079	0,6		1.42
13	0.65	0.0790153		0.08	0,65		1.23
14	0.7	0.0801518		0.081	0,7		1.05
15	0.75	0.0812866		0.083	0,75		2.06
16	0.8	0.0824196		0.0835	0,8		1.29
17	0.85	0.0835511		0.0845	0,85		1.12
18	0.9	0.084681		0.0855	0,9		0.96
19	0.95	0.0858096		0.0865	0,95		0.80
20	1	0.0869369		0.0875	1		0.64

Tableau IV- 10: Résultats de simulation de la méthode de Trapèze dans la pente positive

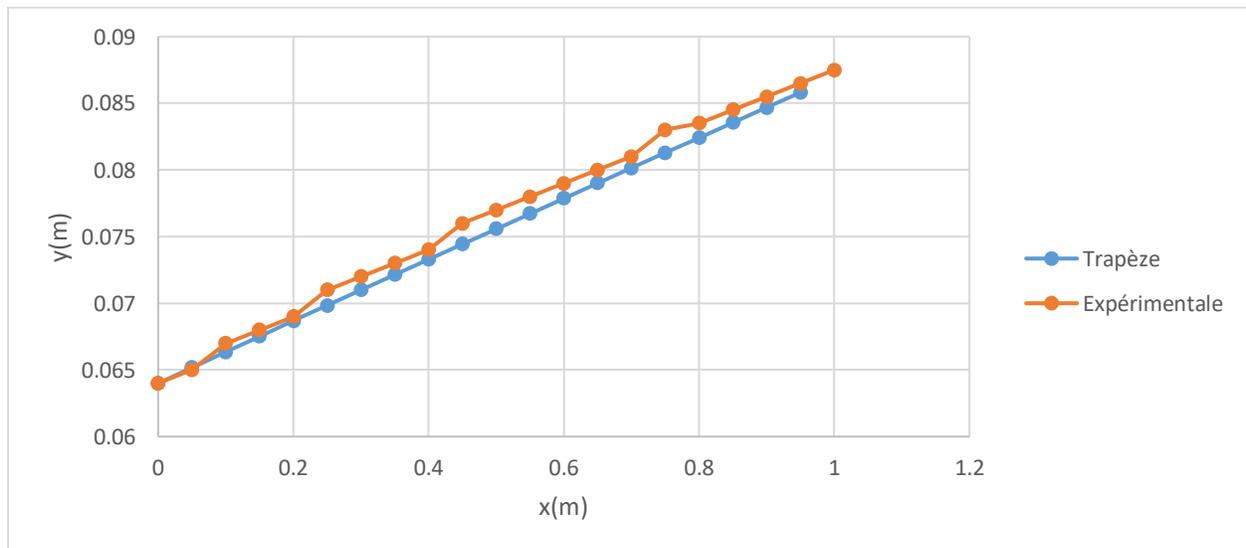


Figure IV- 28: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Trapèzes avec les résultats expérimentaux dans la pente positive

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Interprétation : La méthode numérique (Trapèzes) est en bonne concordance avec l'expérience (l'erreur ne dépasse pas 2.06%).

IV.2.2.4.2. Pente négative

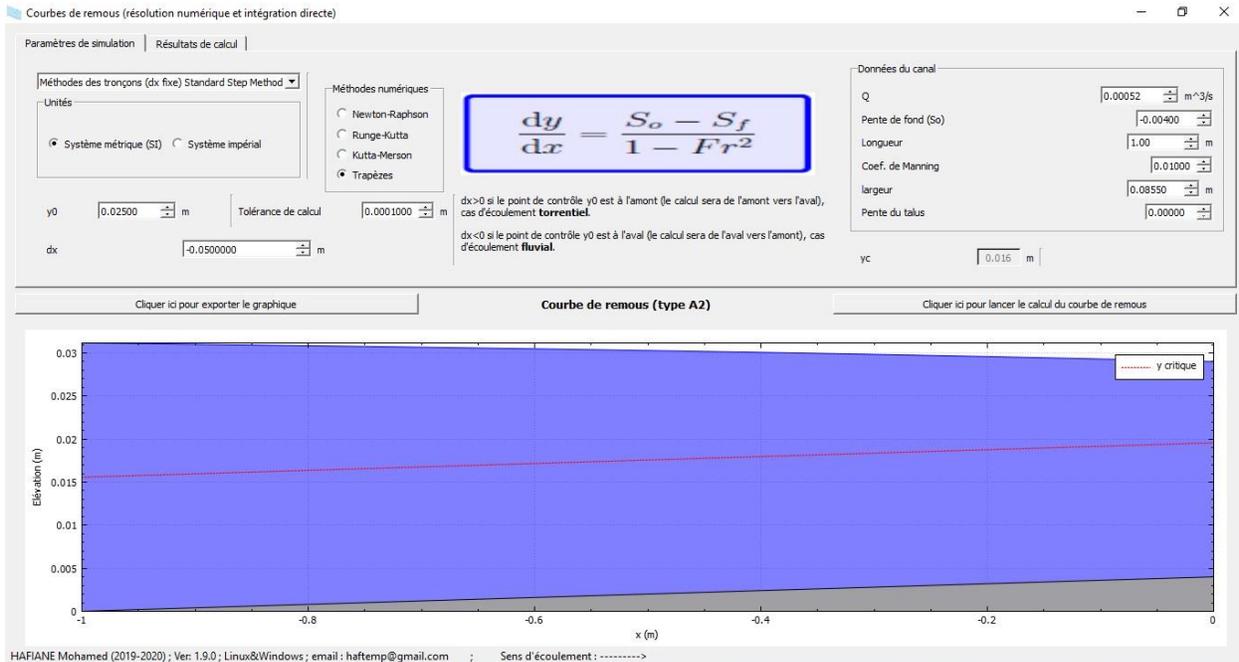


Figure IV- 29: Paramètres de simulation de la méthode de Trapèzes dans la pente négative

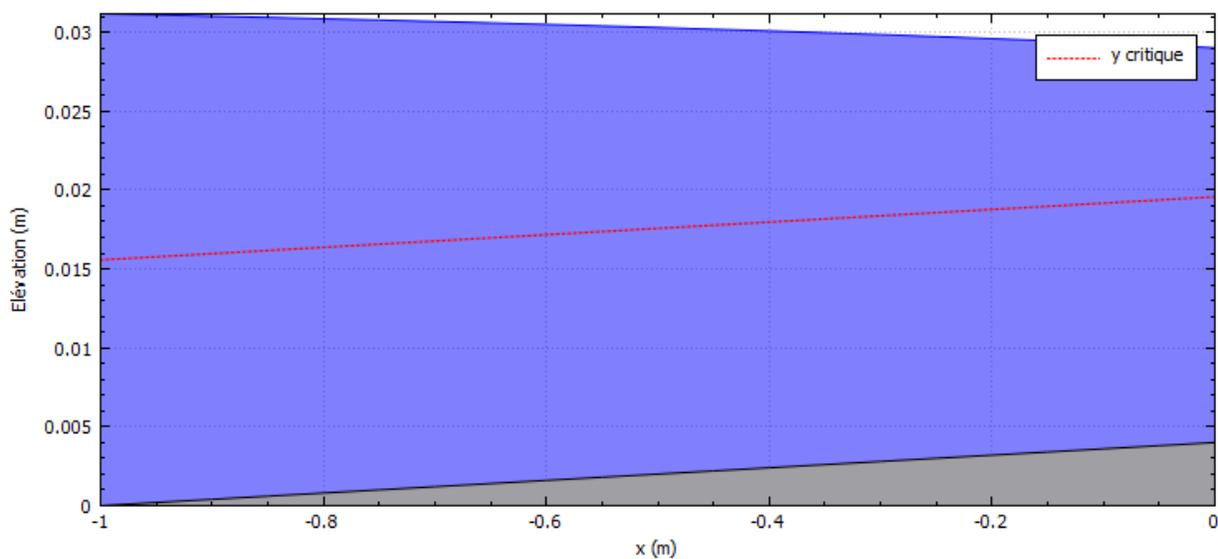


Figure IV- 30: Courbes de remous de type A2 de la méthode de Trapèzes dans la pente négative

Chapitre IV : Résultats et interprétations

i	x[i]	y2[i] Tra		y2[i] Tab11	x[i] Tab11		Erreur %
0	0	0.025		0.025	0		0.00
1	-0.05	0.0253579		0.0253	0.05		0.23
2	-0.1	0.0257075		0.0256	0.1		0.42
3	-0.15	0.0260499		0.0259	0.15		0.58
4	-0.2	0.0263855		0.0262	0.2		0.71
5	-0.25	0.0267149		0.0265	0.25		0.81
6	-0.3	0.0270388		0.0268	0.3		0.89
7	-0.35	0.0273575		0.0271	0.35		0.95
8	-0.4	0.0276713		0.0274	0.4		0.99
9	-0.45	0.0279808		0.0277	0.45		1.01
10	-0.5	0.0282861		0.028	0.5		1.02
11	-0.55	0.0285875		0.0283	0.55		1.02
12	-0.6	0.0288854		0.0286	0.6		1.00
13	-0.65	0.0291798		0.0289	0.65		0.97
14	-0.7	0.0294711		0.0292	0.7		0.93
15	-0.75	0.0297594		0.0295	0.75		0.88
16	-0.8	0.0300449		0.0298	0.8		0.82
17	-0.85	0.0303277		0.0301	0.85		0.76
18	-0.9	0.0306079		0.0304	0.9		0.68
19	-0.95	0.0308858		0.0307	0.95		0.61
20	-1	0.0311614		0.0312	1		0.12

Tableau IV- 11: Résultats de simulation de la méthode de Trapèze dans la pente négative

Chapitre IV : Résultats et interprétations

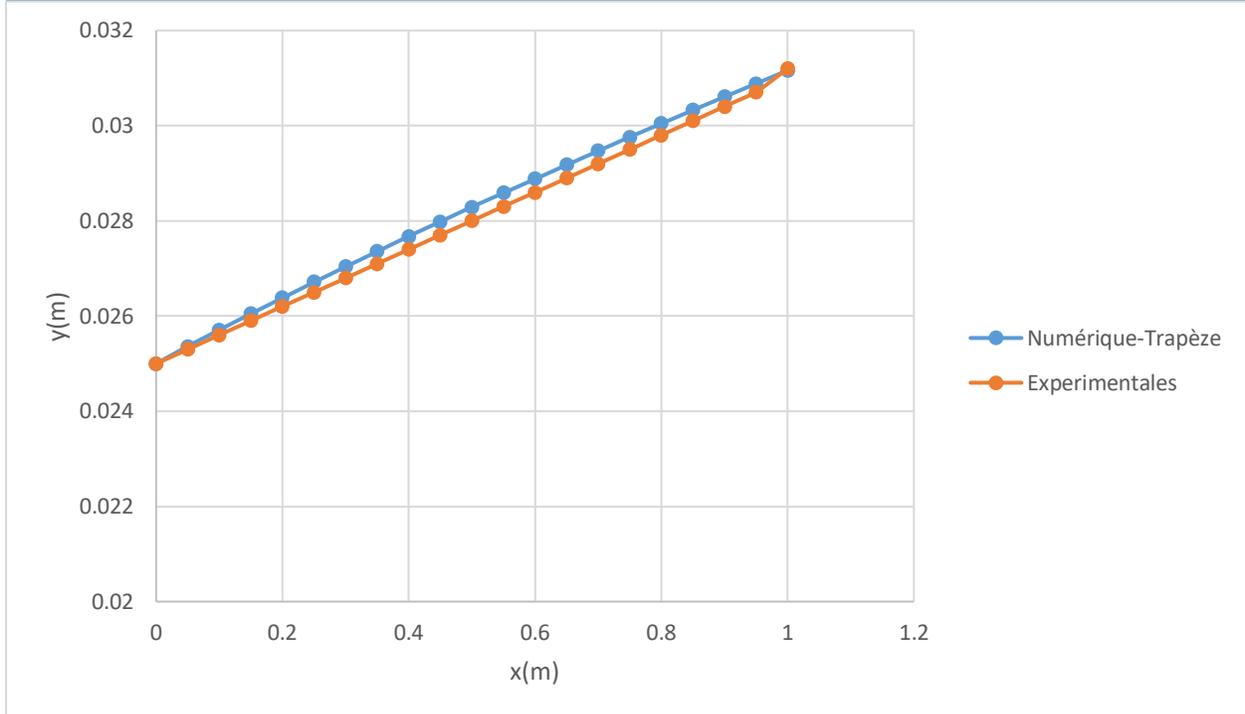


Figure IV- 31: Comparaison des résultats de simulation de la méthode de Trapèzes avec les résultats expérimentaux dans la pente négative

Interprétation : La méthode numérique (Trapèzes) est en bonne concordance avec l'expérience (l'erreur ne dépasse pas 1.02%).

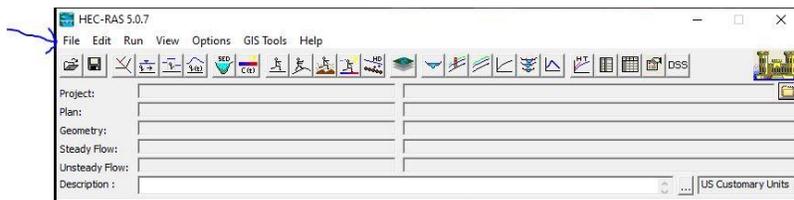
Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.3. Résultats obtenues par HEC-RAS

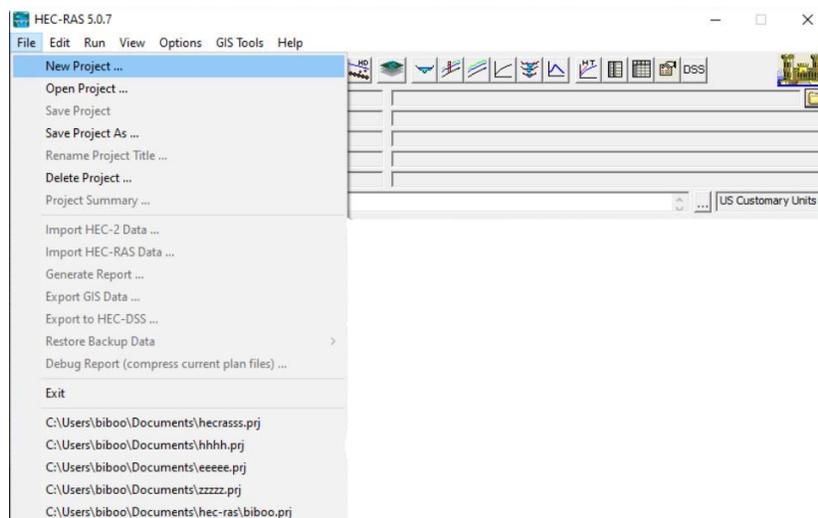
IV.3.1. Description de la méthode d'HEC-RAS dans la pente positive

Dans la pente positive nous avons suivi les étapes sous HEC-RAS comme la montre les figures ci-dessous :

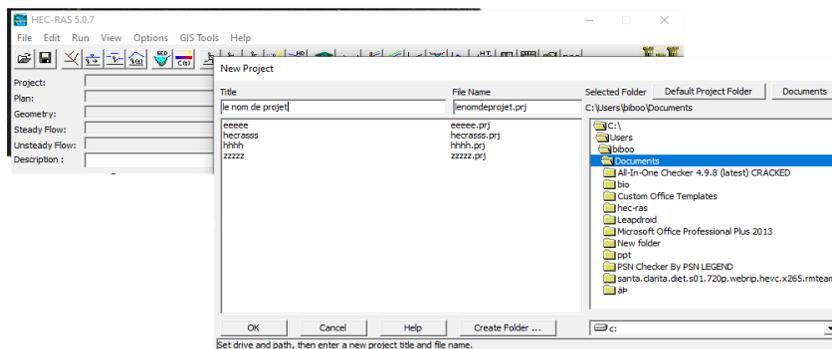
1- Ouvrir le programme HEC-RAS et Cliquer sur « File »



2- Une clique sur « New Project »



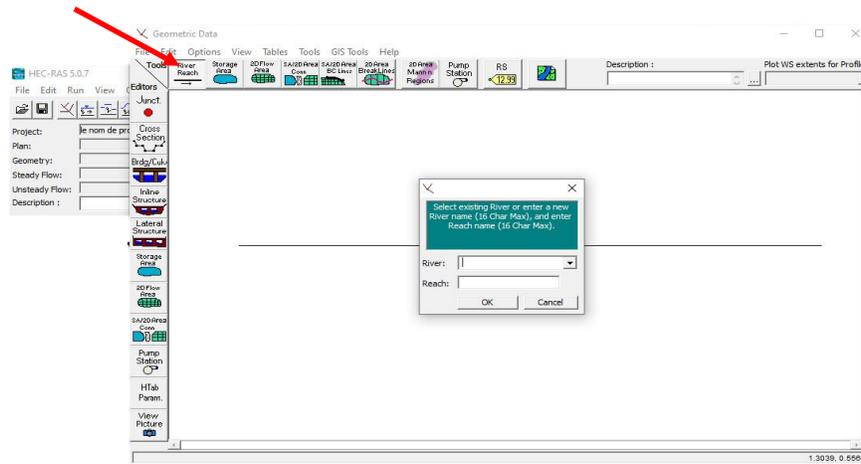
3- Nommer le projet et changer la location de l'enregistrement



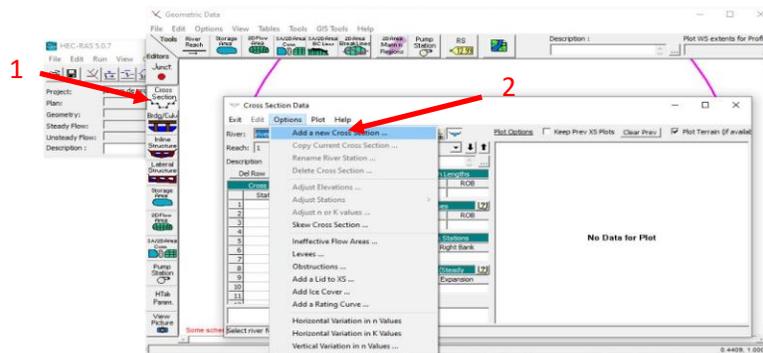
Chapitre IV : Résultats et interprétations

Une clique sur l'icône « View/Edit »

Une clique sur “ River Reach ” et designer la ligne du canal et donner son nom

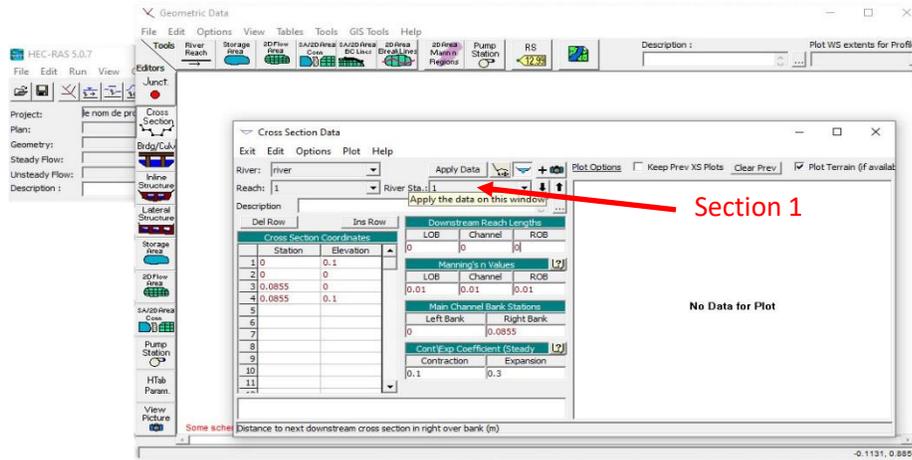


4- Enter les sections
Section Positive :

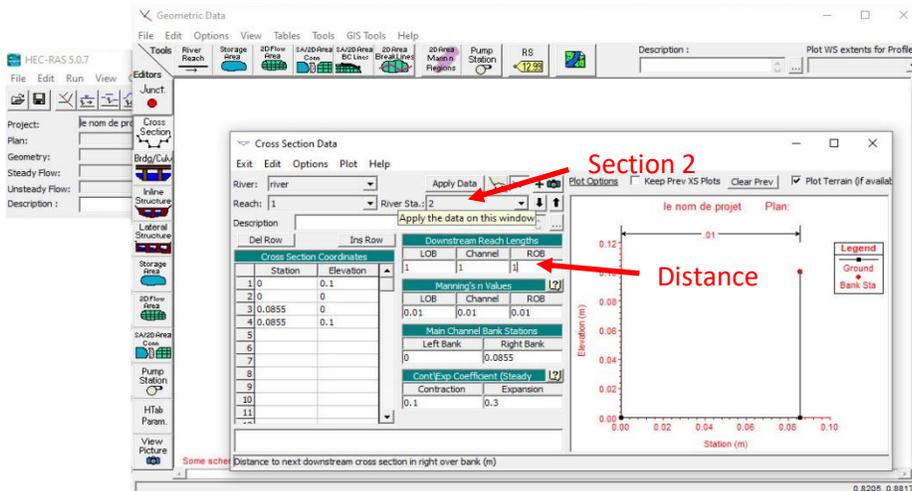
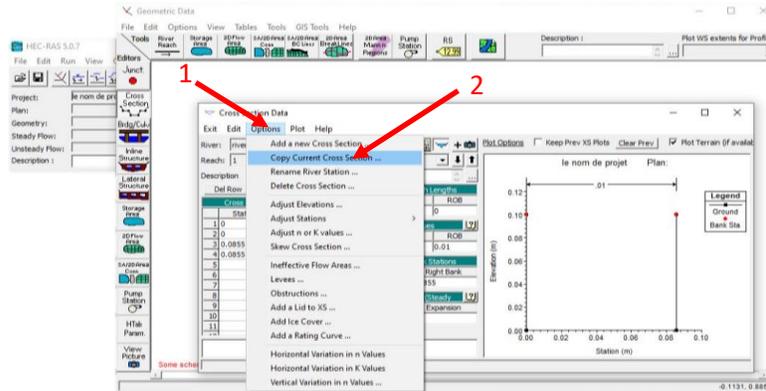


Chapitre IV : Résultats et interprétations

La première section :

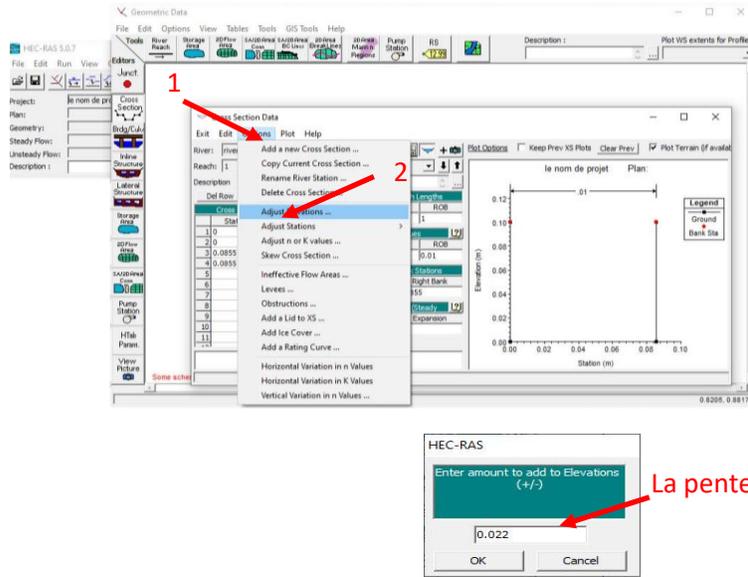


Dans la deuxième section : il faudra copier les mêmes données de la section 1 et modifier la distance qui égale de 1 mètre.

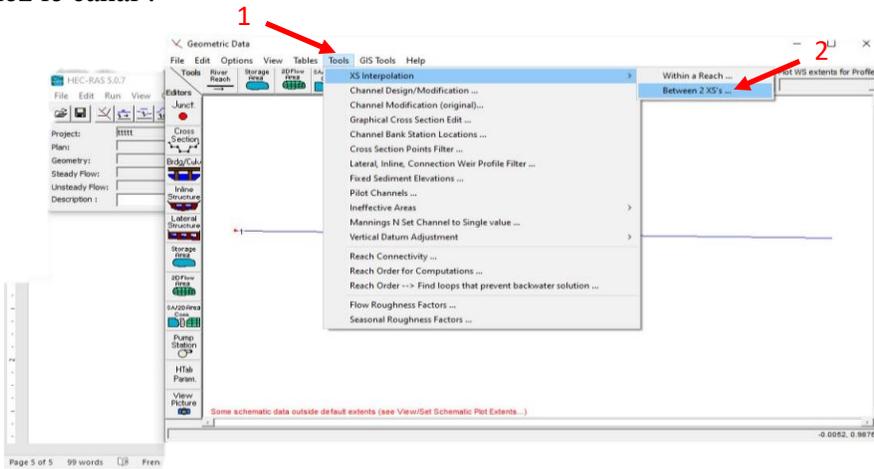


Chapitre IV : Résultats et interprétations

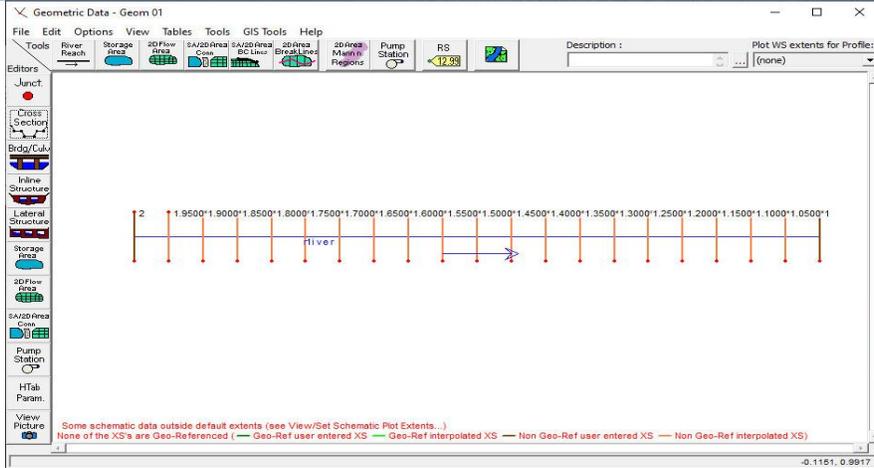
5- Entrée la pente :



6- Devisiez le canal :

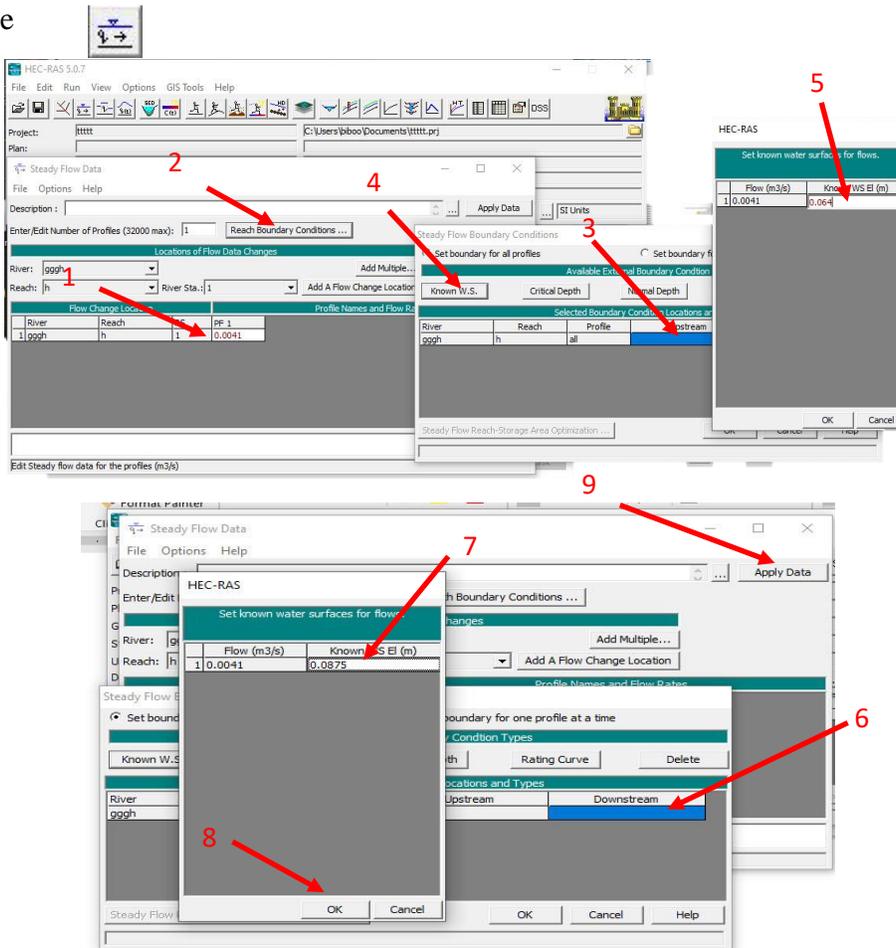


Chapitre IV : Résultats et interprétations



7- Entrée le débit :

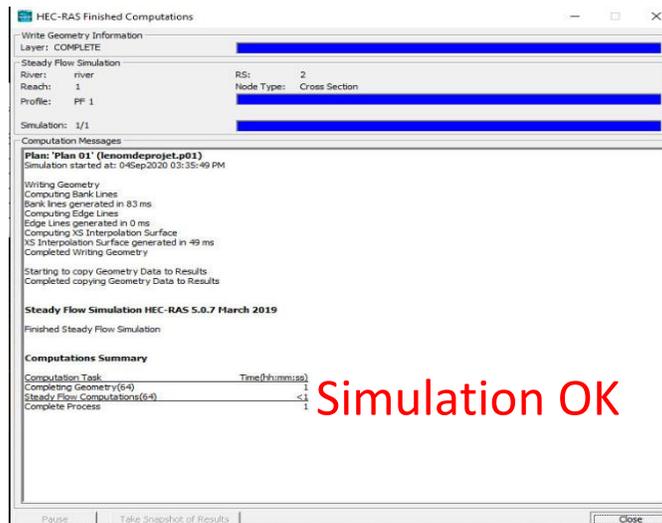
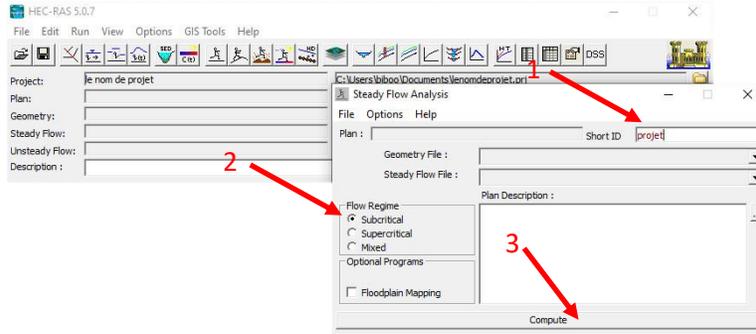
Clic sur icone



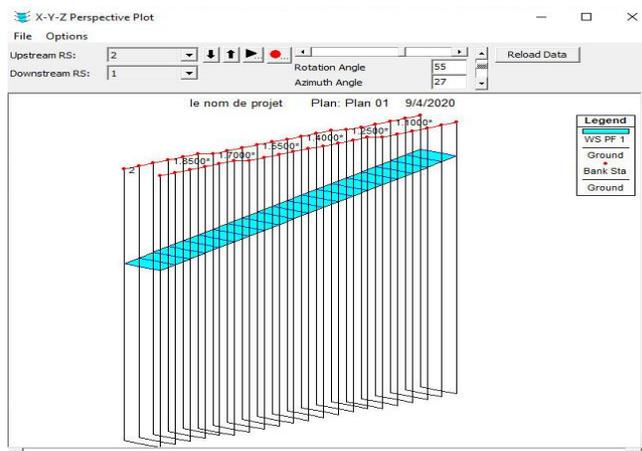
Chapitre IV : Résultats et interprétations

8- Simulation :

Click sur icone



9- Vue 3D de canal :



Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.3.2. Résultats d'HEC-RAS de la pente positive

Reach	River Sta	Profile	W.S. Elev (m)	X (m)	y HEC-RAS (m)	Y exp tab5 (m)	Erreur %	x[i]	y2[i] NM	X	y2[i] YRK	y2[i] yKM	y2[i] Trapèze
2		2 PF 1	0.08708	0	0.06508	0.064	1.69		-1	0.0645896	0	0.064	0.064
2	1.9500*	PF 1	0.08711	0.05	0.06621	0.065	1.86		-0.95	0.0657641	0.05	0.0651771	0.065175
2	1.9000*	PF 1	0.08713	0.1	0.06733	0.067	0.49		-0.9	0.0669341	0.1	0.0663493	0.0663454
2	1.8500*	PF 1	0.08717	0.15	0.06847	0.068	0.69		-0.85	0.0680998	0.15	0.0675171	0.0675114
2	1.8000*	PF 1	0.08718	0.2	0.06958	0.069	0.84		-0.8	0.0692615	0.2	0.0686808	0.0686736
2	1.7500*	PF 1	0.08727	0.25	0.07077	0.071	0.32		-0.75	0.0704197	0.25	0.0698407	0.0698321
2	1.7000*	PF 1	0.08728	0.3	0.07188	0.072	0.17		-0.7	0.0715745	0.3	0.0709972	0.0709974
2	1.6500*	PF 1	0.08729	0.35	0.07299	0.073	0.01		-0.65	0.0727263	0.35	0.0721505	0.0721507
2	1.6000*	PF 1	0.08731	0.4	0.07411	0.074	0.15		-0.6	0.0738752	0.4	0.0733008	0.0732885
2	1.5500*	PF 1	0.08733	0.45	0.07523	0.076	1.01		-0.55	0.0750215	0.45	0.0744484	0.0744435
2	1.5000*	PF 1	0.08734	0.5	0.07634	0.077	0.86		-0.5	0.0761654	0.5	0.0755935	0.0755791
2	1.4500*	PF 1	0.08735	0.55	0.07745	0.078	0.71		-0.45	0.0773069	0.55	0.0767362	0.0767209
2	1.4000*	PF 1	0.08736	0.6	0.07856	0.079	0.56		-0.4	0.0784464	0.6	0.0778766	0.0778605
2	1.3500*	PF 1	0.08738	0.65	0.07968	0.08	0.40		-0.35	0.0795838	0.65	0.0790151	0.0789982
2	1.3000*	PF 1	0.08739	0.7	0.08079	0.081	0.26		-0.3	0.0807194	0.7	0.0801516	0.080134
2	1.2500*	PF 1	0.08744	0.75	0.08194	0.083	1.28		-0.25	0.0818533	0.75	0.0812863	0.081268
2	1.2000*	PF 1	0.08745	0.8	0.08305	0.0835	0.54		-0.2	0.0829855	0.8	0.0824193	0.0824004
2	1.1500*	PF 1	0.08746	0.85	0.08416	0.0845	0.40		-0.15	0.0841162	0.85	0.0835508	0.0835312
2	1.1000*	PF 1	0.08746	0.9	0.08526	0.0855	0.28		-0.1	0.0852455	0.9	0.0846808	0.0846607
2	1.0500*	PF 1	0.08748	0.95	0.08638	0.0865	0.14		-0.05	0.0863734	0.95	0.0858093	0.0857887
2		1 PF 1	0.08748	1	0.08748	0.0875	0.02		0	0.0875	1	0.0869366	0.0869155

Tableau IV- 12: Résultats de simulations d'HEC-RAS avec les résultats de toute les autres méthodes numériques de la pente positive

Interprétation : ce tableau montre les résultats obtenus par HEC-RAS ainsi que les résultats des méthodes numériques de la pente positive.

Nous remarquons que les résultats obtenus par HEC-RAS sont en bonne concordance avec l'expérience (l'erreur ne dépasse pas 1.86%).

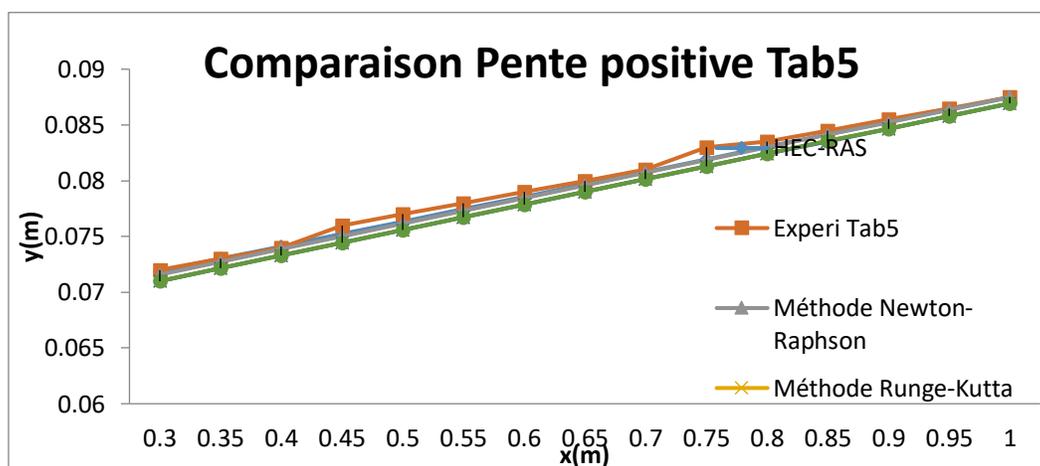


Figure IV- 32: Comparaison des résultats d'HEC-RAS avec les méthodes numériques de la pente positive

Interprétation : Cette figure représente une comparaison des résultats d'HEC-RAS avec ceux obtenus par les méthodes numériques en utilisant l'application « hydraulics-channel-gvf » tels que : méthode Newton-Raphson ; Range-Kutta, Kutta Merson et la méthode de Trapèzes.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Nous constatons que les méthodes numériques développées dans l'application « hydraulics-channel-gvf » nous donne des résultats proches que les résultats obtenus par HEC-RAS.

Nous concluons que ses méthodes numériques sont efficaces et ont une bonne performance.

IV.3.3. Description de la méthode d'HEC-RAS dans la pente négative

Dans la pente négative nous avons suivi les étapes sous HEC-RAS comme la montre les figures ci-dessous :

The screenshots illustrate the configuration steps in HEC-RAS:

- 1:** Main HEC-RAS interface showing project and plan information.
- 2:** 'Locations of Flow Data Changes' dialog box where 'River Sta.: 2' is entered.
- 3:** 'Steady Flow Data - flow' dialog box with 'Apply Data' button.
- 4:** 'Steady Flow Boundary Conditions' dialog box with 'Rating Curve' selected.
- 5:** 'Available External Boundary Condition Types' dialog box.
- 6:** 'Set known water surfaces for flows' dialog box with 'Flow (m3/s)' set to 0.00052 and 'Known WS El (m)' set to 0.025.
- 7:** 'OK' button in the 'Set known water surfaces for flows' dialog.
- 8:** 'Apply Data' button in the 'Steady Flow Data - flow' dialog.

la simulation

10

The 'Profile Output Table - Standard Table 1' displays the following data:

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude #	Chl
1	2	PF 1	0.00	0.00	0.02716	0.02909	0.000800	0.19	0.00	0.09	0.35		
1	1.9500**	PF 1	0.00	0.00	0.02713	0.02905	0.000795	0.19	0.00	0.09	0.35		
1	1.9000**	PF 1	0.00	0.00	0.02708	0.02901	0.000798	0.19	0.00	0.09	0.35		
1	1.8500**	PF 1	0.00	0.00	0.02689	0.02896	0.000883	0.20	0.00	0.09	0.37		
1	1.8000**	PF 1	0.00	0.00	0.02684	0.02891	0.000887	0.20	0.00	0.09	0.37		
1	1.7500**	PF 1	0.00	0.00	0.02679	0.02887	0.000891	0.20	0.00	0.09	0.37		
1	1.7000**	PF 1	0.00	0.00	0.02674	0.02882	0.000896	0.20	0.00	0.09	0.37		
1	1.6500**	PF 1	0.00	0.00	0.02668	0.02878	0.000900	0.20	0.00	0.09	0.38		
1	1.6000**	PF 1	0.00	0.00	0.02664	0.02872	0.001004	0.21	0.00	0.09	0.40		
1	1.5500**	PF 1	0.00	0.00	0.02639	0.02867	0.001010	0.21	0.00	0.09	0.40		
1	1.5000**	PF 1	0.00	0.00	0.02633	0.02862	0.001016	0.21	0.00	0.09	0.40		
1	1.4500**	PF 1	0.00	0.00	0.02627	0.02857	0.001022	0.21	0.00	0.09	0.40		
1	1.4000**	PF 1	0.00	0.00	0.02621	0.02852	0.001026	0.21	0.00	0.09	0.40		
1	1.3500**	PF 1	0.00	0.00	0.02586	0.02844	0.001208	0.23	0.00	0.09	0.44		
1	1.3000**	PF 1	0.00	0.00	0.02578	0.02838	0.001217	0.23	0.00	0.09	0.44		
1	1.2500**	PF 1	0.00	0.00	0.02571	0.02832	0.001227	0.23	0.00	0.09	0.44		
1	1.2000**	PF 1	0.00	0.00	0.02563	0.02826	0.001237	0.23	0.00	0.09	0.45		
1	1.1500**	PF 1	0.00	0.00	0.02556	0.02820	0.001247	0.23	0.00	0.09	0.45		
1	1.1000**	PF 1	0.00	0.00	0.02520	0.02812	0.001433	0.24	0.00	0.09	0.48		
1	1.0500**	PF 1	0.00	0.00	0.02511	0.02805	0.001448	0.24	0.00	0.09	0.48		
1	1	PF 1	0.00	0.00	0.02499	0.02798	0.001480	0.24	0.00	0.09	0.49		

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.3.4. Résultats d'HEC-RAS de la pente négative

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl	y HEC-RAS (m)	Y HEC-RAS inversé (m)	Y Expérimentales (m)	Erreur %	y2[i] NR (m)	X[i]	y2[i] YRK (m)	y2[i] YKM (m)	y2[i] Trapèze (m)
1	2	PF 1	0.00052	-0.00396	0.02716	0.02909	0.0008	0.19438	0	0.09	0.35	0.03112	0.02499	0.025	0.04	0.025	0	0.025	0.025	0.025
1	1.9500*	PF 1	0.00052	-0.00396	0.02713	0.02905	0.000795	0.19391	0	0.09	0.35	0.03109	0.02511	0.0253	0.75	0.0253579	0.05	0.0253578	0.0253544	0.0253579
1	1.9000*	PF 1	0.00052	-0.00396	0.02708	0.02901	0.000798	0.19419	0	0.09	0.35	0.03104	0.0252	0.0256	1.56	0.0257075	0.1	0.0257075	0.025701	0.0257075
1	1.8500*	PF 1	0.00052	-0.00305	0.02689	0.02896	0.000883	0.20138	0	0.09	0.37	0.02994	0.02647	0.0259	2.20	0.0260499	0.15	0.0260498	0.0260406	0.0260499
1	1.8000*	PF 1	0.00052	-0.00305	0.02684	0.02891	0.000887	0.20172	0	0.09	0.37	0.02989	0.02654	0.0262	1.30	0.0263855	0.2	0.0263854	0.0263737	0.0263855
1	1.7500*	PF 1	0.00052	-0.00305	0.02679	0.02887	0.000891	0.20207	0	0.09	0.37	0.02984	0.02662	0.0265	0.45	0.0267149	0.25	0.0267148	0.026701	0.0267149
1	1.7000*	PF 1	0.00052	-0.00305	0.02674	0.02882	0.000896	0.20242	0	0.09	0.37	0.02979	0.02669	0.0268	0.41	0.0270388	0.3	0.0270387	0.0270229	0.0270388
1	1.6500*	PF 1	0.00052	-0.00305	0.02668	0.02878	0.0009	0.20278	0	0.09	0.38	0.02973	0.02677	0.0271	1.22	0.0273575	0.35	0.0273573	0.0273398	0.0273575
1	1.6000*	PF 1	0.00052	-0.00213	0.02645	0.02872	0.001004	0.21091	0	0.09	0.4	0.02858	0.02834	0.0274	3.43	0.0276713	0.4	0.0276712	0.027652	0.0276713
1	1.5500*	PF 1	0.00052	-0.00213	0.02639	0.02867	0.00101	0.21135	0	0.09	0.4	0.02852	0.0284	0.0277	2.53	0.0279808	0.45	0.0279806	0.0279599	0.0279808
1	1.5000*	PF 1	0.00052	-0.00213	0.02633	0.02862	0.001016	0.21179	0	0.09	0.4	0.02846	0.02846	0.028	1.64	0.0282861	0.5	0.0282859	0.0282639	0.0282861
1	1.4500*	PF 1	0.00052	-0.00213	0.02627	0.02857	0.001022	0.21224	0	0.09	0.4	0.0284	0.02852	0.0283	0.78	0.0285875	0.55	0.0285874	0.0285641	0.0285875
1	1.4000*	PF 1	0.00052	-0.00213	0.02621	0.02852	0.001029	0.2127	0	0.09	0.4	0.02834	0.02858	0.0286	0.07	0.0288854	0.6	0.0288852	0.0288607	0.0288854
1	1.3500*	PF 1	0.00052	-0.00091	0.02586	0.02844	0.001208	0.2252	0	0.09	0.44	0.02677	0.02973	0.0289	2.87	0.0291798	0.65	0.0291797	0.0291541	0.0291798
1	1.3000*	PF 1	0.00052	-0.00091	0.02578	0.02838	0.001217	0.22583	0	0.09	0.44	0.02669	0.02979	0.0292	2.02	0.0294711	0.7	0.0294709	0.0294444	0.0294711
1	1.2500*	PF 1	0.00052	-0.00091	0.02571	0.02832	0.001227	0.22646	0	0.09	0.44	0.02662	0.02984	0.0295	1.15	0.0297594	0.75	0.0297592	0.0297317	0.0297594
1	1.2000*	PF 1	0.00052	-0.00091	0.02563	0.02826	0.001237	0.2271	0	0.09	0.45	0.02654	0.02989	0.0298	0.30	0.0300448	0.8	0.0300447	0.0300163	0.0300449
1	1.1500*	PF 1	0.00052	-0.00091	0.02556	0.0282	0.001247	0.22776	0	0.09	0.45	0.02647	0.02994	0.0301	0.53	0.0303276	0.85	0.0303275	0.0302983	0.0303277
1	1.1000*	PF 1	0.00052	0	0.0252	0.02812	0.001433	0.23925	0	0.09	0.48	0.0252	0.03104	0.0304	2.11	0.0306079	0.9	0.0306077	0.0305778	0.0306079
1	1.0500*	PF 1	0.00052	0	0.02511	0.02805	0.001448	0.24012	0	0.09	0.48	0.02511	0.03109	0.0307	1.27	0.0308858	0.95	0.0308856	0.030855	0.0308858
1	1	PF 1	0.00052	0	0.02499	0.02798	0.00148	0.24207	0	0.09	0.49	0.02499	0.03112	0.0312	0.26	0.0311614	1	0.0311612	0.0311299	0.0311614

Tableau IV- 13: Résultats de simulations d'HEC-RAS avec les résultats de toute les autres méthodes numériques de la pente négative

Interprétation : ce tableau montre les résultats obtenus par HEC-RAS ainsi que les résultats des méthodes numériques de la pente négative.

Nous remarquons que les résultats obtenus par HEC-RAS sont en bonne concordance avec l'expérience (l'erreur ne dépasse pas 3.43%).

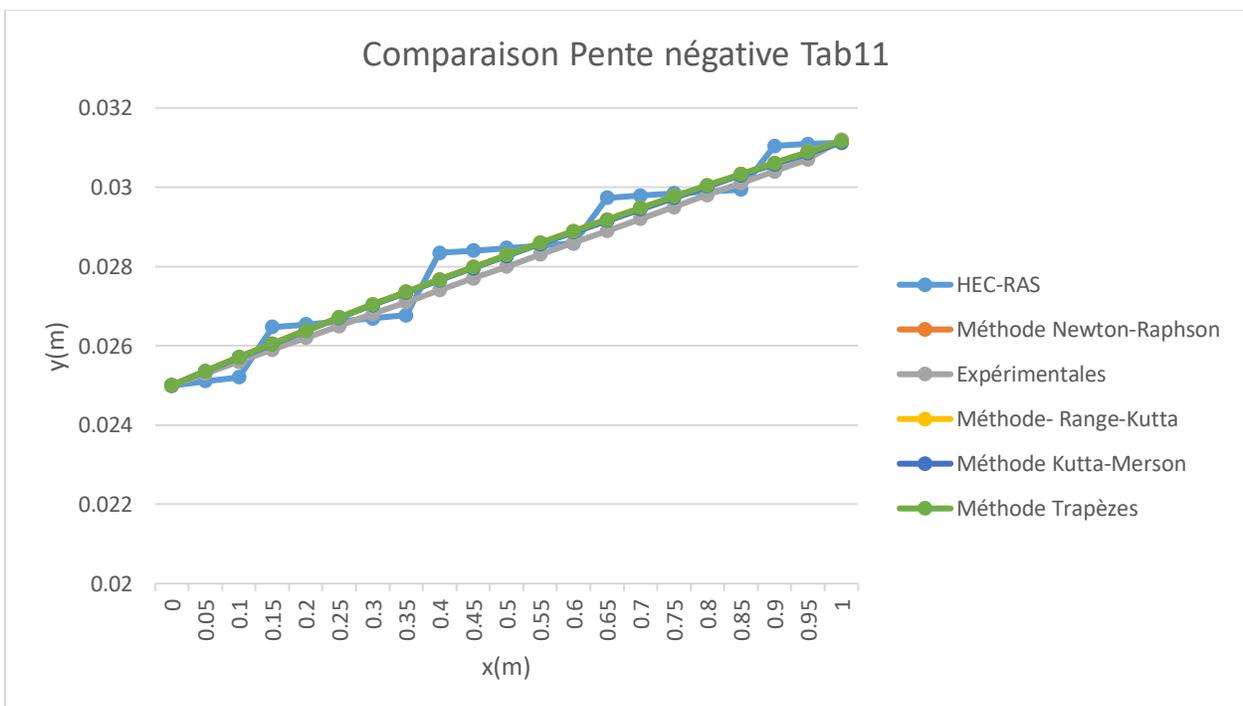


Figure IV- 33: Comparaison des résultats d'HEC-RAS avec les méthodes numériques de la pente négative

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Interprétation : Cette figure représente une comparaison dans la pente négative des résultats obtenus par HEC-RAS avec celle des résultats obtenus par les méthodes numériques en utilisant l'application « hydraulics-channel-gvf » tels que : méthode Newton-Raphson ; Range-Kutta, Kutta Merson et la méthode de Trapèzes.

Nous constatons que les méthodes numériques développées dans l'application « hydraulics-channel-gvf » nous donne des résultats proches de l'expérimentales et peu proche que les résultats obtenus par HEC-RAS.

Nous concluons que ses méthodes numériques sont efficaces et ont une bonne performance.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et évaluer les différente méthodes numériques de l'application développée par notre encadreur puis nous avons effectué une comparaison avec de ses résultats avec les résultats obtenus par HEC-RAS.

Nous concluons :

- Les résultats de ces méthodes numériques nous donne une bonne concordance avec expérimentale.
- La comparaison avec les résultats d'HEC-RAS nous montre l'efficacité de ses méthodes numériques.

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente travail qui a porté sur le calcul des courbes de remous selon les méthodes numériques présentés dans le chapitre trois et programmées dans l'application «hydraulics-channel-gvf » tels que les méthodes des profondeurs (dy fixe) et les méthodes des tronçons (dx fixe) que nous avons élaboré nous a permis de visualiser le profil en long de la ligne d'eau pour des écoulements de débits connus dans les pentes positive et négative.

L'efficacité de ses méthodes numériques pour la simulation des écoulements à espace libre a été prouvée par une étude comparative avec le modèle HEC-RAS. Cette étape de comparaison a montré que la différence entre les résultats de la simulation par les deux modèles est très petit (l'erreur relative ne dépasse 3%).

Les résultats de simulations montrent :

- Les méthodes numériques ont le même objectif mais chaque une son façon de calcul.
- Les résultats de simulations montre qu'il y a une bonne concordance entre les résultats expérimentales et ceux numériques avec une erreur relative très faible.
- Les méthodes numériques sont efficaces et performantes en validant ses méthode avec le model HEC-RAS.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- Abdelouaheb, D. T. (2016). *Hydraulique à surface libre* . Guelma : Université de Guelma .
- Altinakar, W. H. (1993). *hydraulique fluvial Tome 1: Ecoulement permanent uniforme et non uniforme*.
- amine, A. a. (s.d.). *Etude expérimentale d'un écoulement a surface libre*. Ain Témouchent: Centre Universitaire BELHADJ Bouchaib .
- BENNIS, S. (2004). *Hydraulique et hydrologie*. 3eme Edition.
- Brunner, G. W. (January 2010). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic. USA: US ARMY CORPS OF ENGINEERS HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER.
- DEGOUTTE, G. (s.d.). AIDE MÉMOIRE D'HYDRAULIQUE À SURFACE LIBRE.
- DEGOUTTE, G. (s.d.). *Traité d'hydraulique à surface libre*.
- DIAF, A. (2011). Contribution à l'étude des écoulements de surface par méthodes numériques. *Memoire magister*. Tlemcen: Université abou bekr belkaid.
- GRAF W. H., A. M. (2000). *Hydraulique fluviale : écoulement permanent*.
- HAFIANE, M. (2020/2021). hydraulics-channel-gvf. *Application développée*. SAIDA, HYDRAULIQUE: UNIVERSITE DR MOULAY TAHAR SAIDA.
- HEC-RAS, Guide de laboratoire. (Mars 2005). Québec: Ecole de Technologie supérieure, Université de Québec.
- L'hachimi, M. . (2016). Evaluation d'un modèle d'écoulement à surface libre par HEC-RAS sur canal expérimental. Ecole National superieur de l'eau ENSH.
- ROMDHANE, M. H. (2019). Etude expérimentale et modélisation d'écoulement à surface libre en présence de végétation, et transport sédimentaire associé. Toulouse: Université de Toulouse.
- SILBER, R. (1968). *Etude et trace des écoulements permanents en canaux et rapiers*. Paris: Dunod.
- VAZQUEZ, J. (s.d.). *Hydraulique à surface libre*. Strasbourg: École national de génie de l'eau et de l'environnement.

الملخص :

الهدف من عملنا هو دراسة وحساب المنحنيات الدوامية للتدفقات المتغيرة تدريجيًا على السطح الحر في القنوات المستطيلة في المنحدرين الموجب والسالب باستعمال برنامج HEC-RAS.

تظهر نتائج المحاكاة:

- الأساليب العددية لها نفس الهدف ولكن لكل منها طريقتها الخاصة في الحساب.
- أظهرت نتائج المحاكاة وجود توافق جيد بين النتائج التجريبية والنتائج العددية ذات الخطأ النسبي المنخفض للغاية.
- الأساليب العددية هي فعالة وفعالة من خلال التحقق من صحة أساليبها مع نموذج HEC-RAS.

الكلمات المفتاحية : المنحنيات الدوامية ، الخطأ النسبي .

Résumé :

Le but de nos travaux est d'étudier et de calculer les courbes de remous des cours d'eau variant progressivement sur la surface libre dans des canaux rectangulaires dans les pentes positives et négatives, à l'aide du programme HEC-RAS.

Les résultats de la simulation montrent:

- Les méthodes numériques ont le même objectif, mais chacune a sa propre façon de calculer.
- Les résultats de la simulation ont montré une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques d'erreur relative très faible.
- Les méthodes numériques sont efficaces et efficaces en validant leurs méthodes avec le modèle HEC-RAS.

Les mots clés : remous des cours d'eau , d'erreur relative .

Abstract :

The aim of our work is to study and compute the water surface elevation of the streams gradually varying on the free surface in rectangular channels in the positive and negative slopes using the HEC-RAS program.

Simulation results show:

- Numerical methods have the same goal, but each has its own way of calculating.
- The simulation results showed a good agreement between the experimental results and the numerical results of very low relative error.
- Numerical methods are efficient and effective by validating their methods with the HEC-RAS model.

Keywords : the water surface elevation , relative error .