

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUE

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : HYDRAULIQUE URBAINE

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

Par : DJEBRI Walid

DAHMANI Zakariya

Intitulé

**Etude pour la protection d'une ville contre les
inondations par HEC HMS et HEC RAS Cas de :
ville de AIN TOUTA**

Dirigé par : **Dr BERGHOUT Ali**

Soutenu devant le jury composé de :

.....

.....

.....

Année universitaire : 2019 /2020

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les inondations	
I.1.Introduction.....	2
I.2.Qu'est-ce qu'une inondation ?	2
I.3.Crue.....	2
I.4. Le lit de la rivière.....	3
I.4.1. Le lit mineur.....	3
I.4.2. Le lit moyen.....	4
I.4.3. Le lit majeur.....	4
I.4.4. Rive, Berge.....	5
I.5. Principes et notion de risque d'inondation.....	5
I.5.1. Risque majeur.....	5
I.5.2. L'aléa.....	6
I.5.3. La Vulnérabilité.....	6
I.5.4. Les enjeux.....	6
I.5.5. Le risque d'inondation.....	6
I.6. Le processus conduisant aux crues et aux inondations.....	7
I.6.1. L'eau mobilisable.....	7
I.6.2. Le ruissellement.....	7
I.6.3. Le temps de concentration.....	8
I.6.4. La propagation de la crue.....	8

I.6.5. Le débordement.....	8
I.7. Typologie des inondations.....	8
I.7.1. Les inondations de plaine (crues lentes)	8
I.7.2. Les inondations par remontée de nappe.....	9
I.7.3. Les inondations torrentielles (crues-éclair)	10
I.7.4. Les inondations par ruissellement pluvial ou par refoulement des réseaux.....	11
I.7.5. Les inondations littorales ou submersions marines.....	11
I.8. Manifestation à l'échelle de la planète.....	12
I.9. Problématique des inondations en Algérie.....	13
I.10. Conclusion.....	13

Chapitre II: Présentation de la région d'étude

II.1. Introduction.....	15
II.2. Présentation de la zone d'étude.....	15
II.2.1. Situation géographique du bassin versant Ain TOUTA.....	15
II.2.2. Situation climatique du bassin versant Ain TOUTA.....	17
II.2.2.1. Données de base.....	17
II.2.2.2. Climatologie.....	17
II.2.2.3. Température	18
II.2.2.4. Les Vents.....	18
II.2.2.5. La Pluviométrie.....	19
II.3. Caractéristique géomorphologique de bassin versant.....	19
II.3.1. Définition du bassin versant.....	19
II.3.2. Caractéristiques physiques et leurs influences sur l'écoulement des eaux.....	20

II.3.3. Caractéristiques géométriques.....	20
II.3.3.1. Surface et périmètre.....	20
II.3.3.2. Forme.....	22
II.3.3.3. Relief	23
II.3.4. Caractéristiques hydrographique.....	32
II.3.4.1. Structure du réseau et ordre des cours d'eau.....	32
II.3.4.2. Longueurs et pentes caractéristiques du réseau.....	34
II.3.4.3. Degré de développement du réseau	35
II.3.4.4. Le temps de concentration	36
II.3.4.5. Vitesse de propagation de la crue	37
II.4. Conclusion.....	40

Chapitre III : Etude hydrologique

III.1. Introduction.....	41
III.2. Analyse des données pluviométriques.....	41
III.2.1. Précipitation maximales journalières.....	41
III.2.2. Ajustement des pluies maximales journalières.....	42
III.2.3. Choix de la loi d'ajustement	43
III.2.3.1. Ajustement suivant la loi de GALTON (Log Normale)	44
III.2.3.2. Ajustement suivant la loi de GUMBEL.....	46
III.2.3.3. Comparaison entre les deux lois d'ajustement.....	48
III.3. Pluies de courte durée.....	49
III.4. Etude des crues.....	50
III.4.1. Débits maxims fréquentiels.....	50
III.4. 2. Hydrogramme de crues.....	54
III.5. Conclusion.....	61

Chapitre IV : Application du modèle hydrologique HEC HMS du B.V AIN TOUTA

IV.1. Introduction.....	62
IV.2. Applications HEC-GEOHMS.....	62
IV.3. Présentation du logiciel HEC-HMS.....	63
IV.4. Fonctionnalités.....	64
IV.5. Préparation des entrées du modèle HEC-HMS.....	65
IV.6. Modélisation du bassin versant.....	65
IV.7. La structure du modèle HEC-HMS choisie et les données d'entrée du modèle.....	67
IV.7.1. Justification du choix du modèle.....	68
IV.7.1.1. La fonction de production : la fonction utilisée est celle de type NRCS CN.	68
IV.7.1.1.1. Le concept de base.....	68
IV.7.1.1.2. Les variables.....	69
A- Découpage des bassins.....	69
B- La carte des sols.....	72
C- Le pourcentage d'imperméable.....	75
IV.7.1.1.3. Les paramètres.....	75
A- CurveNumberCN.....	75
B- Les cartes NDVI et CN.....	76
C- Abstraction Initiale Ia.....	78
D- Lapluie.....	78
IV.7.1.1.4. La fonction de transfert : l'hydrogramme unitaire de la NRCS.....	78
A- Le concept de base.....	78
B- Les paramètres.....	79
IV.7.1.1.5. Les avantages de la combinaison modulaire choisie.....	80

IV.7.1.2. Estimation des débits liquides des averses de différentes périodes de retour par HEC HMS	80
IV.7.1.2.1. Les données.....	80
IV.7.1.2.2. Résultats de la simulation et discussions.....	81
IV.8. CONCLUSION	89
 Chapitre V : Application du modèle hydrologique HEC RAS du B.V AIN TOUTA	
V.1. Introduction	90
V.2. Application HEC-GEORAS	90
V.2.1.Préparation des données sur HEC-GeoRas.....	91
V.3. Application du modèle hydraulique HEC-RAS	96
V.3.1. Structure du modèle hydraulique HEC-RAS.....	96
V.3.2. Lancement des calculs sur HEC-RAS.....	97
V.4. Résultats de la simulation par HEC-RAS	100
V.4.1. Les zones inondables.....	100
V.4.2. Les hauteurs.....	101
V.4.3. Discussion des résultats.....	102
V.4.4. Les actions de prévention et de secours.....	102
V.5.Calculs hydrauliques	102
V.6. Conclusion	115
Conclusion générale	116

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les inondations

Figure I.1. Crue simple et crue complexe (sourceGoogle).....	3
Figure I.2. Lit mineur d'un cours d'eau (Source graphies / MEDD-DPPR).....	3
Figure I.3. Lit moyen d'un cours d'eau (Source graphies / MEDD-DPPR).....	4
Figure I.4. Lit majeur d'un cours d'eau (Source graphies / MEDD-DPPR).....	4
Figure I.5. L'aléa, l'enjeu et le risque (Source graphies / MEDD-DPPR).....	5
Figure I.6. Zone à enjeux et zone sans enjeu (Source graphies / MEDD-DPPR)	6
Figure I.7. Les inondations de plaine (Source graphies / MEDD-DPPR)	9
Figure I.8. Les inondations par remontée de nappe (Source graphies / MEDD-DPPR)	9
Figure I.9. Les inondations torrentielles (Source graphies / MEDD-DPPR)	10
Figure I.10. Les inondations littorales ou submersions marines (Source graphies / MEDD-DPPR)	12
Figure I.11. Nombre d'inondations par pays durant la période 1974 – 2003 (Source EM-DAT)	12
Figure I.12. Cas significatifs des inondations survenues en Algérie (Source DGPC, 2007)..	13
Figure I.13. Montrant l'ampleur des dégâts de l'inondation du Bâb el Oued 10/11/2001 (Source Google)	14
Figure I.14. Montrant l'ampleur des dégâts de l'inondation du Ghardaïa en octobre 2008 (Source Google)	14

Chapitre II: Présentation de la région d'étude

Figure II.1. Situation géographique de la ville d'AIN TOUTA wilaya de BATNA.....	15
Figure II.2. Localisation de la zone d'étude et les sous bassins versants (Ville d'Ain Touta-Batna)	16

Figure II.3. Délimitation des sous bassins versants.....	21
Figure II.4. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 01.....	24
Figure II.5. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 02.....	25
Figure II.6. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 03.....	26
Figure II.7. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 04.....	27
Figure II.8. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 05.....	27
Figure II.9. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 06.....	28
Figure II.10. Réseau hydrographique et ses ordres des sous bassins versants d'AIN TOUTA.....	34

Chapitre III : Etude hydrologique

Figure III.1. Représentation des observations sur papier normale.....	43
Figure III.2. Histogramme des observations.....	43
Figure III.3. Représentation graphique de l'ajustement par la loi de log normale.....	46
Figure III.4. Ajustement à la loi de GUMBEL.....	48
Figure III.5. Comparaison entre les deux lois d'ajustement.....	48
Figure III.6. Hydrogrammes de crues SBV 1.....	55
Figure III.7. Hydrogrammes de crues SBV 2.....	56
Figure III.8. Hydrogrammes de crues SBV 3.....	57
Figure III.9. Hydrogrammes de crues SBV 4.....	58
Figure III.10. Hydrogrammes de crues SBV 5.....	59
Figure III.11. Hydrogrammes de crues SBV 6.....	60

Chapitre IV : Application du modèle hydrologique HEC HMS du B.V AIN TOUTA

Figure IV.1. Vue d'ensemble du SIG et du modèle hydrologique.....	63
Figure IV.2. Carte des sous bassin.....	66
Figure IV.3. découpage BV de AIN TOUTA en sous bassins.....	67
Figure IV.4. Fenêtre bassin versant AIN TOUTA et ses sous bassins.....	69

Figure IV.5. Fenêtre de donnée de Curve Number.....	71
Figure IV.6. Carte des sols type NRCS des sous bassins versants.....	74
Figure IV.7. Corrélations entre les valeurs de l'NDVI et les valeurs du CN pour les différents types des sols NRCS.....	77
Figure IV.8. Carte CN moyens (quatre saisons) des sous bassins versants.....	77
Figure IV.9. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV01.....	82
Figure IV.10. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV02.....	83
Figure IV.11. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV03.....	83
Figure IV.12. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV04.....	84
Figure IV.13. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV05.....	84
Figure IV.14. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV06.....	85
Figure IV.15. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV01.....	85
Figure IV.16. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV02.....	86
Figure IV.17. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV03.....	86
Figure IV.18. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV04.....	87

Figure IV.19. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV05.....87

Figure IV.20. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV06.....88

Chapitre V : Application du modèle hydrologique HEC RAS du B.V AIN TOUTA

Figure IV.1. L'extension Hec-GeoRas sur l'interface ArcMap.....91

Figure IV.2. Digitaliser le cours d'eau.....92

Figure IV.3. Sélectionner les Oueds par Hec-GeoRas.....92

Figure IV.4. Les berges (les lignes rouges).....93

Figure IV.5. Digitaliser le sens d'écoulement.....94

Figure IV.6. Sélection les attributs des sens d'écoulement.....94

Figure IV.7. Digitaliser les transects.....95

Figure IV.8. L'interface du logiciel HEC-Ras 5.0.3.....96

Figure IV.9. Cliquer sur Finished – Import Data98

Figure IV.10. L'importation de la géométrie du tronçon a modélisée dans Hec Ras.....99

Figure IV.11. Attribution du coefficient de Manning à chaque section transversale.....100

Figure IV.12. Zones inondables (crue centennale).....100

Figure IV.13. Graphe de la hauteur d'eau pour un point spécifique dans l'oued.....101

Figure IV.14. Graphe de la hauteur d'eau pour le long du talweg B3.....101

Figure IV.15. Schéma de l'ouvrage 01.....104

Figure IV.16. Schéma de l'ouvrage 02.....106

Figure IV.17. Schéma de l'ouvrage 03.....108

Figure IV.18. Schéma de l'ouvrage 03.....110

Figure IV.19. Schéma de l'ouvrage 5-1.....112

Figure IV.20. Schéma de l'ouvrage 5-2114

Liste des Tableaux

Chapitre II: Présentation de la région d'étude

Tableau II.1. Température min, max et moyenne mensuelle.....	18
Tableau II.2. Les variations concernant les vitesses moyennes mensuelles et annuelles.....	18
Tableau II.3. Caractéristiques de la station d'AinTouta.....	19
Tableau II.4. Caractéristiques de la station de Batna.....	19
Tableau II.5. Répartition altimétrique du sous bassin versant 01.....	23
Tableau II.6. Répartition altimétrique du sous bassin versant 02.....	24
Tableau II.7. Répartition altimétrique du sous bassin versant 03.....	25
Tableau II.8. Répartition altimétrique du sous bassin versant 04.....	26
Tableau II.9. Répartition altimétrique du sous bassin versant 05.....	27
Tableau II.10. Répartition altimétrique du sous bassin versant 06.....	28
Tableau II.11. Indice de pente globale et classe de relief.....	32
Tableau II.12. Temps et vitesses de concentration des bassins versants.....	38
Tableau II.13. Caractéristiques principales des sous bassins versants AIN TOUTA.....	39

Chapitre III : Etude hydrologique

Tableau III.1. Les précipitations maximales journalières (1929-2011).....	41
Tableau III.2. Caractéristique de la série de donnée avec N = 75ans.....	42
Tableau III.3. Résultats de l'ajustement à la loi de GALTON.....	45
Tableau III.4. Résultats de l'ajustement à la loi de GUMBEL.....	47
Tableau III.5. Pluies de courtes durées correspondant au temps de concentration de sous bassin1.2.3.4.5.6.....	49
Tableau III.6. Les valeurs de coefficient (C).	50

Tableau III.7. Débits fréquents obtenus par la méthode Turraza.....	51
Tableau III.8. Coefficient de forme.....	51
Tableau III.9. Débits fréquents obtenus par la méthode Sokolovsky.....	52
Tableau III.10. Débits fréquents obtenus par la méthode MALLETTGAUTHIE.....	52
Tableau III.11. Résultats des crues par les lois empiriques.....	53
Tableau III.12. Débits fréquents arrêtés pour les calculs.....	54
Tableau III.13. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. SBV 1.....	55
Tableau III.14. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. SBV 2.....	56
Tableau III.15. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. SBV 3.....	57
Tableau III.16. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. SBV 4.....	58
Tableau III.17. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. SBV 5.....	59
Tableau III.18. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. SBV 6.....	60
 Chapitre IV : Application du modèle hydrologique HEC HMS du B.V AIN TOUTA	
Tableau IV.1. Caractéristiques et Données de base des 40 sous -bassins.....	70
Tableau IV.2. Données de base des Quarrent sous-bassins versants.....	71
Tableau IV.3. Classes de conductivité hydraulique saturée pour la désignation des groupes hydrologique des sols selon le USDA-NRCS(2007) lorsqu'une couche imperméable est présente a) à plus de 100 cm de profondeur et b) entre 50 et 100 cm de profondeur.....	73
Tableau IV.4. Valeurs de CN en fonction des classes d'occupation de sol type NRC.....	75
Tableau IV.5. Les données utilisées pour les corrélations entre l'NDVI et CN pour les différents types des sols NRCS (référence).....	76
Tableau IV.6. Valeurs usuelles de l'abstraction initiale Ia et du coefficient CN (D'après SAGE INGENIERIE).....	78
Tableau IV.7. Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation.....	81
Tableau IV.8. les valeurs simulées du débit de pointe et du volume d'eau pour les averses quantiles.....	82

Tableau IV.9. les valeurs calculées par le formule empirique (SKOLOVSKY) et simulée par HEC-HMS du débit de pointe pour les averses quantiles.....**88**

Chapitre V : Application du modèle hydrologique HEC RAS du B.V AIN TOUTA

Tableau V.1. Ouvrage 01 : Données de base.....**103**

Tableau V.2. Ouvrage 01 : Résultats des calculs.....**104**

Tableau V.3. Ouvrage 02 : Données de base.....**105**

Tableau V.4. Ouvrage 02 : Résultats des calculs.....**106**

Tableau V.5. Ouvrage 03 : Données de base.....**107**

Tableau V.6. Ouvrage 03 : Résultats des calculs.....**108**

Tableau V.7. Ouvrage 04 : Données de base.....**109**

Tableau V.8. Ouvrage 04 : Résultats des calculs.....**110**

Tableau V.9. Ouvrage 5-1 : Données de base.....**111**

Tableau V.10. Ouvrage 5-1 : Résultats des calculs.....**112**

Tableau V.11. Ouvrage 5-2 : Données de base.....**113**

Tableau V.12. Ouvrage 5-2 : Résultats des calculs.....**114**

DÉDICACE

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi Mon Père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, Ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

À ma femme, qui m'a encouragé à terminer les études supérieures ;Houda ;et mes filles ;Soudjoud et Ammani.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères et mes sœurs, je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mon aimable amie, collègue d'étude.

DJEBRI WALID

REMERCIEMENTS

Nous commençons par remercier dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et l'amour du savoir pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

*Nos plus vifs remerciements vont à Mr. **BERGHOUT ALI** qui nous a permis de bénéficier de son encadrement Nous le remercions profondément pour son encouragement continue et aussi d'être toujours là pour nous écouter, nous aider et nous guider à retrouver le bon chemin par sa sagesse et ses précieux conseils.*

Ainsi que son soutien moral et sa preuve de compréhension, ce qui nous a donné la force et le courage d'accomplir ce projet.

Nous tenons à remercier également les membres de jury d'examiner ce travail.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années d'études. Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

DJEBRI WALID

DAHMANI ZAKARIYA

ملخص

الجزائر ، مثل دول أخرى في العالم ، مهددة بالفيضانات ، التي شهدناها في دولها المختلفة في السنوات السابقة. الفيضانات المرتبطة بالأحوال الجوية في حوض عين توتة تشكل الخطر الطبيعي الذي يهدد الممتلكات.

في هذا السياق تأتي هذه الدراسة التي تتكون من جزأين.

الجزء الأول مخصص للنمذجة الهيدرولوجية (المطر - التدفق) ، على مقياس الفيضان في مستجمعات المياه الفرعية التي تحدد المدينة ، باستخدام نموذج HecHms ، من أجل الوصول إلى ذروة تدفقات الفيضانات و الهيدروغرافات التي سيتم استخدامها كظروف حدودية في الدراسة الهيدروليكية بواسطة نموذج Hec Ras.

يشكل استخدام هذا النموذج الأخير لتحديد مناطق الفيضانات أثناء حدوثها واقتراح الحلول بالإضافة إلى خصائصها المائية الجزء الثاني من العمل (HEC RAS 5.0.3) ; (HEC HMS 4.5 Beta) .

RESUME

L'Algérie, comme d'autres pays du monde, est menacée d'inondation, ce que nous avons constaté dans ses différents états les années précédentes. Les inondations liées aux conditions météorologiques dans le bassin de l'Ain Touta constituent le danger naturel qui menace les biens. Dans ce contexte rentre cette étude qui se compose de deux volets.

Le premier volet est destiné à la modélisation hydrologique (pluie - débit), à l'échelle de la crue dans les sous bassins versants délimitant la ville, en utilisant le modèle HecHms, afin d'aboutir aux débits de pointe des crues et aux leurs hydrogrammes qui seront utilisés comme des conditions aux limites dans l'étude hydraulique par le modèle Hec Ras.

L'utilisation de ce dernier modèle pour la délimitation des zones inondables durant les crues et la proposition des solutions ainsi que leurs caractéristiques hydrauliques, forme le deuxième volet du travail. (HEC HMS 4.5 Beta); (HEC RAS 5.0.3).

ABSTRACT

Algeria, among other countries in the world, is threatened by floods, which we have seen in different countries in previous years. Weather floods in the Ain Touta basin pose a natural threat to the properties. In this context, this study consists of two parts.

The first part is devoted to hydrological modeling (rain - flow), on a flood scale in the sub-watersheds that define the city, using the HecHms model, in order to reach the peak of flood flows and hydrographs that will be used as boundary conditions in the hydraulic study by the Hec Ras model.

The use of this last model to identify flood areas as they occur and to propose solutions in addition to their water features forms the second part of the work. (HEC HMS 4.5 Beta); (HEC RAS 5.0.3).

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'Algérie est l'un des pays confrontés aux phénomènes de crues et d'inondations qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social.

Les régions des hauts plateaux et du sud algérien, en générale, en connaissent ces derniers années, en relation avec les perturbations climatiques actuels, des changements notables dans le régime hydrologique des oueds de la région, plusieurs inondations générées par des crues éphémères de ces oueds ont causés des dégâts humains et matériels considérables. Aussi la prise en considération de des catastrophes hydro climatiques naturelles a conduit l'état à la programmation d'un grand nombre de projets d'aménagement de protection des centres urbains et économiques contre les inondations.

Dans ce contexte rentre notre mémoire de fin intitulée "Etude pour la protection d'une ville contre les inondations par HEC HMS et HEC RAS cas de ville de Ain Touta"

Ce travail est structuré de la façon suivante :

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les inondations, nous présenterons quelques notions sur l'origine, les différents types et le mécanisme des inondations, les facteurs influençant ce phénomène.

Le second chapitre sera consacré à la présentation de la région d'étude et le troisième sera l'étude hydrologique ayant pour objectif la détermination pour tous les sous bassins versants délimitant la ville les hydrogrammes de crues à différentes périodes de retour et de définir les débits maxima probables correspondants en utilisant les différentes méthodes classiques.

Le quatrième chapitre sera consacré à la modélisation hydrologique (pluie - débit), à l'échelle de la crue dans les sous bassins cités auparavant, en utilisant le modèle HecHms, afin d'aboutir aux débits de pointe des crues et aux leurs hydrogrammes qui seront utilisée comme conditions aux limites dans l'étude hydraulique par le modèle Hec Ras, qui est l'objectif du cinquième chapitre.

Dans ce dernier nous allons délimiter les zones inondables durant les crues d'une part, d'autre part la proposition des solutions est la détermination de leurs caractéristiques hydrauliques.

On termine ce travail par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I :

Généralités sur les inondations

Chapitre I : Généralités sur les inondations

I.1. Introduction

Les zones inondables sont soumises à différents types d'inondation, dont les caractéristiques influencent le déroulement des crises et l'ampleur des impacts humains et économiques. Le risque n'est pas le même sur les différents territoires exposés puisque ni l'aléa ni la vulnérabilité sont les mêmes ; les crues surviennent de manière plutôt lente sur les bassins plats alors qu'elles se produisent de manière extrêmement rapide et brutale sur les bassins pentus. Aussi les inondations ne provoquent pas de catastrophes susceptibles de marquer les esprits si les zones inondables n'étaient pas ou peu occupées par l'homme. [1] Le but principal de ce chapitre est de développer la connaissance du risque inondation ; le phénomène naturel générateur de ce risque et de déroulement ainsi que les enjeux et leur vulnérabilité. Il clarifie le désordre de cette notion en montrant que le risque d'inondation est un concept complexe bien souvent associé à l'unique dimension physique liée à l'aléa, alors que l'aléa n'est pas nécessairement le moteur du risque, la vulnérabilité aussi.

I.2. Qu'est-ce qu'une inondation ?

Les inondations sont des catastrophes naturelles : une inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau. Le risque inondation est la conséquence de deux composantes : l'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement ou apparaître et l'homme qui s'installe dans la zone inondable pour y implanter toutes sortes de constructions, d'équipements et d'activités. Etymologie : le mot inondation vient du latin : « inondation » qui signifie submersion. [2]

I.3. Crue

La crue est une phase du régime hydrologique d'un cours d'eau caractérisée par l'augmentation plus ou moins brutale du débit sous l'effet de facteurs extérieurs et maintenant ce débit au-dessus d'un seuil donné. L'élévation rapide du niveau d'eau peut produire non seulement le remplissage du lit mineur mais aussi la submersion du lit majeur. En général, on distingue deux types de crues : les crues fluviales et les crues torrentielles même si le passage de l'une à l'autre se fait de façon continue. Les crues fluviales, souvent saisonnières, affectent les cours d'eau importants aux vastes bassins versants ; en général la montée des eaux y est lente. Les crues torrentielles ou rapides, subites, brutales, soudaines ou encore éclair affectent n'importe quelle partie du réseau hydrographique ; elles sont souvent dues à des pluies de

caractère convectif très violentes et localisées ; elles sont caractérisées par une évolution très rapide, la montée des eaux étant très brutale.

La crue est simple, si elle présente une seule pointe. Elle est dite complexe si elle présente plusieurs pointes comme le montre la figure suivante. [3]

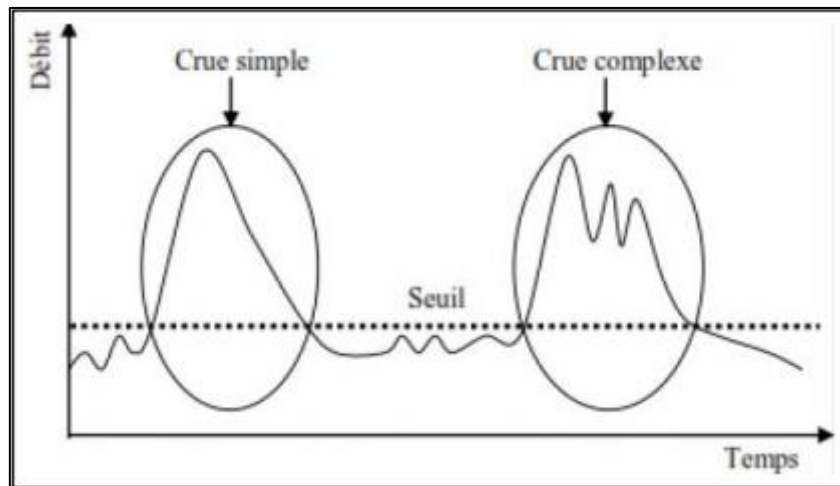


Figure I.1.Crue simple et crue complexe (source Google)

I.4. Le lit de la rivière

I.4.1. Le lit mineur

Le lit mineur est constitué par le lit ordinaire du cours d'eau, pour le débit d'étiage ou pour les crues fréquentes (crues annuelles).

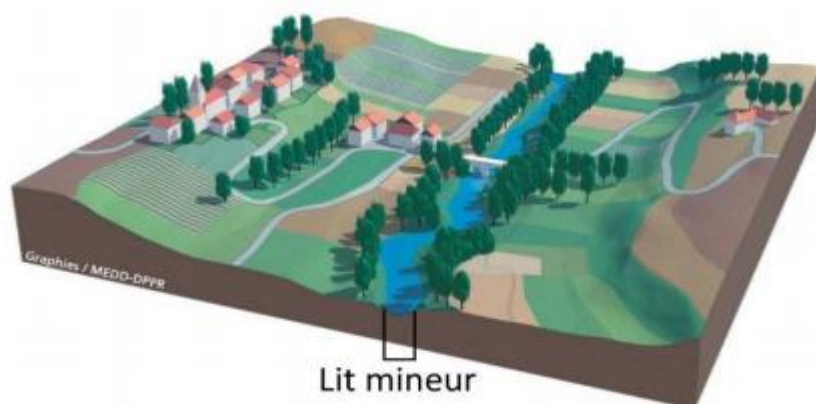


Figure I.2. Lit mineur d'un cours d'eau (Source graphies / MEDD-DPPR)

I.4.2. Le lit moyen

Sous certains climats, et pour certains cours d'eau, on peut identifier un lit moyen. Pour les crues de période de retour de 1 à 10 ans, l'inondation submerge les terres bordant la rivière et s'étend dans le lit moyen. Il correspond à l'espace fluvial ordinairement occupé, sur lequel s'écoulent les crues moyennes.



Figure I.3. Lit moyen d'un cours d'eau (Source graphies / MEDD-DPPR)

I.4.3. Le lit majeur

Le lit majeur comprend les zones basses situées de part et d'autre du lit mineur, sur une distance qui va de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Sa limite est celle des crues exceptionnelles. Le lit majeur fait partie intégrante de la rivière. En s'y implantant, on s'installe donc dans la rivière elle-même.

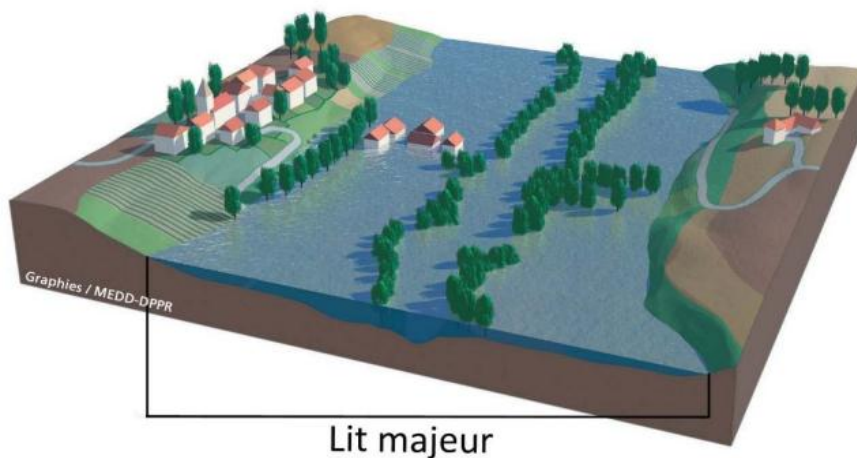


Figure I.4. Lit majeur d'un cours d'eau (Source graphies / MEDD-DPPR)

I.4.4. Rive, Berge

La berge est le talus incliné qui sépare le lit mineur et le lit majeur. Tandis que la rive est le milieu géographique qui sépare les milieux aquatique et terrestre. Elle démarre au sommet de la berge et constitue une partie plate plus ou moins étendue qui reste sous l'influence du milieu aquatique. [4]

I.5. Principes et notion de risque d'inondation

Le risque d'inondation est la conséquence de deux composantes : l'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement et l'homme qui s'installe dans l'espace alluvial pour y implanter toutes sortes de constructions, d'équipements et d'activités.

I.5.1. Risque majeur

Un risque majeur est la possibilité d'un événement, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dommages importants et dépasser les capacités de réaction de la société. Il est caractérisé par sa faible probabilité d'occurrence et par son énorme gravité. Il résulte de la confrontation d'un aléa avec un ou plusieurs enjeux. Son existence est liée :

- D'une part à la présence d'un événement, qui est la manifestation d'un phénomène naturel (l'aléa) ;
- D'autre part à l'existence d'enjeux, pouvant être affectés par un phénomène. Les conséquences d'un risque majeur sur les enjeux se mesurent en termes de vulnérabilité.

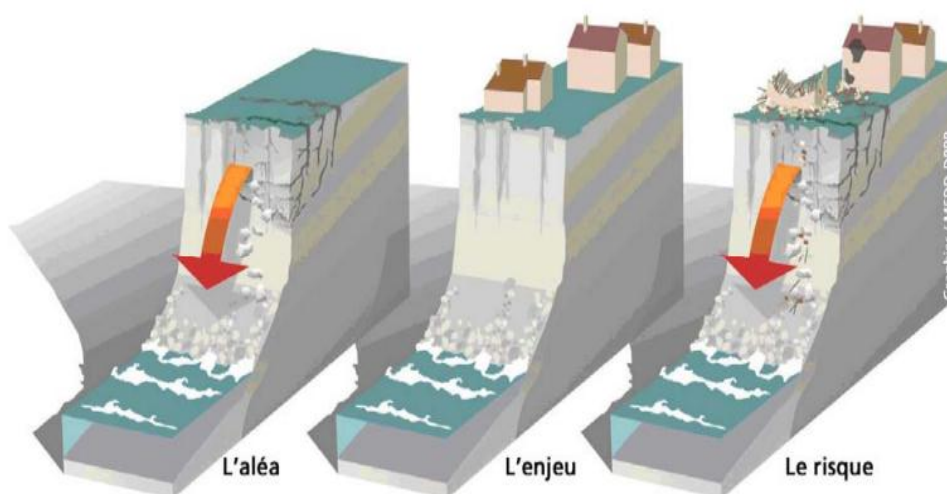


Figure I.5. L'aléa, l'enjeu et le risque (Source graphies / MEDD-DPPR)

I.5.2. L'aléa

L'aléa est la manifestation d'un phénomène d'occurrence et d'intensité donnée susceptible d'engendrer des dommages. Il représente un évènement menaçant ayant une probabilité d'occurrence dans une région au cours d'une période donnée. [5] L'aléa inondation consiste à évaluer la probabilité d'occurrence en un site ou une région, d'être exposé à une submersion par des eaux.

I.5.3. La vulnérabilité

La Vulnérabilité traduit un degré de perte par une quantification des dommages infligés à une région, en conséquence ou suite à un phénomène susceptible d'engendrer des victimes et des dommages matériels. [5]

I.5.4. Les enjeux

Les enjeux représentent l'ensemble des personnes et des biens susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel. Ils sont généralement classés en trois types : Les enjeux humains, Les enjeux économiques et les enjeux environnementaux.

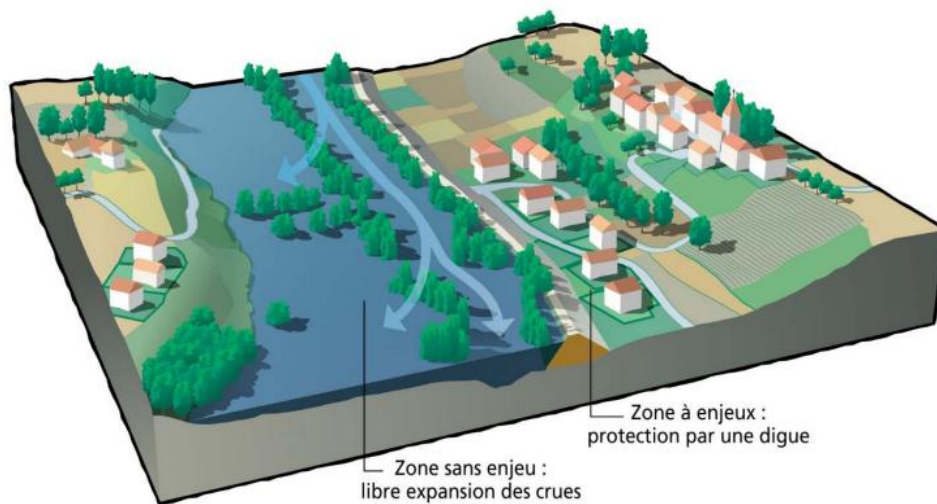
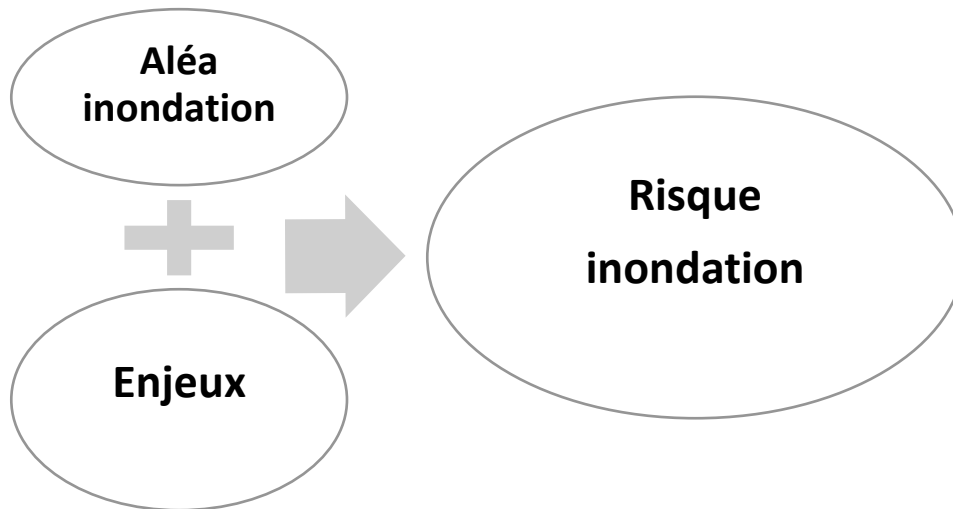


Figure I.6. Zone à enjeux et zone sans enjeu (Source graphies / MEDD-DPPR)

I.5.5. Le risque d'inondation

Le risque d'inondation est l'espérance mathématique de pertes au cours d'une période de référence et dans une région bien définie. Il est proportionnel à la vulnérabilité des constructions et infrastructures et aux enjeux (humains économiques et environnementaux) et

dépend donc de l'extension de cette région. Il s'agit en fait de la probabilité d'avoir des dégâts suite à une crue et/ou inondation. Son évaluation mathématiquement est exprimée par le produit entre l'aléa et les enjeux.



I.6. Le processus conduisant aux crues et aux inondations

Le phénomène inondation est la conséquence de plusieurs processus qui sont :

I.6.1. L'eau mobilisable

Dans notre pays la cause fondamentale de la plupart des inondations est l'arrivée d'importantes chutes de pluies parfois exceptionnelles, notons que les précipitations en Algérie sont caractérisées par une très forte irrégularité tant inter - annuelle que saisonnière entraînant des étiages extrêmement sévères et inversement, de fortes crues et des inondations pendant la période hivernale.

I.6.2. Le ruissellement

Le ruissellement dépend de la nature du sol et de son occupation de surface. Il correspond à la part de l'eau qui n'a pas été interceptée par le feuillage, ni restituée à l'atmosphère par évaporation et qui n'a pas pu s'infiltrer, ou ressurgir très rapidement après infiltration et écoulement hypodermique ou souterrain. Il sera donc d'autant plus faible que le couvert végétal sera dense et que les sols profonds et non saturés par des épisodes pluvieux récents. Inversement, l'imperméabilisation des sols due à l'urbanisation (infrastructures, constructions) le favorisera. Par ailleurs, l'intensité de la pluie joue aussi un rôle non négligeable en créant, au-delà d'une certaine valeur un film d'eau à la surface du sol, qui va conduire à un écoulement maximum.

I.6.3. Le temps de concentration

Il est défini par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau ayant le plus long chemin hydraulique à parcourir parvienne jusqu'à l'exutoire. Il est donc fonction de la taille et de la forme du bassin versant, de la topographie et de l'occupation des sols.

I.6.4. La propagation de la crue

L'eau de ruissellement se rassemble dans un axe drainant ou elle forme une crue qui se propage vers l'aval ; le débit de pointe de la crue est d'autant plus amorti et sa propagation ralentie que le champ d'écoulement est plus large et que la pente est plus faible ;

I.6.5. Le débordement

Il est consécutif à la propagation d'un débit supérieur à celui que peut évacuer le lit mineur dont la capacité est généralement limitée à des débits de crues, de période de retour de l'ordre de 1 à 5 ans. Il peut se produire une ou plusieurs fois par an ou seulement tous les dix ans en moyenne, voire tous les cent ans.

I.7. Typologie des inondations

En fonction de l'événement créateur de la catastrophe, On peut distinguer plusieurs types d'inondation : inondations de plaine (crues lentes), par remontée de nappe, par crues torrentielles, par ruissellement en secteur urbain ou rural, inondation par rupture d'une digue et inondations marines. Dans les quatre premiers cas, le phénomène générateur est la pluie et l'inondation engagera à partir des fleuves et des rivières ; la classification consiste donc à distinguer les inondations provoquées par des crues à cinématique lente (inondations de plaine, remontée de nappe) de celles générées par des crues à cinématique rapide (crues torrentielles, ruissellement). Tandis que dans les deux derniers cas ; le premier c'est les circonstances locales qui jouent pour faire d'une inondation sur événement particulier et le deuxième c'est l'action de la mer qui est le facteur principal déterminant la survenance des désordres. [1]

I.7.1. Les inondations de plaine (crues lentes)

Elles concernent les grands bassins versants (Seine, Loire, Meuse, Saône...). Ces inondations ont pour origine des précipitations successives et soutenues, affectant de vastes superficies et entraînant des crues lentes mais généralisées du réseau hydrographique. Elles peuvent aussi résulter de la combinaison de plusieurs facteurs, précipitations importantes et fonte des neiges

par exemple, et durer de quelques jours à plusieurs semaines dans les bassins à faible pente. Par exemple la crue de la Seine amont en 2013... [1]

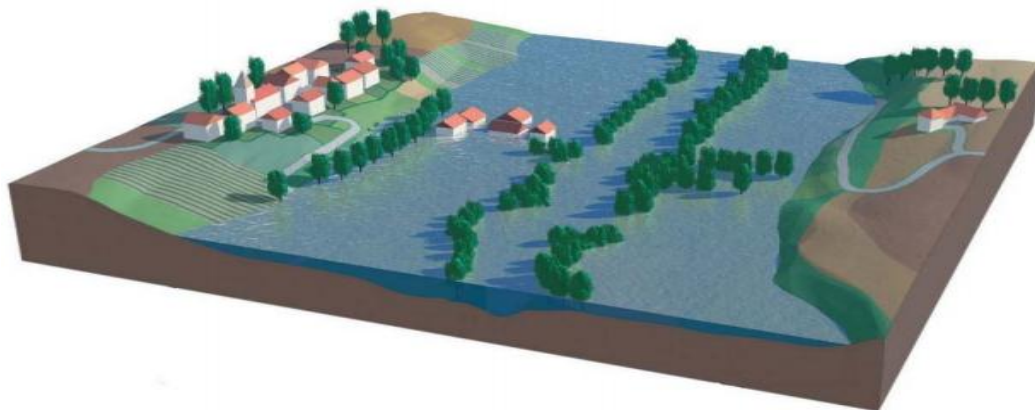


Figure I.7. Les inondations de plaine (Source graphies / MEDD-DPPR)

I.7.2. Les inondations par remontée de nappe

Les nappes phréatiques ou nappes libres sont alimentées par la pluie. Si des événements pluvieux exceptionnels surviennent pendant les périodes annuelles où les nappes sont fortement chargées, le niveau de la nappe peut alors atteindre la surface du sol et provoquer l'inondation par remontée de nappe. Parfois ces inondations s'accompagnent d'effondrements de terrains. Ce type d'inondation peut être catastrophique [1].



Figure I.8. Les inondations par remontée de nappe (Source graphies / MEDD-DPPR)

I.7.3. Les inondations torrentielles (crues-éclair)

Ces crues sont générées par des précipitations intenses sur des bassins versants de pente forte à moyenne. L'eau se concentre rapidement dans le cours d'eau, qui sort de son lit. Elles sont caractérisées par une montée des eaux relativement rapide, de fortes vitesses d'écoulement et une durée souvent inférieure à 24 heures. Avec leurs vitesses d'écoulement élevées, ces crues risquent d'affouiller, d'éroder des berges, voire de détruire des bâtiments. La rapidité de montée des eaux peut rendre l'alerte difficile. Ces crues sont donc particulièrement dangereuses, y compris pour les personnes. En outre, les rivières peuvent être chargées en matériaux, parfois de grande taille, arrachés des berges. Les risques d'embâcles (enchevêtrement d'arbres, de débris, d'objets) sont fréquents lorsque le cours d'eau traverse des zones urbanisées avec de nombreux ouvrages de franchissement (ponts, etc.). Lorsque ceux-ci sont mal conçus ou sous dimensionnés, ils peuvent générer des embâcles et provoquer des débordements au droit des ouvrages, voire leur destruction, si la pression exercée par la crue devient trop forte. [6]

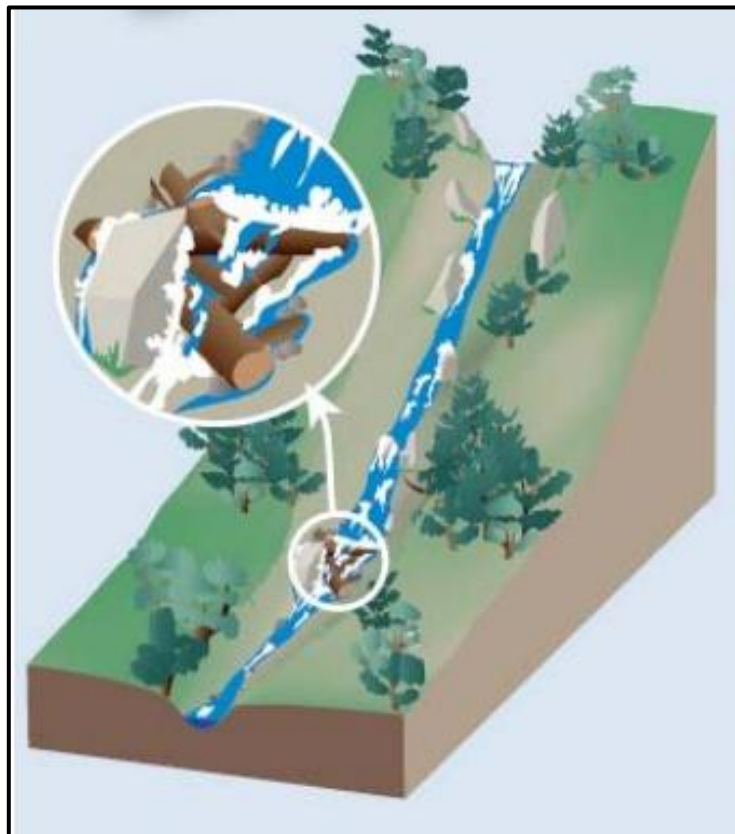


Figure I.9. Les inondations torrentielles (Source graphies / MEDD-DPPR)

I.7.4. Les inondations par ruissellement pluvial ou par refoulement des réseaux

Ce type d'inondation a généralement lieu lors de pluies orageuses de forte intensité, quand les réseaux hydrauliques naturels (cours d'eau) ou artificiels (évacuation des eaux pluviales, réseaux d'assainissement) ne peuvent évacuer le surplus d'eau. Le phénomène est amplifié par l'imperméabilisation des sols (bâtiments, routes), qui limite l'infiltration et génère du ruissellement. L'eau envahit alors les rues rapidement, parfois en moins d'une heure. [6]

I.7.5. Les inondations littorales ou submersions marines

Inondation par rupture d'ouvrage, dans le cas de cours d'eau endigués, l'inondation peut survenir brutalement, soit par rupture de la digue, soit par surverse (débordement par-dessus la digue conduisant très souvent à une rupture). Le phénomène peut être très brutal et d'autant plus dommageable que des enjeux humains et matériels sont proches de la digue. La subite inondation de ces secteurs ne laisse aucun délai pour intervenir et son énergie représente un danger pour les personnes. Se trouver derrière un ouvrage de protection dimensionné pour un certain niveau de crue peut donc augmenter le risque si l'ouvrage cède ou si l'eau dépasse le niveau prévu. [6] Les submersions marines correspondent aux inondations de la zone côtière par la mer du fait de conditions météorologiques et marégraphiques sévères (tempêtes). Trois modes de submersion peuvent être distingués :

- Le débordement : lorsque le niveau de la mer est supérieur au niveau des ouvrages ou du trait de côte naturel
- Le franchissement du trait de côte par paquet de mer résultant du déferlement des vagues
- La rupture d'ouvrage ou la destruction de cordons dunaires sous l'action de la marée et des vagues. L'eau est alors susceptible d'envahir les espaces protégés par ces éléments si leurs altitudes sont inférieures au niveau de la mer

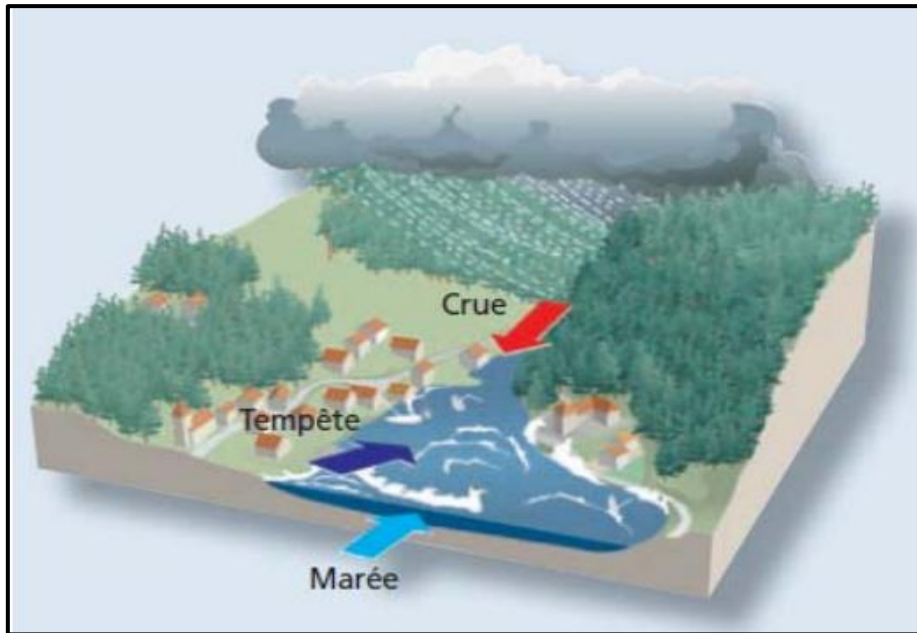


Figure I.10. Les inondations littorales ou submersions marines (Source graphies / MEDD-DPPR)

I.8. Manifestation à l'échelle de la planète

La moitié des catastrophes naturelles mondiales sont des inondations. Ces catastrophes résultent de phénomènes naturels périodiques comme la mousson ou el niño, d'autres sont le fait de circonstances particulières (cyclones, typhons, orages violents) et sont aggravées par les dérèglements climatiques. Selon la base de données internationale sur les catastrophes EM-DAT, 2 470 crues se sont produites à l'échelle internationale lors des vingt dernières années (1999 et 2009). 147 457 personnes y ont perdu la vie et les dommages ont été estimés à 372,5 milliards de \$ US. [7]

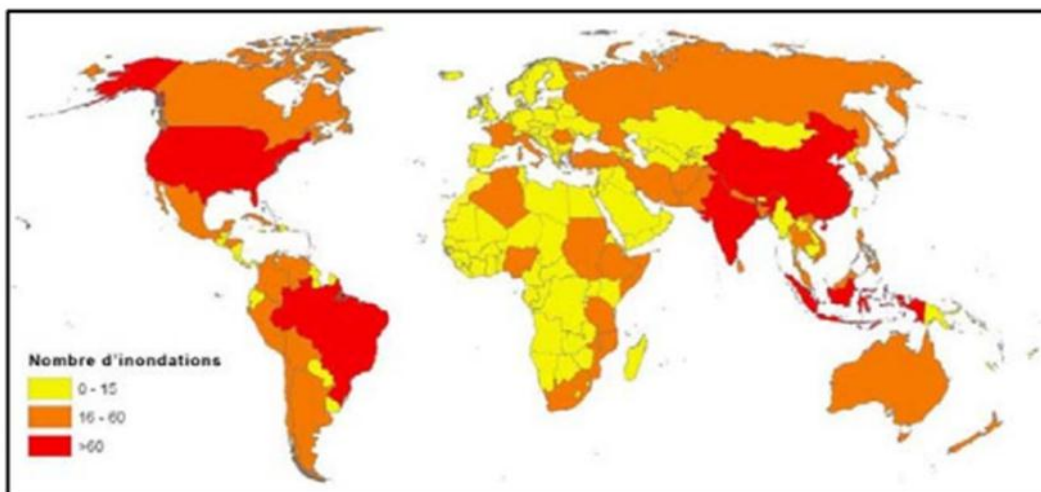


Figure I.11. Nombre d'inondations par pays durant la période 1974 – 2003 (Source EM-DAT)

I.9. Problématique des inondations en Algérie

D'après le recensement effectué par les services de la protection civile, une commune sur trois est susceptible d'être inondée partiellement ou en totalité. Ces inondations sont les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus destructrices. Elles atteignent parfois l'ampleur d'une catastrophe nationale (DGPC, 2007). La figure I.12 représente l'ampleur des inondations en Algérie. [8]



Figure I.12. Cas significatifs des inondations survenues en Algérie (Source DGPC, 2007)

Les crues et les inondations qu'elles provoquent, constituent en Algérie, la cause récurrente de catastrophes meurtrières, celles de l'Oued Koriche (Alger) en Novembre 2001 de l'Oued M'Zab (Ghardaïa) en Octobre 2008 en témoignent et restent gravées dans la mémoire des populations.

I.10. Conclusion

Une inondation est une submersion plus ou moins rapide d'une zone, avec des hauteurs d'eau et des vitesses de courant parfois très supérieures à la normale. Elle est due à une augmentation du débit d'un cours d'eau provoquée par des pluies importantes et durables. L'inondation n'est pas le risque ; le risque exige qu'un phénomène auquel on peut attribuer une probabilité de survenance et une intensité l'aléa soit susceptible, en se produisant, de provoquer des dommages. Il faut donc que la zone inondable soit occupée par l'homme. Malgré cela l'importance des enjeux (populations, habitations et équipement...) n'explique pas à elle seule la gravité potentielle de la catastrophe. Celle-ci est également tributaire de la vulnérabilité de ces enjeux, c'est -à-dire leur propension à subir des dommages. La plupart des

experts définissent le risque comme « Risque = aléa + L'enjeu », alors que d'après cette formule, un même risque peut-être le produit d'un aléa fort avec une vulnérabilité faible, d'un aléa moyen et une vulnérabilité moyenne ou d'un aléa faible et une vulnérabilité forte.



Figure I.13. Montrant l'ampleur des dégâts de l'inondation du Bab el Oued 10/11/2001
(Source Google)



Figure I.14. Montrant l'ampleur des dégâts de l'inondation du Ghardaïa en octobre 2008
(Source Google)

CHAPITRE II :

Présentation de la région d'étude

Chapitre II. Présentation de la région d'étude

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à une description générale du bassin versant AIN TOUTA appartient au grand bassin de Chot Melghigh afin de donner les indications géographiques, géomorphologiques, géologique et hydrogéologiques, bases indispensables à la compréhension future des mécanismes hydrologiques. En effet l'altitude, les cours d'eau et la forme d'un bassin versant reliées à la lithologie renseignent sur le type de réponse hydrologique du bassin. Aussi, l'ensemble des principales caractéristiques physiographiques qui jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau, a une forte influence sur la répartition spatiotemporelle des précipitations et des écoulements au sein du bassin étudié.

II.2. Présentation de la zone d'étude

II.2.1. Situation géographique du bassin versant AIN TOUTA

La commune de AIN TOUTA est située au Sud-Ouest du chef-lieu de la wilaya de BATNA à une distance de 30 Km, elle est limitée par :

- La commune D'OULED CHAABA au NORD.
- Les communes de TILATOU et OULED AOUF à l'OUEST.
- La commune de BENI FEDHALA EL HAKANIA à l'EST.
- La commune de MAAFA au SUD.

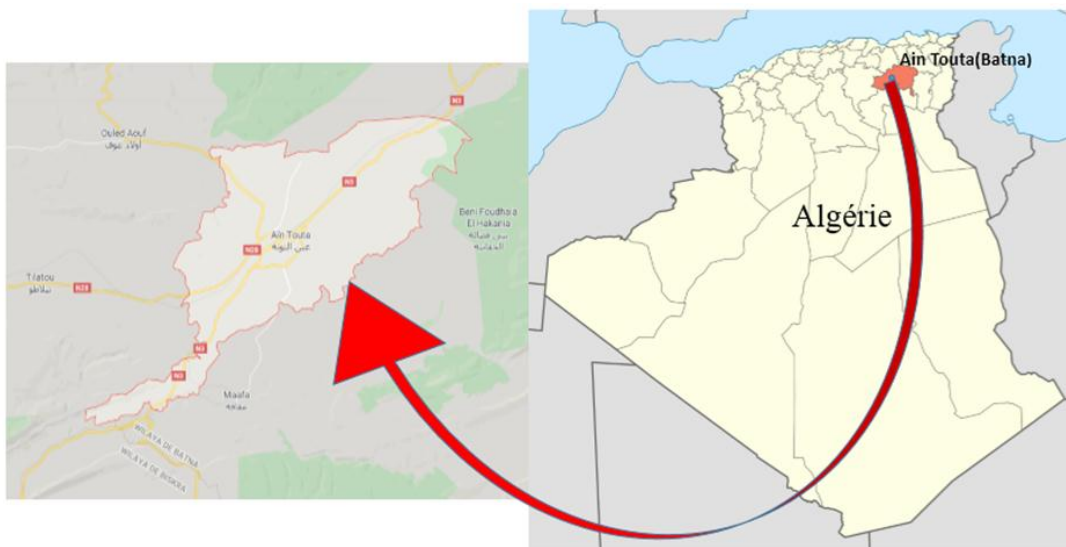


Figure II.1. Situation géographique de la ville d'AIN TOUTA wilaya de BATNA

Le sous bassins versants, objet de cette étude, sont situés dans les communes de AIN TOUTA et BENI FEDHALA EL HAKANIA wilaya de BATNA, appartient au grand bassin de Chot Melghigh numéroté 06 selon la nomenclature de l'ANRH. [9]

Les sous bassins versants délimitant la ville de l'Est et du Sud sont délimités (**figure II.2**) :

- Au Nord Est par DJEBEL TAFRENT ;
- A l'Est par les plateaux TAOURICHT et TAHENENT;
- Au Nord et au Nord Ouest par la ville d'AIN TOUTA ;
- Au Sud Dj GUEROUAOU.

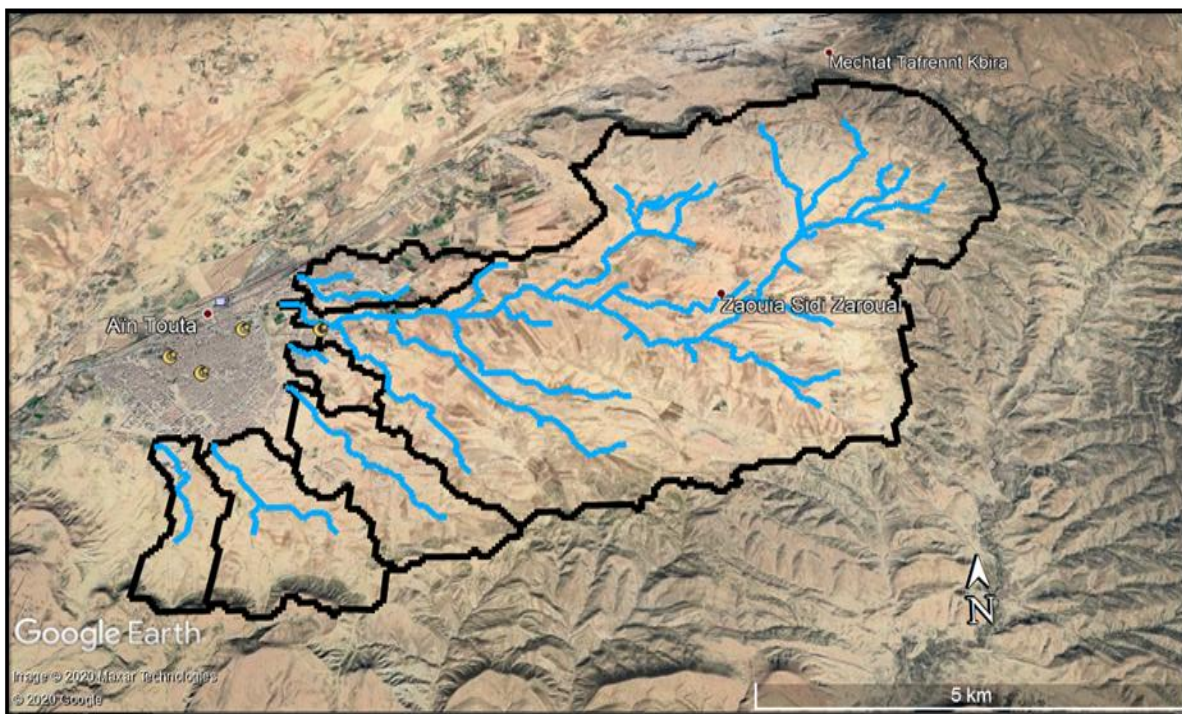


Figure II.2. Localisation de la zone d'étude et les sous bassins versants (Ville d'AIN TOUTA wilaya de BATNA)

II.2.2. Situation climatique du bassin versant AIN TOUTA

II.2.2.1. Données de base

Les différents paramètres morpho métriques du bassin versant (forme, altitude, pente, relief etc...) interviennent souvent de façon combinée dans les modalités de l'écoulement. Ils ont l'avantage de se prêter à une analyse quantifiée. Cette analyse intéresse deux domaines :

- La surface topographique,
- Le réseau hydrographique. Pour quantifier ces paramètres, les documents cartographiques et moyens de mesures suivants ont été utilisés :
 - Cartes topographiques
 - Images satellite LandSat8.
 - Logiciel ArcGis et AutoCad.

II.2.2.2. Climatologie

Pour fournir les caractéristiques climatiques au bassin étudié, nous avons utilisé les données météorologiques enregistrées à la station de Batna.

- La température de l'air
- La pluie
- Les vents
- L'humidité

Notre site est situé du côté nord et au piedmont des monts des Aurès. La station climatique de référence la plus proche prise en considération est la station de Batna (ferme). En effet, cette station jouie des mêmes caractéristiques du relief qui est à la continuité de celui du site de notre étude. La classification nationale de la région de Batna se situe dans la zone climatique des Aurès-Némémécha parmi les 09 zones que comporte la classification. Le palier pluviométrique de notre station est compris entre 300 et 400 mm ce qui nous permet de la classer dans le climat méditerranéen semi-aride, avec un hiver froid et un été moyennement chaud.

II.2.2.3. Température

Les données concernant les températures relèvent toujours de la station de BATNA (1973 2003)

Tableau II.1 Température min, max et moyenne mensuelle.[10]

SAISONS	AUTOMNE			HIVER			PRINTEMPS			ETE			MOY
MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
$T_{Min} C^0$	14,6	9,78	5,02	2,13	0,81	1,62	3,53	5,77	9,76	14,97	18,21	17,87	8,67
$T_{Max} C^0$	26,53	21,47	15,62	11,25	10,51	12,74	15,28	19,53	24,69	29,96	34,49	34,13	21,35
$T_{Moy/M}$	20,57	15,62	10,32	6,69	5,66	7,18	9,40	12,65	17,22	22,46	26,35	26,00	15,01
$T_{Moy/S}$	15,50			6,51			13,09			24,94			

Les températures sont variables d'une saison à l'autre. Comme on constate que la différence de températures entre l'été et l'hiver est très importante avec un écart de 18° c par contre le printemps et l'automne on des valeurs moyennes saisonnières qui se rapprochent 14°c.

II.2.2.4 Les Vents

Les vents les plus dominants sont ceux provenant du Nord- Ouest et du Sud- Est, la zone connait le SIROCCO pendant les mois de Juillet et Aout avec une moyenne annuelle de 15 jours.

Le tableau suivant indique les variations concernant les vitesses moyennes mensuelles et annuelles.

Tableau II.2 les variations concernant les vitesses moyennes mensuelles et annuelles.

Sens		N	N-E	E	S-E	S	S-W	W
Année		8,3	23,3	3,0	2,6	4,0	31,0	18,0
SAISONS	AUTOM	6,8	20,3	6,4	2,5	3,1	36,7	18,0
	HIVER	9,3	22,0	2,1	1,4	1,4	33,0	20,6
	PRINT	8,7	23,5	3,2	4,4	4,5	28,7	18,3
	ETE	8,6	28,6	3,7	3,4	6,1	25,6	15,3

II.2.2.5 La Pluviométrie

Avant d'évaluer les précipitations sur les sous bassins versants, on a analysé les données disponibles aux stations pluviométriques de Batna ferme et d'AIN TOUTA.

Tableau II.3 Caractéristiques de la station d'AIN TOUTA .[9]

Station	Code	Coordonnées (Km)			Période de fonctionnement
		X	Y	Z	
Ain Touta	05-12-03	472.15	289.85	1150	13 ans

Tableau II.4 Caractéristiques de la station de Batna. [9]

Station	Code	Coordonnées (Km)			Période de fonctionnement
		X	Y	Z	
Batna	07-03-16	710	261.4	982	75 ans

Pour ce qui concerne les caractéristiques des précipitations annuelles sur une période de 13 ans à la station d'Ain Touta on a : $P_{\text{moy}} = 277 \text{ mm}$.[9] Pour ce qui concerne les caractéristiques des précipitations annuelles sur une période de 75 ans à la station de Batna on a : $P_{\text{moy}} = 387 \text{ mm}$.[9]

II.3. Caractéristique géomorphologique de bassin versant

II.3.1 Définition du bassin versant

Le bassin versant, unité géographique sur laquelle se fonde l'analyse hydrologique, peut être considéré comme étant un " système hydrologique clos" à l'intérieur duquel aucun écoulement extérieur n'intervient et où tous les apports pluvieux s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire. Le bassin versant ainsi défini correspond à la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau principal et ses affluents à l'amont de cette section. Il est matérialisé par son exutoire à partir duquel est tracé le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite. Celle-ci correspond généralement à la ligne de crête et caractérise alors le bassin versant topographique.[8] Dans notre cas, le bassin versant ainsi délimité et stylisé correspond au bassin versant réel en raison d'un sol, de perméabilité moyenne qui recouvre le substratum. Par ailleurs, aucun apport latéral artificiel ne modifie la surface drainée circonscrite à l'intérieur du bassin versant.

II.3.2 Caractéristiques physiques et leurs influences sur l'écoulement des eaux

Les caractéristiques physiographiques du bassin versant influencent largement sa réponse hydrologique. Le temps de concentration T_c est influencé par diverses caractéristiques morphologiques : la taille du bassin (sa surface), sa forme, son altitude, sa pente et son orientation. A ces facteurs s'ajoutent le type de sol, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces facteurs, d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment aisément à partir de cartes adéquates.

II.3.3 Caractéristiques géométriques

II.3.3.1 Surface et périmètre

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface et à sa forme dépend du périmètre. La surface (**S**) et le périmètre (**P**) du bassin versant ont été déterminée par le module ArcMap.

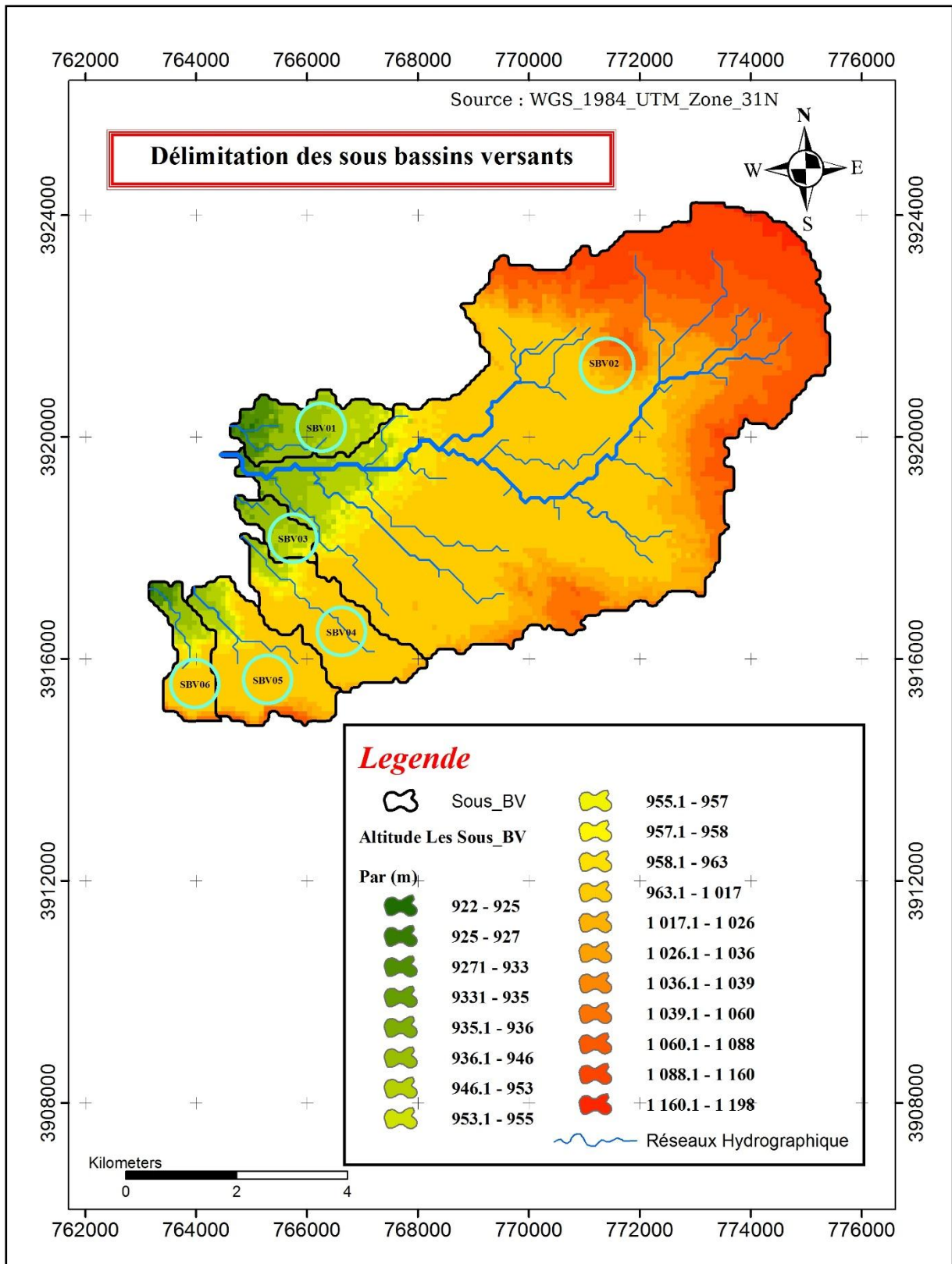


Figure II.3. Délimitation des sous bassins versants

II.3.3.2 Forme

La forme d'un sous bassins versants influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration. En revanche, les bassins en forme plus ramassée, présentant un temps de concentration plus court auront les plus forts débits de pointe. Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, l'indice **de compacité de Gravelius (1914)** définit comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots (II.1)$$

K : c'est l'indice de compacité de Gravelius,

A : surface du bassin versant [km²],

P : étant le périmètre du bassin [km].

- Lorsque KG = 1, Le BV est de forme circulaire. Lorsque KG = 1,12 : le BV est un carré.
- Lorsque KG se rapproche de 1 : le bassin est de forme compacte ou arrondi.
- Lorsque KG est supérieur à 1 : le bassin est de forme allongée

La notion de rectangle équivalent,

Introduite par Roche (1963), résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. [11] Si **L** et **l** représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent, alors : Le périmètre du rectangle équivalent vaut : $P = 2 \cdot (L+l)$; la surface $A = L \times l$; **KG** représente le coefficient de compacité. En combinant ces trois relations, on obtient :

$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2} \right] \dots\dots\dots (II.2)$$

II.3.3.3 Relief

L'influence du relief sur l'écoulement est évidente en raison de nombreux paramètres hydrométéorologiques qui varient avec l'altitude (précipitations, végétation, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine au moyen de caractéristiques suivantes :

- **Courbe hypsométrique**

La courbe hypsométrique traduit une vue synthétique sur la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle exprime la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude. La courbe hypsométrique sert en particulier à déterminer la pluie moyenne sur un bassin versant et donne des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage.[12]

Tableau II.5. Répartition altimétrique *du sous bassin versant 01*

Tranche d'altitude (m)		Surface partielle (km ²)	Surface cumulée (km ²)	Surface Cumulée (%)	Altitude moyenne Hi (m)
953	957	0.12	0.12	4.90	953
951	953	0.23	0.35	14.29	951
949	951	0.25	0.60	24.49	949
946	949	0.31	0.91	37.14	946
944	946	0.32	1.23	50.20	944
942	944	0.17	1.40	57.14	942
939	942	0.21	1.61	65.71	939
937	939	0.22	1.83	74.69	937
934	937	0.19	2.02	82.45	934
930	934	0.18	2.20	89.80	930
927	930	0.17	2.37	96.73	927
925	927	0.08	2.45	100	926

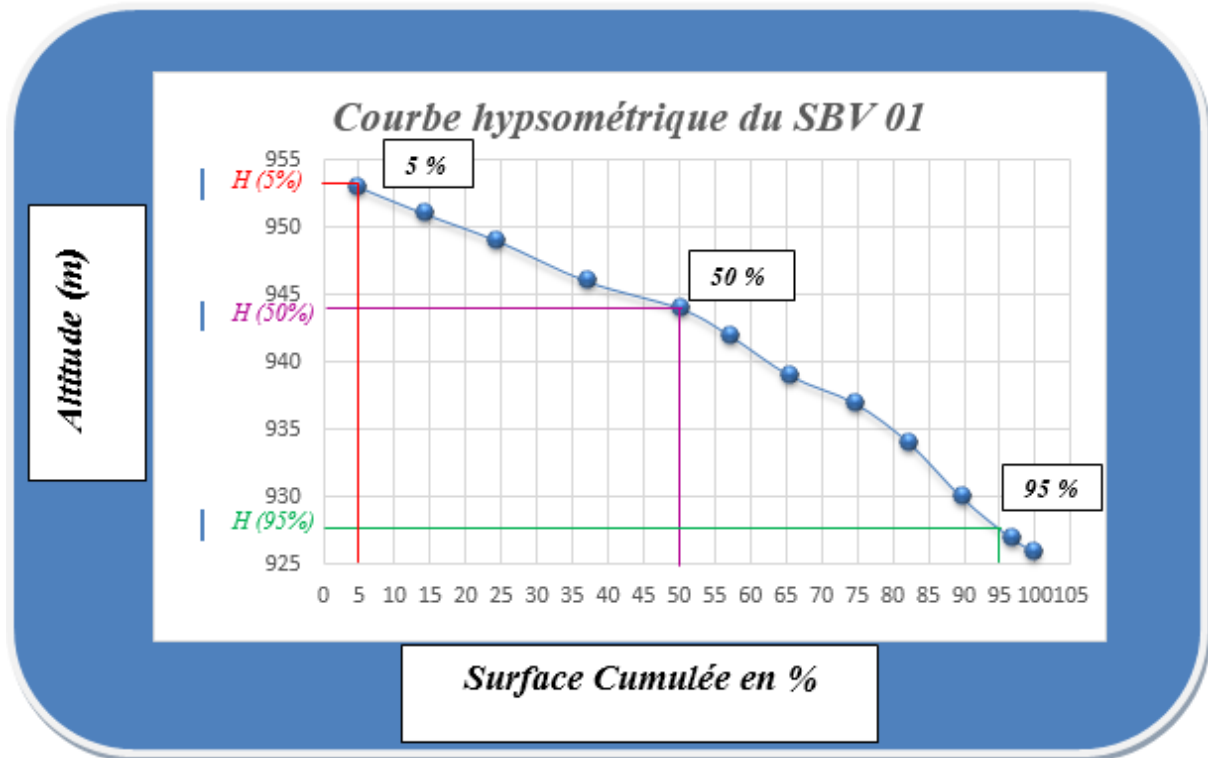


Figure II.4. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 01

Tableau II.6. Répartition altimétrique du sous bassin versant 02

Tranche d'altitude (m)		Surface partielle (km ²)	Surface cumulée (km ²)	Surface cumulée (%)	Altitude moyenne Hi (m)
1160	1198	0.32	0.32	0.67	1179
1136	1160	0.84	1.16	2.43	1148
1114	1136	1.35	2.51	5.25	1125
1092	1114	1.58	4.09	8.55	1103
1072	1092	2.77	6.86	14.35	1082
1053	1072	3.79	10.65	22.28	1062.5
1036	1053	4.32	14.97	31.31	1044.5
1020	1036	5.77	20.74	43.38	1028
1005	1020	6.79	27.53	57.58	1012.5
989	1005	7.15	34.68	72.54	997
972	989	5.65	40.33	84.35	980.5
955	972	4.78	45.11	94.35	963.5
927	955	2.70	47.81	100	941

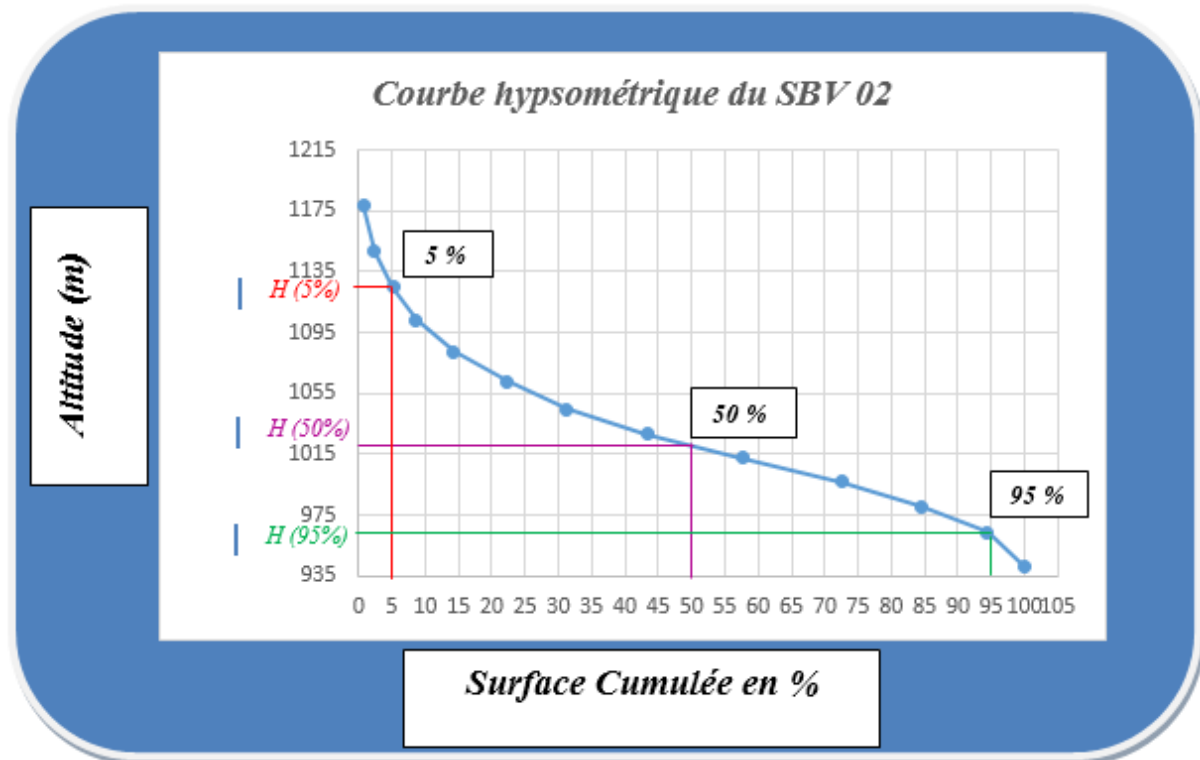


Figure II.5. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 02

Tableau II.7. Répartition altimétrique du sous bassin versant 03

Tranche d'altitude (m)		Surface partielle (km ²)	Surface Cumulée (km ²)	Surface cumulée (%)	Altitude moyenne Hi (m)
958	963	0.02	0.02	2.13	960.5
953	958	0.12	0.14	14.89	955.5
549	953	0.16	0.30	31.91	951
945	949	0.18	0.48	51.06	947
942	945	0.16	0.64	68.09	943.5
939	942	0.13	0.77	81.91	940.5
936	939	0.10	0.87	92.55	937.5
933	936	0.07	0.94	100	934.5

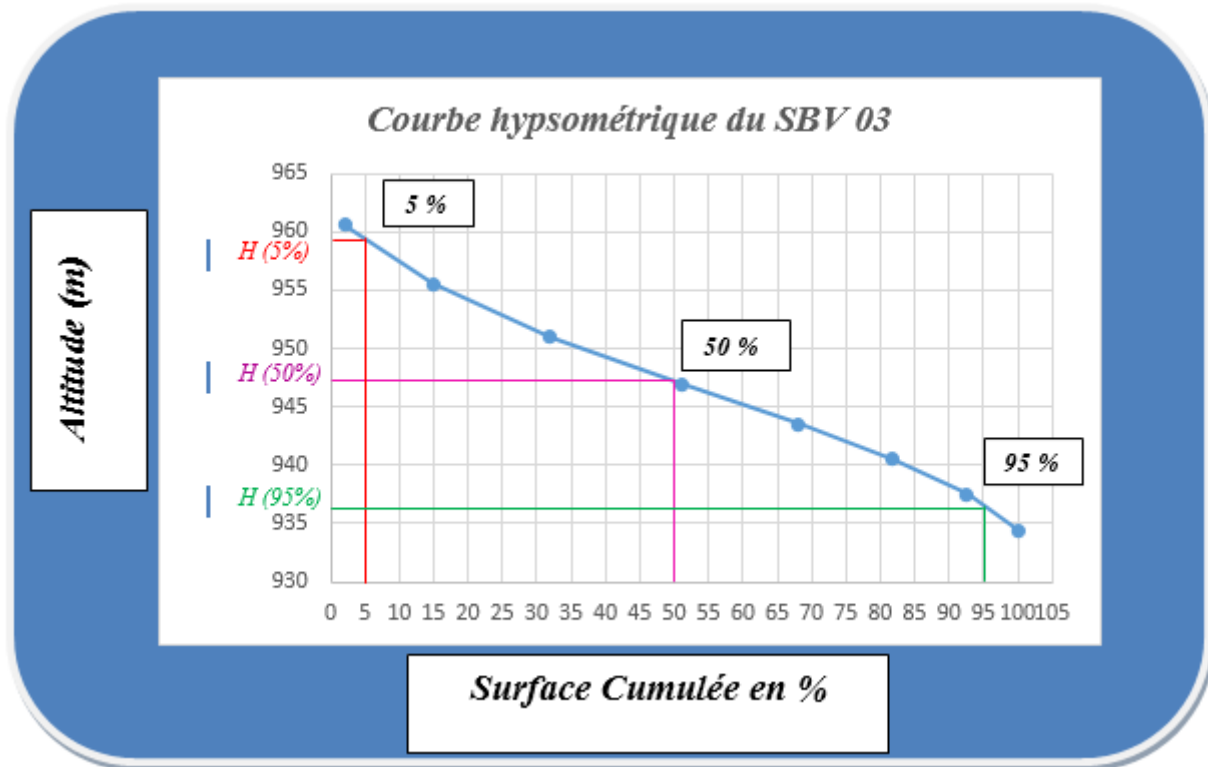


Figure II.6. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 03

Tableau II.8. Répartition altimétrique du sous bassin versant 04

Tranche d'altitude (m)		Surface partielle (km ²)	Surface cumulée (km ²)	Surface cumulée (%)	Altitude moyenne Hi (m)
1017	1026	0.12	0.12	3.14	1021.5
1012	1017	0.12	0.24	6.28	1014.5
1006	1012	0.20	0.44	11.52	1009
1000	1006	0.25	0.69	18.06	1003
994	1000	0.30	0.99	25.92	997
989	994	0.28	1.27	33.25	991.5
984	989	0.37	1.64	42.93	986.5
979	984	0.28	1.92	50.26	981.5
974	979	0.38	2.30	60.21	976.5
968	974	0.46	2.76	72.25	971
962	968	0.33	3.09	80.89	965
956	962	0.29	3.38	88.48	959
951	956	0.20	3.58	93.72	953.5
946	951	0.15	3.73	97.64	948.5
939	946	0.09	3.82	100	942.5

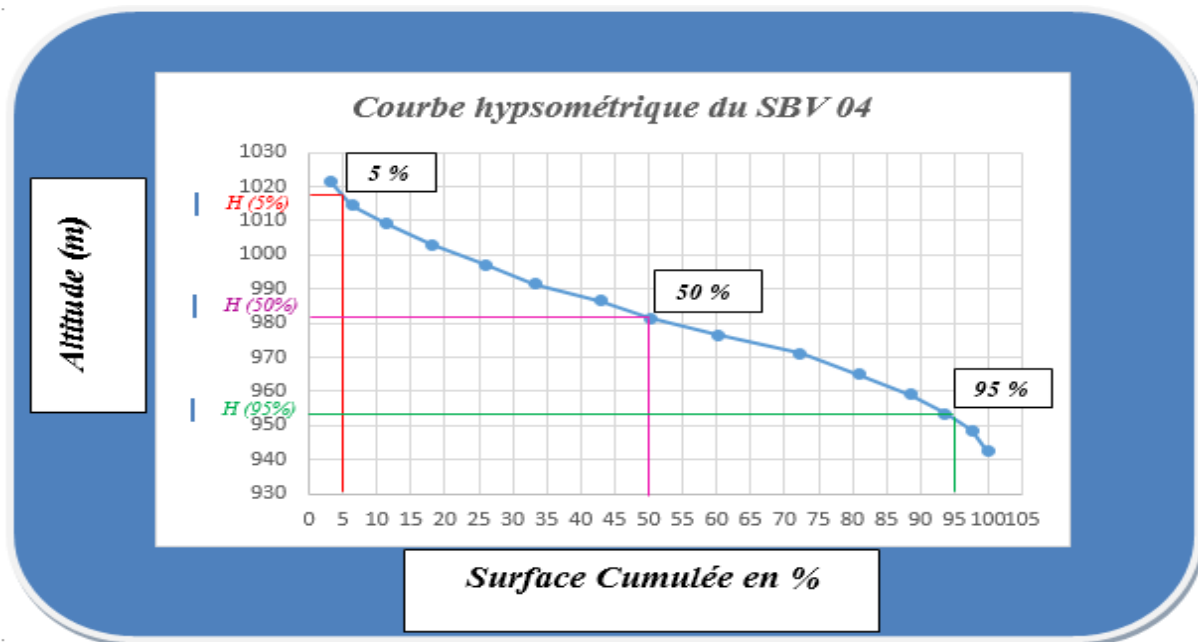


Figure II.7. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 04

Tableau II.9. Répartition altimétrique du sous bassin versant 05

Tranche d'altitude (m)		Surface partielle (km ²)	Surface cumulée (km ²)	Surface cumulée (%)	Altitude moyenne Hi (m)
1039	1088	0.20	0.20	4.89	1063.5
1006	1039	0.64	0.84	20.54	1022.5
983	1006	1.11	1.95	47.68	994.5
963	983	1.23	3.18	77.75	973
935	963	0.91	4.09	100	949

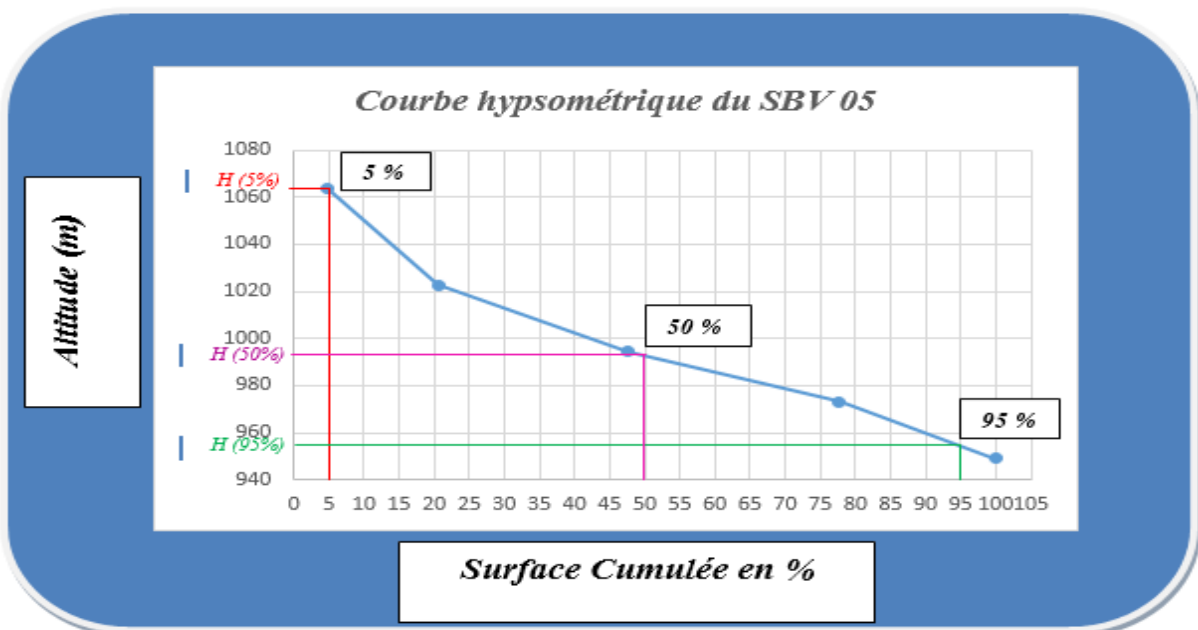


Figure II.8. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 05

Tableau II.10. Répartition altimétrique du sous bassin versant 06

Tranche d'altitude (m)		Surface Partielle (km ²)	Surface cumulée (km ²)	Surface cumulée (%)	Altitude moyenne Hi (m)
1036	1060	0.05	0.05	2.75	1048
1015	1036	0.08	0.13	7.14	1025.5
998	1015	0.12	0.25	13.74	1006.5
985	998	0.17	0.42	23.08	991.5
974	985	0.26	0.68	37.36	979.5
964	974	0.23	0.91	50.00	969
955	964	0.25	1.16	63.74	959.5
945	955	0.22	1.38	75.82	950
936	945	0.23	1.61	88.46	940.5
922	936	0.21	1.82	100	929

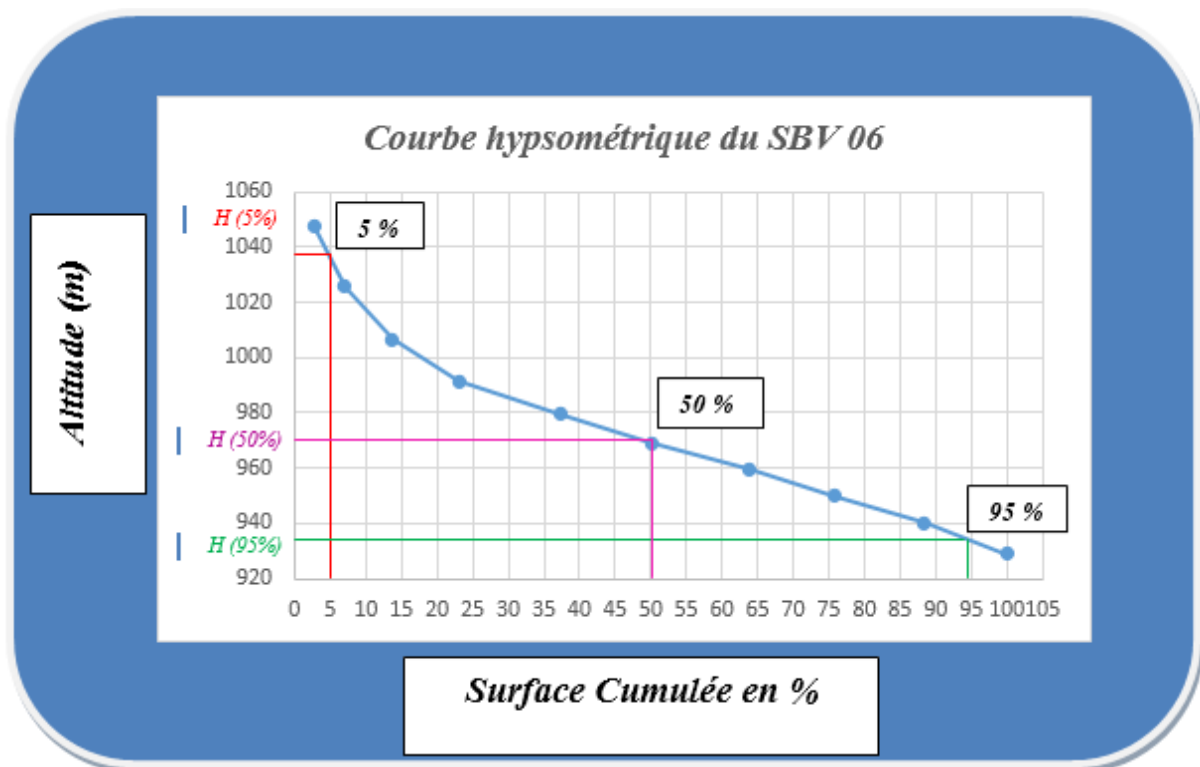


Figure II.9. Courbe hypsométrique du sous bassin versant 06

• Altitudes caractéristiques

1. Les altitudes maximale et minimale

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point à l'exutoire. Ces deux données permettent entre autre de déterminer l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

2. L'altitude moyenne

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

$$H_{moy} = \sum H_i * A_i / A \dots\dots\dots (II.3)$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m] ;

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

H_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du bassin versant [km²].

3. L'altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude est lue sur la courbe hypsométrique au point 50% de la surface totale du bassin.

Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

Indices de pente

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et de classification. Les indices de pente sont déterminés à partir de la répartition hypsométrique du bassin versant.

• Indice de pente globale (I_g)

Sur la courbe hypsométrique, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale, on aura les altitudes H5% et H95% entre lesquelles s'inscrivent l'indice de pente globale. Il est déterminé à partir de la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} \dots \dots \dots (II.4)$$

Avec :

D : Dénivelé entre H5% et H95%, D= H5% - H 95% (m)

L : Longueur du rectangle équivalent (Km).

• Indice de pente de Roche (Ir)

C'est un indice un peu artificiel qui rend bien compte de l'influence du facteur pente sur le régime hydrologique du bassin. Il se détermine sur le rectangle équivalent. Si les lignes de niveau sur le rectangle équivalent sont cotées a_0 (exutoire) a_1 a_2 ... a_{i-1} , a_i ... a_n , et la distance entre les courbes a_{i-1} et a_i soit x_i l'indice de pente de Roche est :

$$I_p = \frac{1}{L} \sum x_i \sqrt{\frac{a_i - a_{i-1}}{x_i}} \dots \dots \dots (II.5)$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent (m)

x_i : Distance entre les courbes de niveau a_{i-1} et a_i (m).

$\sqrt{\frac{a_i - a_{i-1}}{x_i}}$: est la pente moyenne de l'élément de surface compris entre les courbes de niveau

a_{i-1} et a_i .

L'indice de pente de roche est donc la somme des racines carrées des pentes moyennes de chacun des éléments, pondérée par la surface correspondante. Si l'on désigne par β_i la fraction de la surface totale du bassin comprise entre les cotes **a_{i-1}** et **a_i** (fraction donnée par la répartition hypsométrique du bassin) on a :

$$I_p = \frac{1}{L} \sum \sqrt{\beta_i (a_i - a_{i-1})} \dots \dots \dots (II.6)$$

• Indice de pente moyenne (Im)

Cet indice est calculé selon la formule suivante :[11]

$$I_m = \frac{H_{Max}-H_{Min}}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots (II.7)$$

Avec :

H_{MAX} : Altitude maximale observée sur le bassin versant (m).

H_{MIN} : Altitude minimale observée sur le bassin versant (m).

S : Surface du bassin versant (Km²).

• Dénivelé spécifique (D_S)

Elle est définie comme étant le produit de pente globale "I_g" et la racine carrée de la surface du bassin versant.

$$D_S = I_g \sqrt{S} \dots\dots\dots (II.8)$$

Avec :

I_g: Indice de pente globale (m/Km).

S : Surface du bassin versant (Km²).

Elle donne lieu à classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins.

- ✓ **R1 Relief très faible D_s < 10 m**
- ✓ **R2 Relief faible 10 m < D_s < 25 m**
- ✓ **R3 Relief assez faible 25 m < D_s < 50 m**
- ✓ **R4 Relief modéré 50 m < D_s < 100 m**
- ✓ **R5 Relief assez fort 100 m < D_s < 250 m**
- ✓ **R6 Relief fort 250 m < D_s < 500 m**
- ✓ **R7 Relief très fort D_s > 500 m**

Tableau II.11. Indice de pente globale et classe de relief

<i>SBV</i>	<i>Superficie A (km²)</i>	<i>Indice de pente globale Ig (m/km)</i>	<i>Indice de pente de ROCHE</i>	<i>Indice de pente moyenne (m/km)</i>	<i>Dénivelée Spécifique Ds (m)</i>	<i>Classe de relief</i>
01	2.51	5.75	6.72	20.19	9.12	Relief très faible
02	47.83	8.26	7.10	39.18	57.13	Relief modéré
03	0.97	8.79	6.34	30.43	8.66	Relief très faible
04	3.84	10.82	9.75	44.42	21.19	Relief faible
05	4.09	21.10	7.35	75.66	42.66	Relief assez faible
06	1.83	27.41	11.00	101.97	37.10	Relief assez faible

II.3.4 Caractéristiques hydrographique

Le réseau hydrographique correspond à l'ensemble des cours d'eau, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Il traduit certainement une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes conditionnées par quatre facteurs principaux :

- La géologie, par ses caractéristiques, influence en particulier la forme et l'orientation du réseau hydrographique.
- Le climat, par ses effets, conditionne l'existence et la densité du réseau hydrographique.
- La pente du terrain, par son importance, détermine l'action des cours d'eau. Souvent érosive dans les zones élevées, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine en plaine.
- La présence humaine, par son action (drainage des terres agricoles, construction de barrages, endiguement, protection des berges et correction des cours d'eau) modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

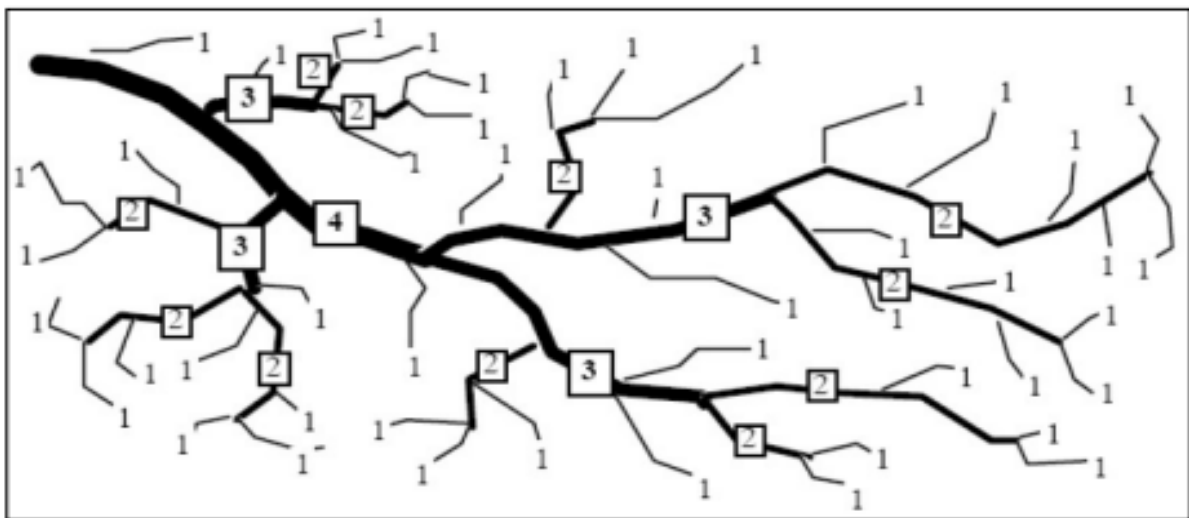
Divers paramètres descriptifs sont utilisés pour définir le réseau hydrographique.

II.3.4.1 Structure du réseau et ordre des cours d'eau

Le schéma du chevelu hydrographique a été établi à partir de l'image satellitaire. La classification est facilitée par un système de numérotation des tronçons de cours d'eau (rivière

principale et affluents). L'ordre des cours d'eau est donc une classification qui reflète la ramification du cours d'eau. Il existe plusieurs types de classifications des tronçons des cours d'eau, dont celle de Strehler (1957), la plus utilisée et que nous avons adopté ici. Cette classification permet de décrire sans ambiguïté le développement du réseau de drainage d'un bassin de l'amont vers l'aval. Elle se base sur les règles suivantes :

- Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend



l'ordre du plus élevé des deux.

- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté de un.

Un bassin versant à l'ordre du plus élevé de ses cours d'eau, soit l'ordre du cours d'eau principal à l'exutoire. Il existe d'autres classifications de ce type comme celle de Horton (1945) qui est parfois utilisée dans le même but.

Figure II.8. Réseau hydrographique et ses ordres d'un bassin versant (Source cours hydrologie)

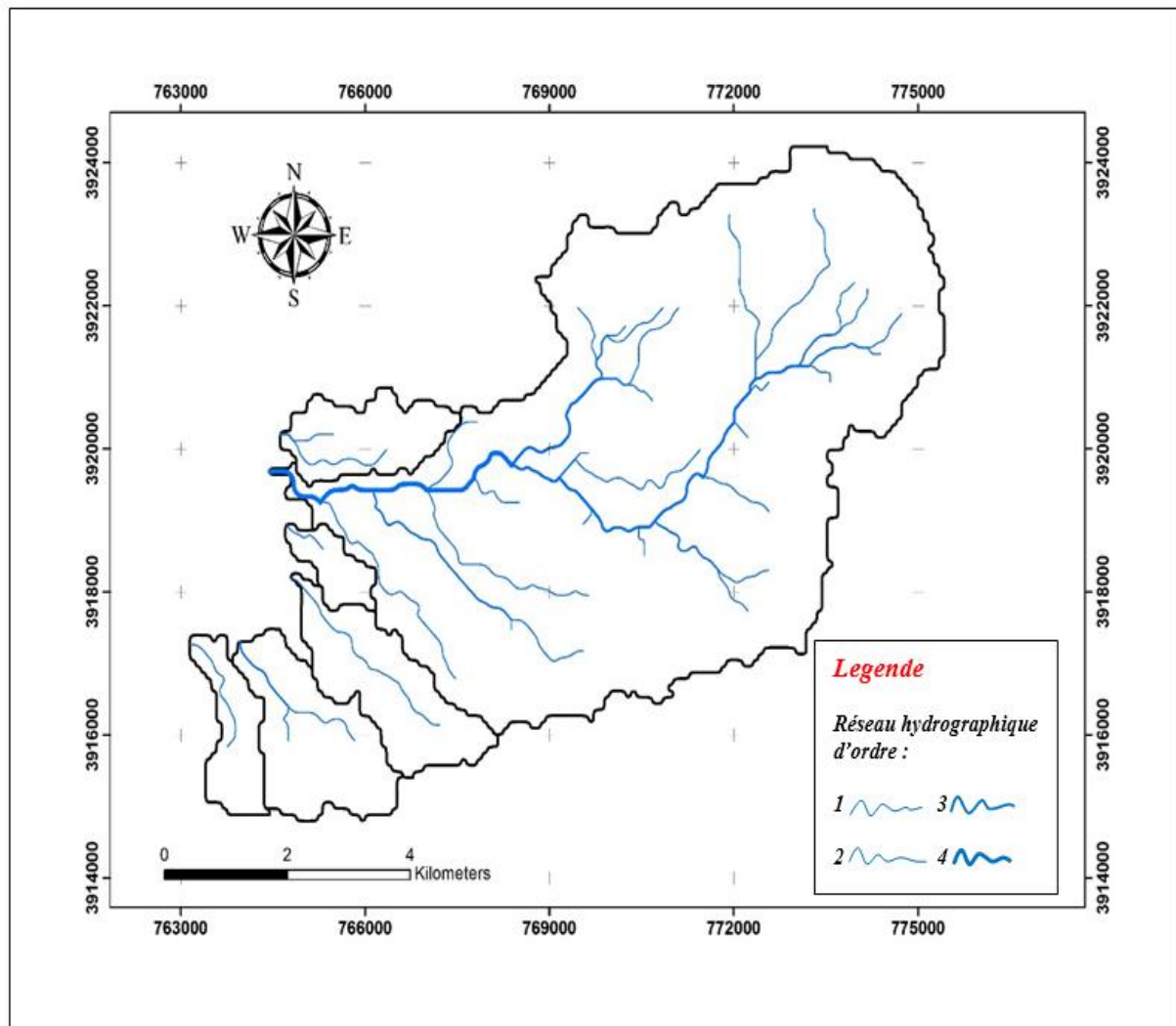


Figure II.10. Réseau hydrographique et ses ordres des sous bassins versants d'AIN TOUTA

II.3.4.2 Longueurs et pentes caractéristiques du réseau

• Longueur caractéristique

Un bassin versant se caractérise principalement par la longueur du cours d'eau principal (L) qui est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux.

• Pente moyenne d'un cours d'eau

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau circule jusqu'à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Toute chose égale par ailleurs, une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de

s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol. Le calcul des pentes moyennes et partielles de cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.[11]

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L} \dots\dots\dots (II.9)$$

Avec :

P_{moy}: pente moyenne du cours d'eau ;

ΔH_{max}: dénivellation maximale de l'oued (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire) ;

L: longueur du cours d'eau principal.

II.3.4.3 Degré de développement du réseau

• Densité de drainage

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \dots\dots\dots (II.10)$$

Avec :

D_d : densité de drainage [km/km²] ;

L_i : longueur de cours d'eau [km] ; **A** : surface du bassin versant [km²].

• Densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N_i}{A} \dots\dots\dots (II.11)$$

Où :

F: densité hydrographique [km⁻²] ;

N_i : nombre de cours d'eau ;

A: superficie du bassin [km²].

Le Coefficient de torrentialité se calcule à partir de la relation $C_T = Dd \times F_1$, avec $F_1 = N_1 / S$ fréquence de thalwegs d'ordre 1

II.3.4.4 Le temps de concentration (Tc)

Des eaux sur un bassin versant se définit comme la durée maximum nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.[13] Il est composé de trois termes différents :

- **t_h**: Temps d'humectation. Temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne s'écoule.
- **t_r**: Temps de ruissellement ou d'écoulement. Temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur).
- **t_a**: Temps d'acheminement. Temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration (**T_c**) correspond donc à la somme de ces trois termes, soit :

$$t_c = \max(\sum(t_h + t_r + t_a)) \dots\dots\dots(II.12)$$

Le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques. Il existe plusieurs types de relations qui permettent d'estimer Tc (Giandotti, Basso, Passini, Service routier de Californie etc....). Nous utiliserons pour le calcul de ce facteur les formules empiriques suivantes :

Formule de GIANDOTTI

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L_P}{0.8\sqrt{H_{MOY} - H_{MIN}}} \dots\dots\dots(II.13)$$

Formule de Ventura & Passini

$$T_c = a * \sqrt{S} * \frac{L_P}{\sqrt{I_g}} \dots\dots\dots(II.14)$$

Formule ANONYME - R.BOURRIER (2, p55)

$$T_c = 4 \left(\frac{\sqrt[3]{SL}}{\sqrt{P}} \right)^{0.75} \dots\dots\dots(II.15)$$

Formule de Ventura

$$T_c = 76.3 * \sqrt{\left(\frac{S}{P_{moy}}\right)} \dots\dots\dots (II.16)$$

Avec :

T_c: Temps de concentration (h).

L_P: Longueur du talweg principal (Km).

S ; A: Superficie du bassin versant (Km²).

P_m ; P: Périmètre du bassin versant (Km).

H_{MOY}: Altitude moyenne du bassin versant (m).

H_{MIN}: Altitude minimale du bassin versant (m).

II.3.4.5. Vitesse de propagation de la crue (V_c)

C'est la vitesse moyenne de propagation de la crue, elle est donnée par la formule :

$$V_c = \frac{L_P}{T_C} \dots\dots\dots (II.17)$$

Avec :

V_c : Vitesse de concentration (Km/h).

L_p : Longueur du talweg principal (Km).

T_c : Temps de concentration (h).

Chaque bassin versant réagit de façon propre aux précipitations qu'il reçoit.

Les caractéristiques hydrologiques d'un bassin sont fonction d'une part du climat qu'il subit et d'autre part de son propre milieu physique. Pour pouvoir comparer des bassins, et expliquer leur comportement distinct pour des mêmes conditions climatologiques, il est nécessaire de quantifier les facteurs caractéristiques du milieu physique.

Tableau II.12. Temps et vitesses de concentration des bassins versants

Site AIN TOUTA	S BV	Temps de concentration (Tc) (heures)					Vitesse de propagation (VC) km/h
		GIANDOTTI	PASSINI	Ventura	ANONYME	Moyenne	
	1	2.586	0.092	0.449	4.478	1.901	0.68
	2	3.837	1.351	1.405	21.307	6.975	0.75
	3	2.078	0.036	0.227	2.637	1.245	0.81
	4	1.895	0.321	0.374	7.748	2.585	1.93
	5	1.755	0.204	0.296	6.617	2.218	1.94
	6	1.558	0.057	0.17	3.516	1.325	1.66

Tableau II.13. Caractéristiques principales des sous bassins versants d'AIN TOUTA

Paramètres	Symbole	Unité	SBV1	SBV2	SBV3	SBV4	SBV5	SBV6
Superficie	A	Km^2	2.51	47.83	0.97	3.84	4.09	1.83
Périmètre	P	Km	9.86	44.96	5.88	13.32	11.93	8.47
Indice de compacité	K_c	/	1.74	1.82	1.67	1.90	1.65	1.75
Longueur du rectangle équivalent	L_R	m	4.35	20.10	2.56	6.01	5.17	3.74
Largeur du rectangle équivalent	l_R	m	0.58	2.38	0.38	0.64	0.79	0.49
Indice de pente de Roche	I_P	%	6.72	7.10	6.34	9.75	7.35	11
Indice de pente global	I_g	m/km	5.75	8.26	8.79	10.82	21.10	27.41
Dénivelée spécifique	D_s	m	9.12	57.13	8.66	21.19	42.66	37.10
Type de relief	/	/	Relief très faible	Relief modéré	Relief très faible	Relief faible	Relief assez faible	Relief assez faible
Altitude moyenne	H_{moy}	m	941	1020	945.5	980.5	986	968
Altitude maximale	H_{max}	m	957	1198	963	1026	1088	1060
Altitude minimale	H_{min}	m	925	927	933	939	935	922
Altitude à 5%	$H_{5\%}$	m	953	1127	959	1017	1063	1036.5
Altitude à 95%	$H_{95\%}$	m	928	961	936.5	952	954	934
Longueur de cours d'eau principal	L_p	Km	1.29	5.2	1.004	5	4.3	2.026
Densité de drainage totale	D_d	Km/Km^2	1.56	1.17	1.03	1.29	1.53	1.11
Pente moyenne de l'oued	I_{emoy}	m/Km	20.19	39.18	30.43	44.42	75.66	101.97
Coefficient de torrentialité	C_t	/	0.62	0.02	1.06	0.34	0.37	0.6
Temps de concentration	T_c	Heures	1.901	6.975	1.245	2.585	2.218	1.325
Vitesse de propagation de crue	V_e	Km/h	0.68	0.75	0.81	1.93	1.94	1.66
Classification de Horton	Ordre	/	02	04	01	01	02	01

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de représenter les sous bassins versants délimitant la ville d'AIN TOUTA, connaître la topographie, les conditions climatiques et l'état actuel du réseau hydrographique de la région ainsi que les caractéristique hydro morphologiques d'AIN TOUTA. La collecte des données consiste à rechercher toutes les informations disponibles dans la région à étudier. Cette étape constitue la phase la plus importante. Elle est basée sur la collecte des informations brutes, et aussi de vérifier sa fiabilité pour une prise de décision correcte. Nous allons donc, procéder dans le chapitre qui suit au calcul hydrologique.

CHAPITRE III :

Etude hydrologique

Chapitre III. Etude hydrologique

III.1. Introduction

L'objectif de cette étude hydrologique est de déterminer pour tous les bassins versants délimitant la ville les hydrogrammes de crues à différentes périodes de retour et de définir les débits maxima probables correspondants qui seront utilisée comme conditions aux limites dans l'étude hydraulique. A cet effet, et du fait de l'absence de stations hydrométriques dans la zone d'étude, l'utilisation d'un modèle de calcul des débits et d'estimation des eaux à l'échelle d'un bassin versant en se basant sur les précipitations extrêmes devient nécessaire.

III.2. Analyse des données pluviométriques

III.2.1. Précipitation maximales journalières

L'analyse des pluies maximales journalières est nécessaire pour l'estimation des débits de pointe des crues. On a utilisé, pour ce faire, les données ANRH des stations de BATNA aux données existantes III.1.

Tableau III.1. Les précipitations maximales journalières (1929-2011).[9]

Année	Pjmax(mm)	Année	Pjmax(mm)	Année	Pjmax(mm)	Année	Pjmax(mm)
1929/1930	38.4	1953/1954	21	1975/1976	46.4	1996/1997	27.3
1930/1931	37	1954/1955	32	1977/1978	32.9	1997/1998	51.9
1931/1932	23.6	1955/1956	46	1978/1979	30.5	1998/1999	17.2
1932/1933	39.9	1956/1957	20.5	1979/198	12.3	1999/2000	26.8
1933/1934	35.1	1957/1958	46.5	1980/1981	25.4	2000/2001	39.8
1934/1935	29.9	1958/1959	39	1981/1982	14.3	2001/2002	20.3
1935/1936	37.6	1959/1960	29.2	1982/1983	59.6	2002/2003	52.4
1936/1937	48.1	1960/1961	28.4	1983/1984	48.3	2003/2004	45.2
1937/1938	46.6	1961/1962	47.7	1984/1985	36.8	2004/2005	42.8
1938/1939	24.4	1962/1963	57	1985/1986	20.1	2005/2006	49.9
1939/194	41.5	1963/1964	26	1986/1987	13.1	2006/2007	21.1
1940/1941	17.2	1964/1965	23.8	1987/1988	35.2	2007/2008	36.2
1941/1942	46.2	1965/1966	33.5	1988/1989	60	2008/2009	39.3
1942/1943	33.2	1966/1967	18.4	1989/1990	39.7	2009/2010	32.6
1944/1945	20.7	1967/1968	78.5	1990/1991	20.7	2010/2011	64.6
1945/1946	21	1968/1969	51.7	1991/1992	22.1		
1947/1948	22.5	1971/1972	25.3	1992/1993	40.8		
1949/1951	23.6	1972/1973	49.6	1993/1994	24		
1951/1952	48.8	1973/1974	32.7	1994/1995	34.3		
1952/1953	38.8	1974/1975	23.7	1995/1996	34.3		

III.2.2. Ajustement des pluies maximales journalières :

L'ajustement des pluies maximales journalières sera effectué à l'aide du logiciel HYFRAN. On a effectué l'ajustement de la série des pluies maximales journalières à des lois déférentes, en utilisant le logiciel HYFRAN, avec une comparaison entre les lois.

Dans notre étude on suit les étapes suivantes :

- Classer la série des précipitations par ordre croissant.
- Calcule de la fréquence expérimentale.
- Calcule des caractéristiques empiriques de la série de donnée.
- Ajuster graphiquement la loi choisie.
- Calculer le quantile et son intervalle de confiance.

Les caractéristiques empiriques de la série de donnée ont été obtenues par le logiciel HYFRAN.

Tableau III.2.Caractéristique de la série de donnée avec N = 75ans

Caractéristiques	Valeurs
<i>Statistiques de base</i>	75
<i>Minimum</i>	12.3
<i>Maximum</i>	78.5
<i>Moyenne</i>	35.0
<i>Ecart-type</i>	13.3
<i>Médiane</i>	34.3
<i>Coefficient de variation (Cv)</i>	0.381
<i>Coefficient d'asymétrie (Cs)</i>	0.611
<i>Coefficient d'aplatissement (Ck)</i>	3.14

La représentation des observations sur des papiers normaux et leurs histogrammes sont présentés dans les figures III.1et III.2 respectivement :

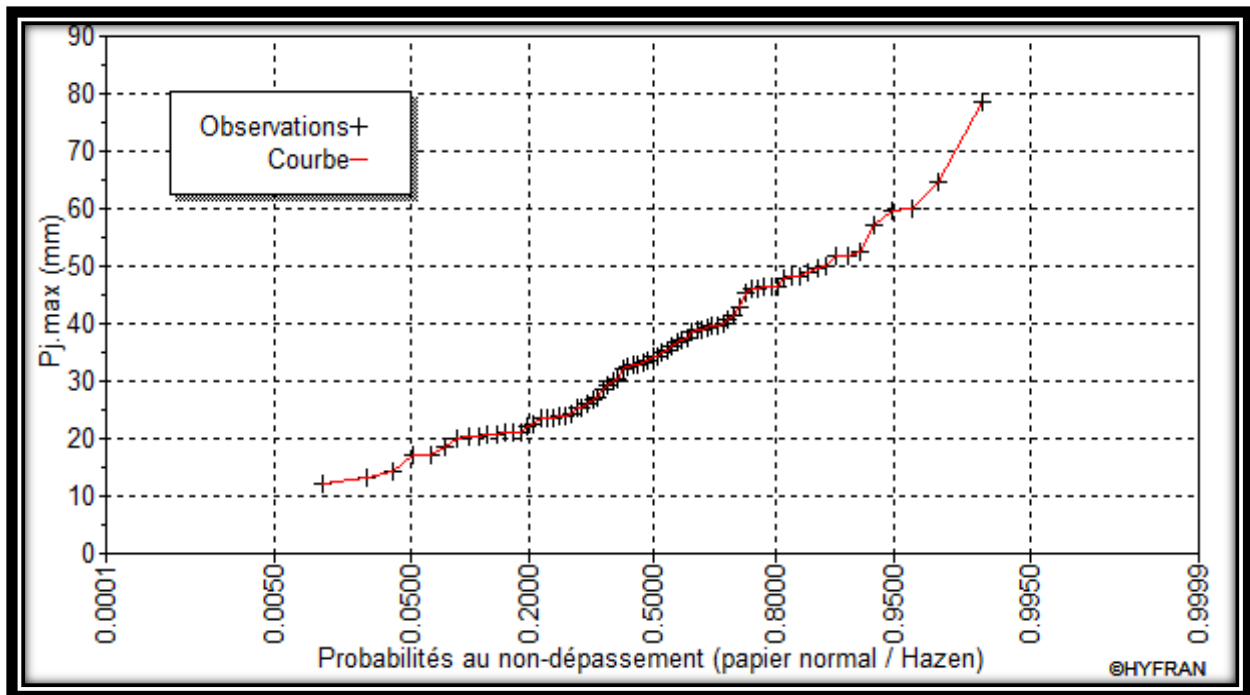


Figure III.1. Représentation des observations sur papier normale

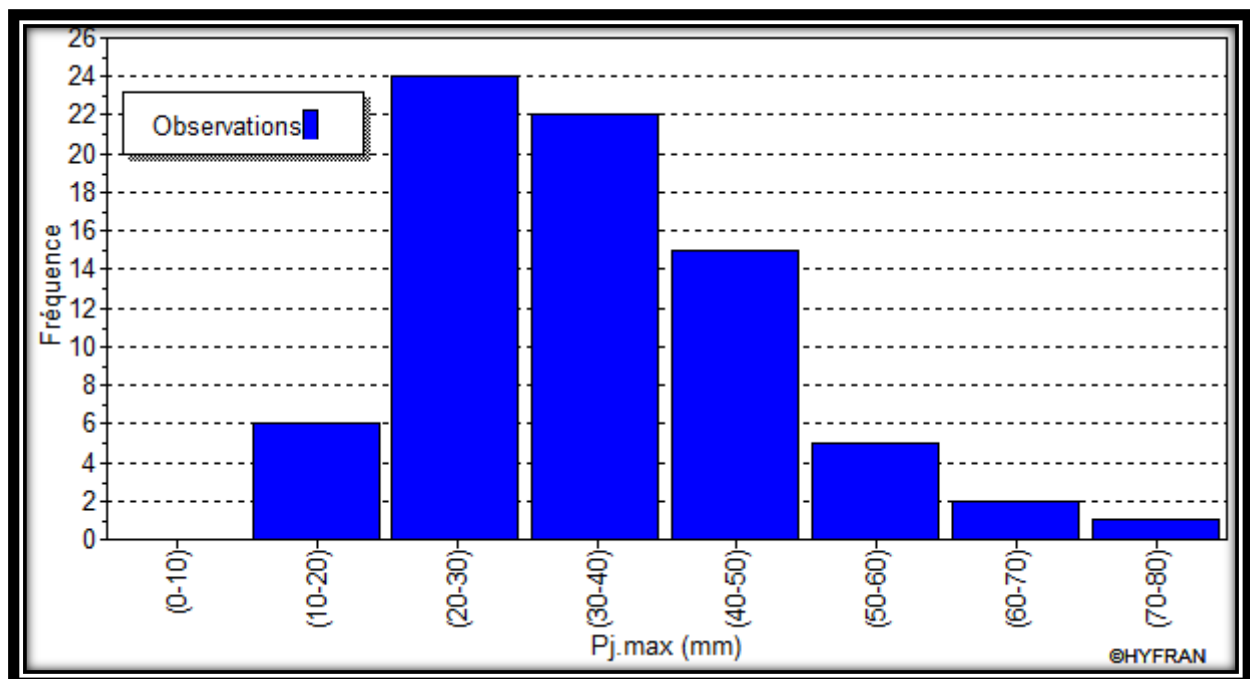


Figure III.2. Histogramme des observations

III.2.3. Choix de la loi d'ajustement : [14]

Les lois d'ajustement sont nombreuses et ne peuvent être appliquées à un échantillon que si les conditions d'homogénéités et stationnarités sont réunies.

Les critères de choix d'une loi sont liés à un ajustement graphique d'abord et ensuite à un test de dispersion. L'allure des points sur du papier à probabilité permet d'accepter ou de rejeter la loi.

Dans présente étude on applique la loi de GALTON (Loi Log normale) et la loi de GUMBEL (Double exponentiel) et ce avec le logiciel HYFRAN.

Les caractéristiques des échantillons, les tests d'adéquation des deux lois ainsi que l'homogénéité sont calculés directement à partir du logiciel.

III.2.3.1. Ajustement suivant la loi de GALTON (Log Normale) :

Description théorique :Le procède d'ajustement est établi avec une représentation sur du papier log normale.

La loi de GALTON a une fonction de répartition qui s'exprime selon la fonction suivante :

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\ln x - \mu]^2}{2\sigma^2} \right\} \dots\dots\dots(III.1)$$

$$U = \frac{\ln Xi - \ln \bar{X}}{\delta \ln X} \text{ (Variable réduite de gausse)}$$

\bar{X} : La moyenne de l'échantillon

δ : L'écart-type de l'échantillon

L'équation de la droite de GALTON est la suivante :

$$\ln X (p\%) = \ln (\bar{X}) + \delta \cdot \ln u (p\%) \dots\dots\dots(III.2)$$

$$\ln X = \frac{\sum_{i=1}^{N=75} \ln (\bar{X})}{N}$$

Avant de procéder à l'ajustement il faut suivre les étapes suivantes

- classer les valeurs des précipitations par ordre croissant avec attribution d'un rang 1.2.3.4.5...n.
- calculer pour chaque valeur de précipitation la fréquence expérimentale par la formule de HAZEN :

$$F(x) = \frac{m-0.5}{n} \dots\dots\dots(III.3)$$

Avec :

m : Rang de précipitation ;

n : Nombre d'observations 75.

- Calculer la variable réduite de GALTON donnée par la formule suivante :

$$U = \frac{\ln Xi - \ln \bar{X}}{\delta \ln X} \dots \dots \dots (III.4)$$

- **GALTON (log-Normale) (Maximum des vrais semblances) :**

Nombre d'observation n 75

❖ **Paramètre :**

Mu = 3.48052, Sigma = 0.395542

❖ **Quantile :**

q= F(X) (probabilité au non dépassement)

T= 1/ (1-q)

Les résultats d'ajustement obtenus par la loi de GALTON sont représentés dans le tableau III.3 suivant :

Tableau III.3. Résultats de l'ajustement à la loi de GALTON

Période de retour (T)	Probabilité(q)	Pluies max (mm)	Ecart-type	Intervalle de confiance (95%)	
500	0.9980	101.40	10.60	80.70	122.00
200	0.995	90.00	8.58	73.10	107.00
100	0.99	81.52	7.20	67.40	95.60
50	0.98	73.19	5.92	61.60	84.80
10	0.90	53.92	3.33	47.40	60.50
5	0.80	45.30	2.41	40.60	50.00

On constate que la droite d'ajustement est bien ajustée par rapport au nuage de points expérimentaux.

Test de Ki deux Carré (X²) :

Hypothèses :

H₀ : L'échantillon provient d'une loi Log normale

H₁ : L'échantillon ne provient pas d'une loi Log normale

Résultats :

Résultat de la statistique :	X ² = 7.87
p-value	p = 0.4466
Degrés de liberté :	8
Nombre de classes :	11

Résultats :

Nous pouvons accepter H₀ au niveau de signification de 5 %

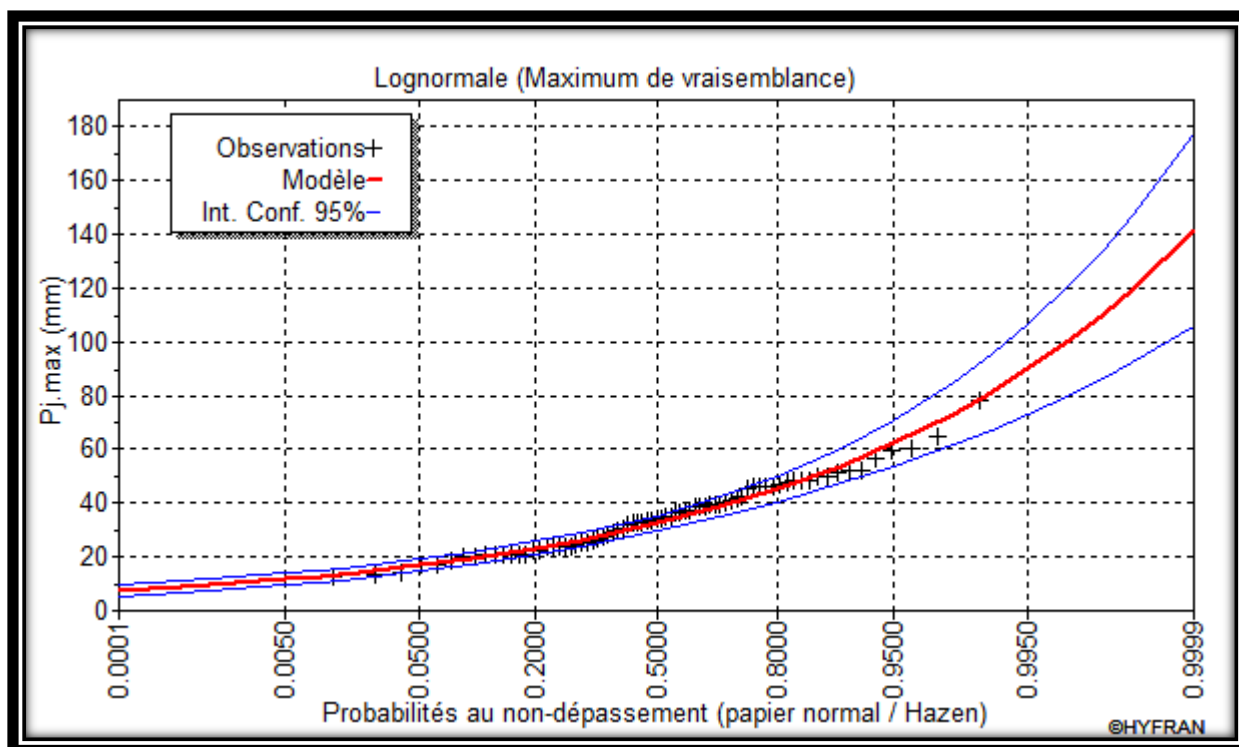


Figure III.3.Représentation graphique de l’ajustement par la loi de log normale

III.2.3.2.Ajustement suivant la loi de GUMBEL :

Description théorique :

Le procédé d’ajustement est identique à celui établi pour la loi de GALTON. Seule la représentation graphique change ou elle est faite sur du papier (Gumbel / Hazen). La loi de GUMBEL a une fonction de répartition qui s’exprime selon la formule suivante :

$$F(X) = e^{-e^{-y}} \dots\dots\dots(III.5)$$

Tel que : $y = a(x - x_0)$

- $1/a$: La pente de la droite de Gumbel,
- y : Variable réduite de GUMBEL,
- x : Précipitation maximale journalière (mm),
- x_0 : Ordonnée à l’origine en (mm).

On peut écrire :

$$y = -\ln(-\ln(F(x))) \dots\dots\dots(III.6)$$

✓ Gumbel (Méthode des moments) :

Nombre d’observations : 75

❖ Paramètre :

u : = 28.9811, α : = 10.3766

❖ Quantiles :

 $q = F(X)$ (probabilité au non-dépassement)

 $T = 1 / (1-q)$
Résultats pratiques :

Les paramètres qu'on peut les tirer à partir de cette série lorsqu'on applique la loi de GUMBEL

Tableau III.4. Résultats de l'ajustement à la loi de GUMBEL

<i>Période de retour (T)</i>	<i>Probabilité(q)</i>	<i>Pluies max (mm)</i>	<i>Ecart- type</i>	<i>Intervalle de confiance (95%)</i>	
500	0.9980	93.50	8.02	77.70	109.00
200	0.995	83.90	6.89	70.40	97.40
100	0.99	76.70	6.03	64.90	88.50
50	0.98	69.50	5.18	59.30	79.60
10	0.90	52.30	3.21	46.00	58.60
5	0.80	44.50	2.38	39.90	41.90

On constate que la droite d'ajustement est bien ajustée par rapport au nuage de points expérimentaux.

Test de K_i deux Carré (X²) :**Hypothèses :**

H₀ : L'échantillon provient d'une loi Gumbel

H₁ : L'échantillon ne provient pas d'une loi Gumbel

Résultats :

Résultat de la statistique :	X² = 17.55
p-value	p = 0.0249
Degrés de liberté :	8
Nombre de classes :	11

Résultats :

Nous devons REJETER H₀ au niveau de signification de 5 %, mais on l'accepte au niveau de signification de 1% La figure III.4 illustre l'ajustement de la série pluviométrique à la loi de GUMBEL (Méthode des moments).

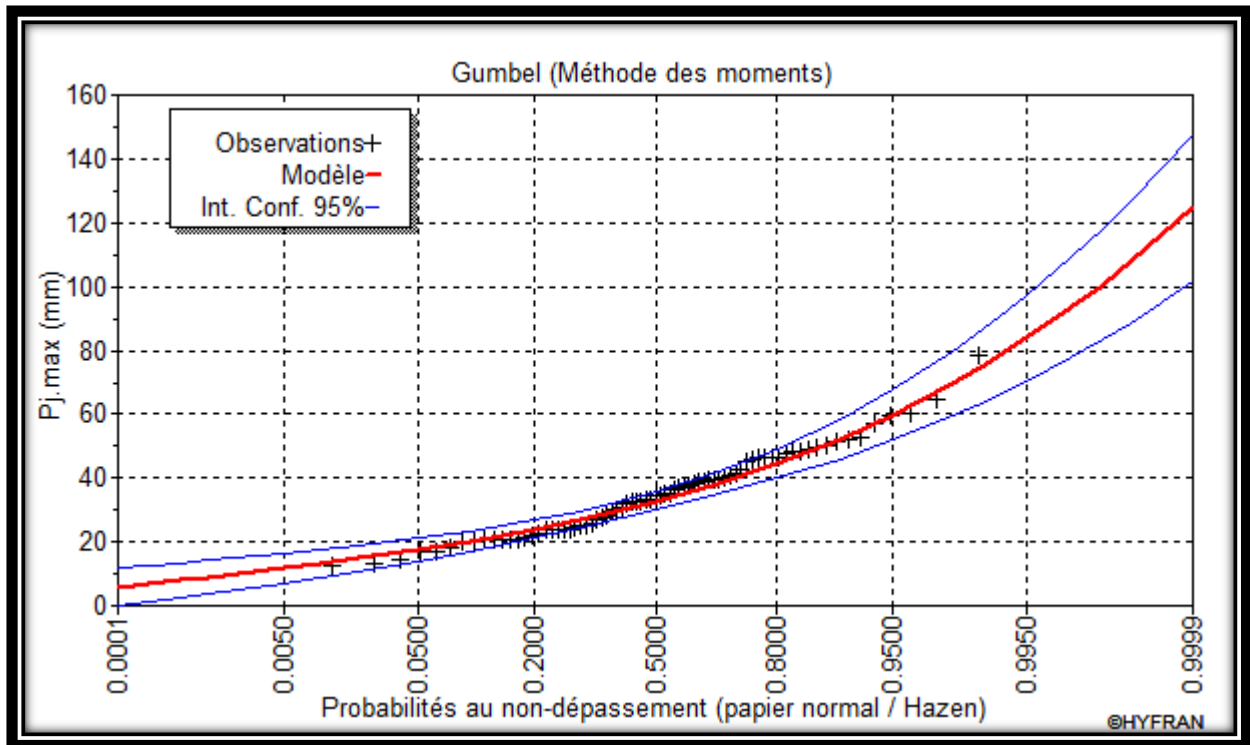


Figure III.4. Ajustement à la loi de GUMBEL

III.2.3.3. Comparaison entre les deux lois d'ajustement

La figure montre la comparaison entre les deux lois d'ajustement (Loi de **Gumbel** et loi de **Galton**)

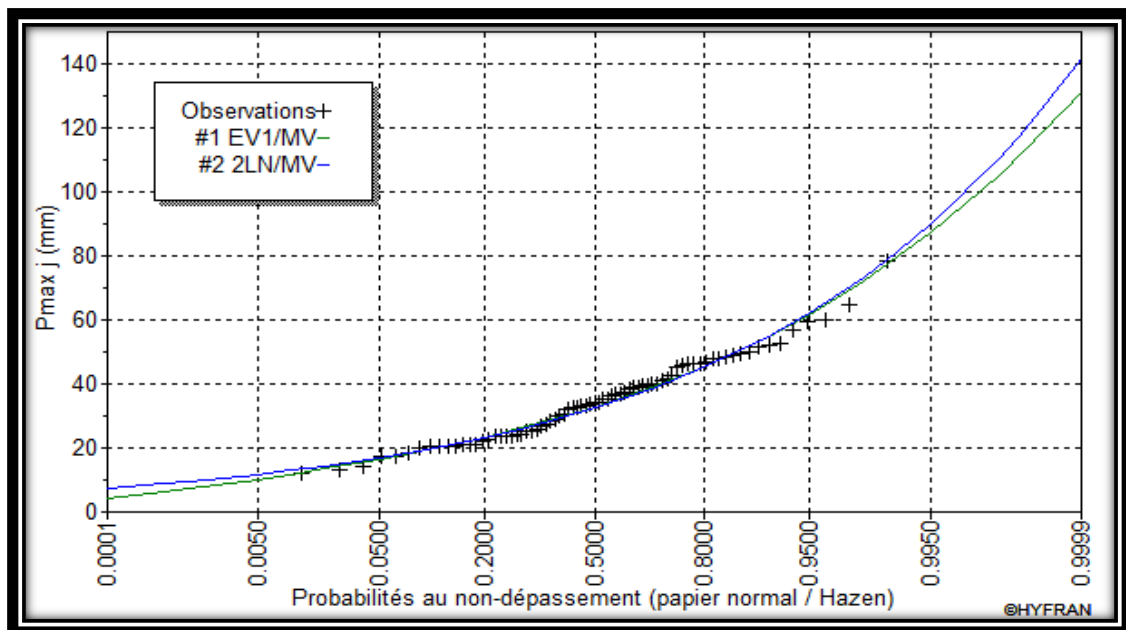


Figure III.5. Comparaison entre les deux lois d'ajustement

En se référant aux graphes obtenues, par ces deux lois, celui de GUMBEL et GALTON, nous avons remarqué que l'ajustement issu de la loi de GALTON est le meilleur du moment que la position des données expérimentales sont plus proches de la droite théorique. Alors on opte pour la loi de GALTON (Log normale).

III.3. Pluies de courte durée

Pour une période donnée, la quantité de pluie tombée en un temps (t) est déterminée par la formule suivante :

$$P_{max t}, P\% = P_{max j}, P\% \left(\frac{t}{24} \right)^b \dots\dots\dots (III.7)$$

Avec :

P_{max t}, P% : Pluie de courte durée pour une fréquence donnée (mm).

P_{max j}, P% : Pluie maximale journalière pour la même fréquence (mm).

t : Durée de pluie (h).

b : Exposant climatique ; b = 0,25

L'intensité des pluies $I_t = \frac{P_{tc}}{t} \dots\dots\dots (III.8)$

Les résultats du calcul sont regroupés dans les tableaux **III.4 et III.5**

Tableau III.5. Pluies de courtes durées correspondant au temps de concentration de sous bassin 1.2.3.4.5.6

T	500		200		100		50		10		5	
	$\bar{P}_{max j}$ (mm)	P_{tc} (mm)	$\bar{P}_{max j}$ (mm)	P_{tc} (mm)	$\bar{P}_{max j}$ (mm)	P_{tc} (mm)	$\bar{P}_{max j}$ (mm)	P_{tc} (mm)	$\bar{P}_{max j}$ (mm)	P_{tc} (mm)	$\bar{P}_{max j}$ (mm)	P_{tc} (mm)
SBV 1	101.4	53.80	90	47.75	81.52	43.25	73.19	38.83	53.92	28.61	45.30	24.03
SBV 2	101.4	74.45	90	66.08	81.52	59.85	73.19	53.74	53.92	39.59	45.30	33.26
SBV 3	101.4	48.39	90	42.95	81.52	38.90	73.19	34.93	53.92	25.73	45.30	21.62
SBV 4	101.4	58.09	90	51.56	81.52	46.70	73.19	41.93	53.92	30.89	45.30	25.95
SBV 5	101.4	55.91	90	49.62	81.52	44.95	73.19	40.35	53.92	29.73	45.30	24.98
SBV 6	101.4	49.15	90	43.63	81.52	39.52	73.19	35.48	53.92	26.14	45.30	21.96

III.4. Etude des crues

III.4.1. Débits maxima fréquents

L'absence de données observées nous a contraints à utiliser les formules empiriques les plus adéquates.

✓ **Formule de TURAZZA**

L'une des formules les plus utilisées est celle de TURAZZA qui s'exprime de la manière suivante :

$$Q_{p\%} = (C \times I_{p\%} \times S) / 3.6 \dots\dots\dots(III.9)$$

Où :

Q_{p%} = Débit maximum de fréquence (P%)

C= Coefficient de ruissellement lié à la probabilité d'occurrence

I (P%) = Intensité de la pluie de fréquence (P%) pour une durée égale au temps de concentration T_c.

S = Superficie du bassin versant.

D'après son auteur, il est recommandé d'affecter les valeurs suivantes au coefficient (C)

Tableau III.6.Les valeurs de coefficient (C)

Période de retour (ans)	500	200	100	50	10	5
C	0,75	0,725	0,7	0,65	0,625	0,55

Rappelons que :

$$I_{p\%} = P_{tc(p\%)} / T_c \dots\dots\dots(III.10)$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.7.Débits fréquents obtenus par la méthode Turraza

T	500		200		100		50		10		5	
	I _p (%)	Q _{p%} (m ³ /s)	I _p (%)	Q _{p%} (m ³ /s)	I _p (%)	Q _{p%} (m ³ /s)	I _p (%)	Q _{p%} (m ³ /s)	I _p (%)	Q _{p%} (m ³ /s)	I _p (%)	Q _{p%} (m ³ /s)
SBV 01	28.29	14.81	25.11	12.70	22.75	11.11	20.42	9.26	15.05	6.56	12.64	4.85
SBV 02	10.67	106.36	9.47	91.26	8.58	79.81	7.70	66.54	5.68	47.13	4.77	34.85
SBV 03	38.88	7.87	34.51	6.75	31.26	5.91	28.06	4.92	20.68	3.49	17.37	2.58
SBV 04	22.48	17.96	19.95	15.41	18.07	13.47	16.22	11.23	11.95	7.96	10.04	5.88
SBV 05	25.21	21.47	22.37	18.43	20.26	16.11	18.19	13.43	13.40	9.52	11.26	7.04
SBV 06	37.09	14.15	32.92	12.14	29.82	10.62	26.77	8.85	19.72	6.27	16.57	4.64

✓ Formule de SOKOLOVSKY

$$Q_{max} = \frac{0.28 P_{tcP\%} \cdot C_e \cdot S}{t_m} * f \dots\dots\dots(III.11)$$

f : coefficient de forme de la crue, $f = \frac{12}{4+3\gamma}$ On prend $\gamma=2,50$ d'où $f=1.04$ hydrogramme triangulaire

Tableau III.8.Coefficient de forme

γ	2,0	2,5	3,0	4,0
f	1,20	1,04	0,92	0,75

tm : temps de montée, en heures où $t_m = f (t_a)$

ta : étant la durée de l'averse $t_a = t_c, = t_m$ cas des petits bassins versants

Ce : Coefficient de ruissellement en fonction de la fréquence

Tableau III.9. Débits fréquents obtenus par la méthode Sokolovsky

Période de retour (ans)		500	200	100	50	10	5
SBV1	Qmaxp% (m3/s)	15.52	13.32	11.65	9.71	6.88	5.09
SBV2		111.50	95.67	83.67	69.75	49.41	36.53
SBV3		8.25	7.08	6.19	5.16	3.66	2.70
SBV4		18.83	16.15	14.13	11.78	8.34	6.17
SBV5		22.51	19.32	16.89	14.08	9.98	7.38
SBV6		14.84	12.73	11.13	9.28	6.57	4.86

✓ Formule de MALLET-GAUTHIER

$$Q_{maxp\%} = 2k \log(1 + 20\bar{P}) \frac{S}{\sqrt{L_t}} \sqrt{1 + 4 * \log T - \log S} \dots \dots \dots (III.12)$$

Avec :

K : Constante comprise entre 1-3, on prend K=1.

\bar{P} : Pluie moyenne annuelle mm.

S : Surface du bassin versant (Km²).

L_t : Longueur du talweg principal (Km).

T : Période de retour

Tableau III.10. Débits fréquents obtenus par la méthode MALLET-GAUTHIER

Période de retour (ans)		500	200	100	50	10	5
SBV1	Qmaxp% (m3/s)	55.92	51.87	48.58	45.05	35.53	30.53
SBV2		499.71	458.71	425.08	388.55	286.28	228.55
SBV3		24.97	23.22	21.81	20.30	16.27	14.18
SBV4		43.02	39.85	37.27	34.50	27.00	23.02
SBV5		49.40	45.75	42.78	39.59	30.94	26.36
SBV6		32.73	30.39	28.49	26.45	20.98	18.12

Tableau III.11. Résultats des crues par les lois empiriques

Périodes de retour (ans)		500	200	100	50	10	5	
Q _{max} %	SBV1	<i>Turazza</i>	14.81	12.70	11.11	9.26	6.56	4.85
		<i>Sokolovsky</i>	15.52	13.32	11.65	9.71	6.88	5.09
		<i>Mallet-Gauthier</i>	55.92	51.87	48.58	45.05	35.53	30.53
Q _{max} %	SBV2	<i>Turazza</i>	106.36	91.26	79.81	66.54	47.13	34.85
		<i>Sokolovsky</i>	111.50	95.67	83.67	69.75	49.41	36.53
		<i>Mallet-Gauthier</i>	499.71	458.71	425.08	388.55	286.28	228.55
Q _{max} %	SBV3	<i>Turazza</i>	7.87	6.75	5.91	4.92	3.49	2.58
		<i>Sokolovsky</i>	8.25	7.08	6.19	5.16	3.66	2.70
		<i>Mallet-Gauthier</i>	24.97	23.22	21.81	20.30	16.27	14.18
Q _{max} %	SBV4	<i>Turazza</i>	17.96	15.41	13.47	11.23	7.96	5.88
		<i>Sokolovsky</i>	18.83	16.15	14.13	11.78	8.34	6.17
		<i>Mallet-Gauthier</i>	43.02	39.85	37.27	34.50	27.00	23.02
Q _{max} %	SBV5	<i>Turazza</i>	21.47	18.43	16.11	13.43	9.52	7.04
		<i>Sokolovsky</i>	22.51	19.32	16.89	14.08	9.98	7.38
		<i>Mallet-Gauthier</i>	49.40	45.75	42.78	39.59	30.94	26.36
Q _{max} %	SBV6	<i>Turazza</i>	14.15	12.14	10.62	8.85	6.27	4.64
		<i>Sokolovsky</i>	14.84	12.73	11.13	9.28	6.57	4.86
		<i>Mallet-Gauthier</i>	32.73	30.39	28.49	26.45	20.98	18.12

Choix du débit de crues (débit de dimensionnement) : D'après les résultats obtenus par les différentes méthodes de calcul de débit de crues, on remarque que les valeurs obtenues par la méthode de SOKOLOVSKY et celle de Turazza sont très proches l'une de l'autre et cela pour les différentes fréquences de calcul.

On remarque que les résultats obtenus par la méthode Mallet-Gauthier sont grandes par rapport aux autres valeurs.

La méthode de SOKOLOVSKY qui elle, par contre, tiens compte de la surface, du temps de concentration, du coefficient de forme, du coefficient de ruissellement ainsi que de la précipitation correspondante au temps de concentration.

Etant donné que pour le tracé de l'hydrogramme de crue nous utilisons **la méthode de SOKOLOVSKY**, nous optons pour les débits de crues obtenus par la loi du même auteur.

Tableau III.12. Débits fréquents arrêtés pour les calculs

Période de retour (ans)		500	200	100	50	10	5
Q _{max} % (m ³ /s)	SBV1	15.52	13.32	11.65	9.71	6.88	5.09
	SBV2	111.50	95.67	83.67	69.75	49.41	36.53
	SBV3	8.25	7.08	6.19	5.16	3.66	2.70
	SBV4	18.83	16.15	14.13	11.78	8.34	6.17
	SBV5	22.51	19.32	16.89	14.08	9.98	7.38
	SBV6	14.84	12.73	11.13	9.28	6.57	4.86

III.4.2. Hydrogramme de crues

La schématisation géométrique proposée par SOKOLOVSKI pour le tracé des hydrogrammes de crues permet de pallier l'absence de stations de mesures hydrométriques. Cet auteur donne à l'hydrogramme de crue la forme d'une courbe fermée par deux paraboles jointes au sommet dont les équations sont les suivantes :

$$Qt = Q_{max} \left(\frac{t}{tm} \right)^m \dots\dots\dots (III.13)$$

Avec :

Qt = Débit à l'instant **t** en heures après le début de la crue (m³/s)

Q_{max} = Débit maximal de la crue (m³/s)

T_m = Temps de montée de la crue en heures. L'auteur préconise pour les petits bassins **tm = tc**

m = Exposant de la parabole, pour les crues pluviales **m = 2**.

Equation de la courbe de décrue :

$$Q_{(t')} = Q_{max} \left(\frac{td - t'}{td} \right)^n \dots\dots\dots (III.14)$$

Avec :

Q_{max} (%) : débit maximum de fréquence donnée.

Qt: débit instantané au moment (t).

tm, td : temps de montée et de décrue.

m, n : puissances des paraboles (m = 3, n = 2).

Temps de base : **tb = tm + td** . On considère généralement que : **td = 4 tm**, et **tm = tc** .

Le détail des calculs est reporté dans le tableau III.12 et les hydrogrammes de crues pour différents temps de retour sont représentés sur la figure III.5

Tableau III.13. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. SBV 01

Temps (min)	500	200	100	50	10	5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	2.98	2.56	2.24	1.87	1.32	0.98
100	11.93	10.24	8.95	7.46	5.29	3.91
114.05	15.52	13.32	11.65	9.71	6.88	5.09
200	2.75	2.36	2.06	1.72	1.22	0.90
250	1.43	1.23	1.08	0.90	0.64	0.47
300	0.62	0.53	0.47	0.39	0.28	0.20
350	0.20	0.17	0.15	0.12	0.09	0.06
400	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
450	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

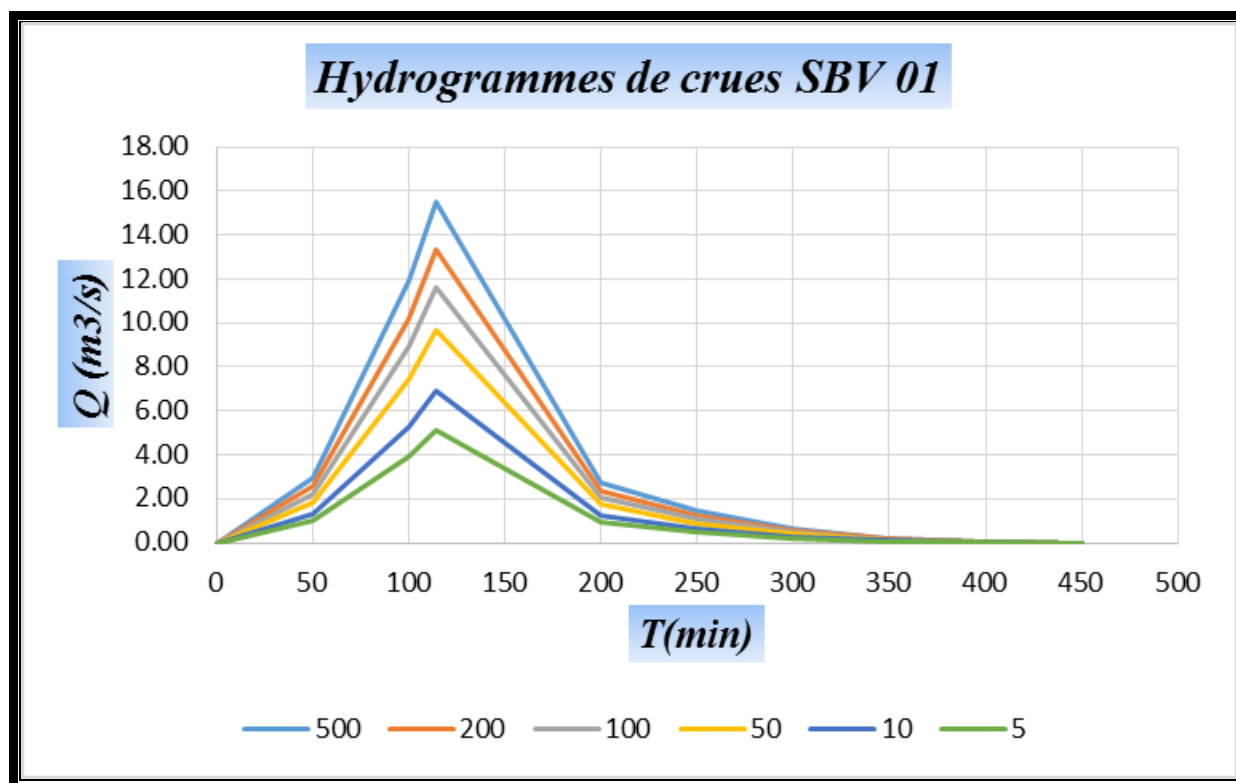


Figure III.6. Hydrogrammes de crues SBV 01

Tableau III.14. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. *SBV 02*

Temps (min)	500	200	100	50	10	5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	6.37	5.46	4.78	3.98	2.82	2.09
200	25.47	21.85	19.11	15.93	11.28	8.34
300	57.30	49.16	43.00	35.84	25.39	18.77
400	101.86	87.40	76.44	63.72	45.14	33.37
<i>418.5</i>	<i>111.5</i>	<i>95.67</i>	<i>83.67</i>	<i>69.75</i>	<i>49.41</i>	<i>36.53</i>
600	29.45	25.27	22.10	18.42	13.05	9.65
700	21.96	18.84	16.48	13.74	9.73	7.20
800	15.87	13.62	11.91	9.93	7.03	5.20
900	11.02	9.46	8.27	6.89	4.88	3.61
1000	7.28	6.24	5.46	4.55	3.22	2.38
1050	5.78	4.96	4.33	3.61	2.56	1.89
1200	2.53	2.17	1.90	1.58	1.12	0.83
1300	1.24	1.07	0.93	0.78	0.55	0.41
1400	0.49	0.42	0.37	0.31	0.22	0.16
1500	0.13	0.11	0.09	0.08	0.06	0.04
1600	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
1674	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

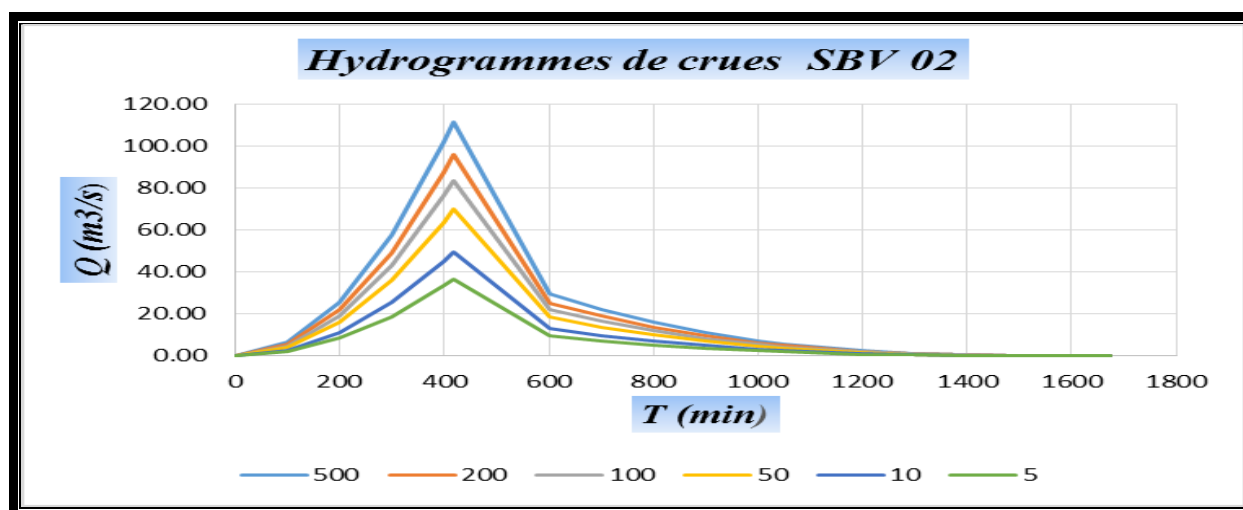


Figure III.7. Hydrogrammes de crues *SBV 02*

Tableau III.15. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. *SBV 03*

Temps (min)	500	200	100	50	10	5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	3.70	3.17	2.77	2.31	1.64	1.21
<u>74.7</u>	<u>8.25</u>	<u>7.08</u>	<u>6.19</u>	<u>5.16</u>	<u>3.66</u>	<u>2.70</u>
150	1.02	0.87	0.76	0.64	0.45	0.33
200	0.30	0.26	0.22	0.19	0.13	0.10
250	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01
298.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

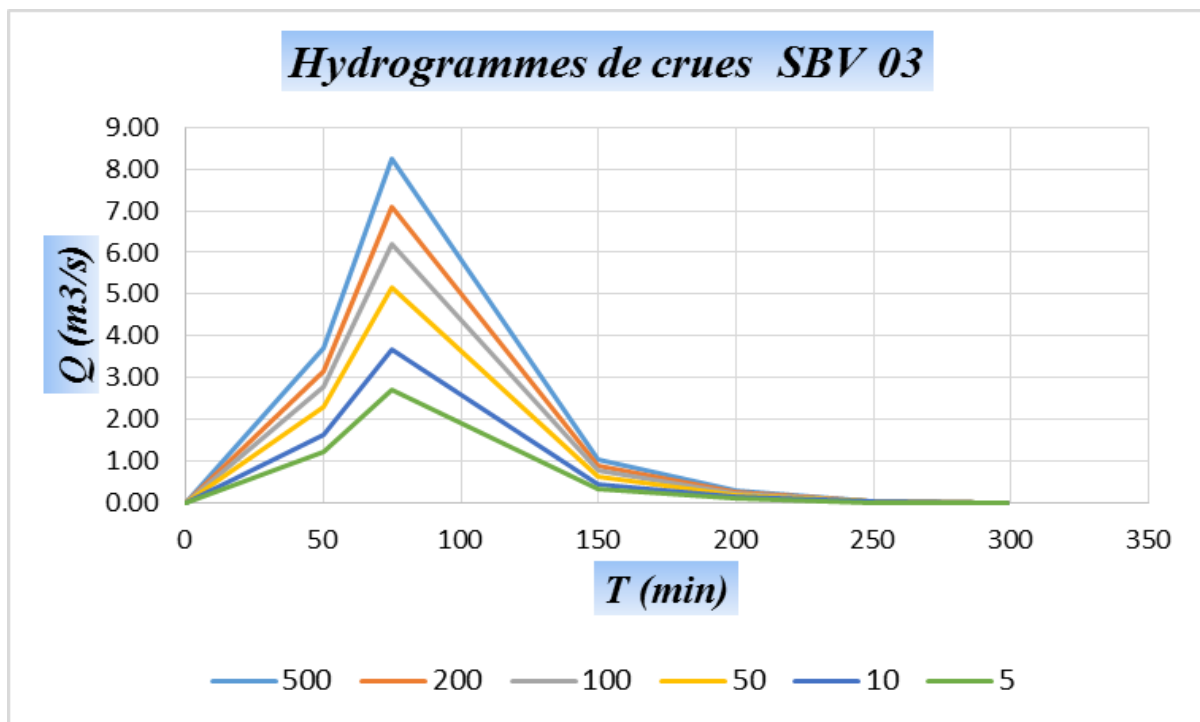


Figure III.8. Hydrogrammes de crues *SBV 03*

Tableau III.16. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. SBV 04

Temps (min)	500	200	100	50	10	5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	7.83	6.71	5.87	4.90	3.47	2.56
155.1	18.83	16.15	14.13	11.78	8.34	6.17
300	2.59	2.22	1.95	1.62	1.15	0.85
400	0.84	0.72	0.63	0.53	0.37	0.28
418.5	0.65	0.56	0.49	0.41	0.29	0.21
620	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

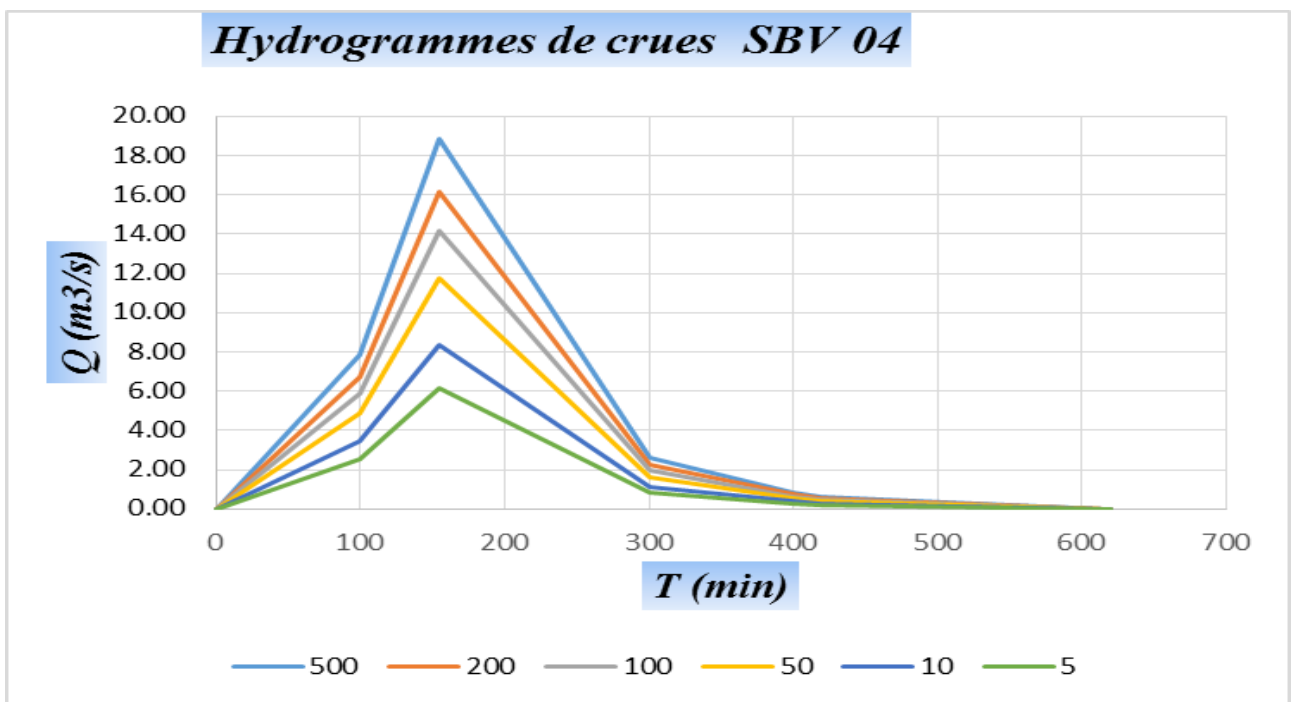


Figure III.9. Hydrogrammes de crues SBV 04

Tableau III.17. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. *SBV 05*

Temps (min)	500	200	100	50	10	5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	12.71	10.91	9.54	7.95	5.64	4.17
<u>133.08</u>	<u>22.51</u>	<u>19.32</u>	<u>16.89</u>	<u>14.08</u>	<u>9.98</u>	<u>7.38</u>
300	1.87	1.61	1.40	1.17	0.83	0.61
400	0.35	0.30	0.26	0.22	0.15	0.11
500	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
532	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

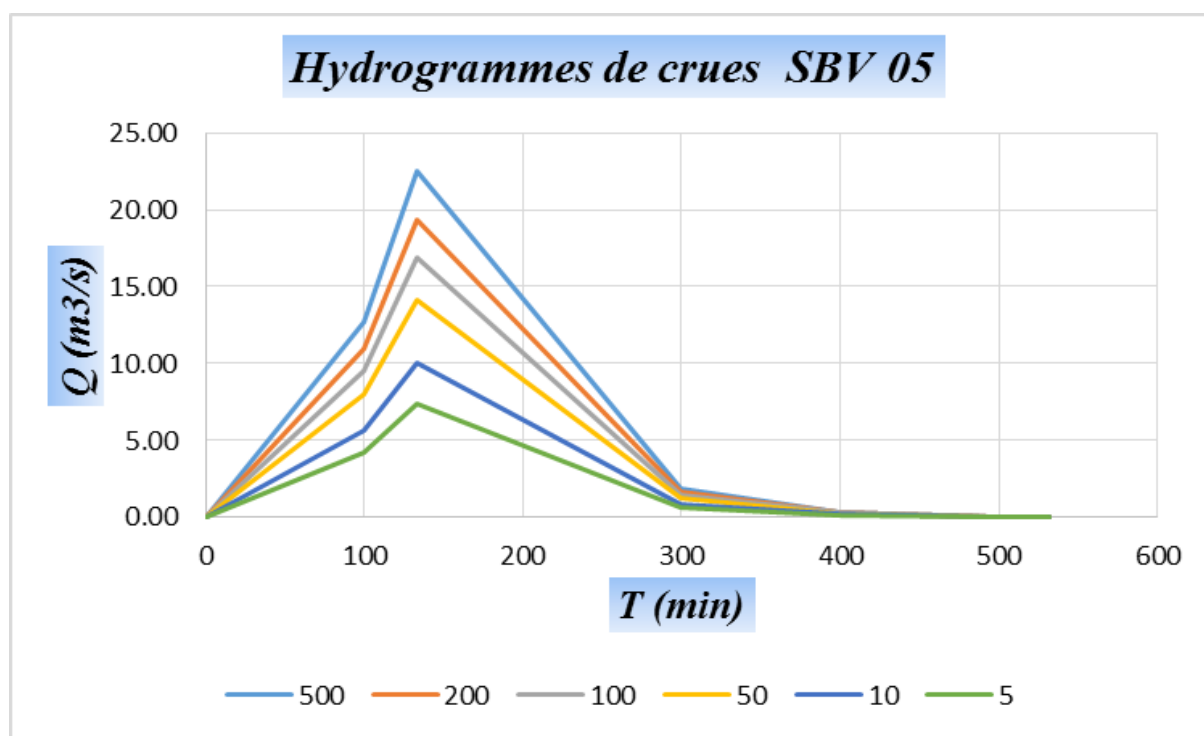


Figure III.10. Hydrogrammes de crues *SBV 05*

Tableau III.18. Hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour. *SBV 06*

Temps (min)	500	200	100	50	10	5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	5.87	5.04	4.40	3.67	2.60	1.92
79.5	14.84	12.73	11.13	9.28	6.57	4.86
150	2.19	1.88	1.64	1.37	0.97	0.72
200	0.76	0.65	0.57	0.47	0.34	0.25
250	0.15	0.12	0.11	0.09	0.06	0.05
318	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

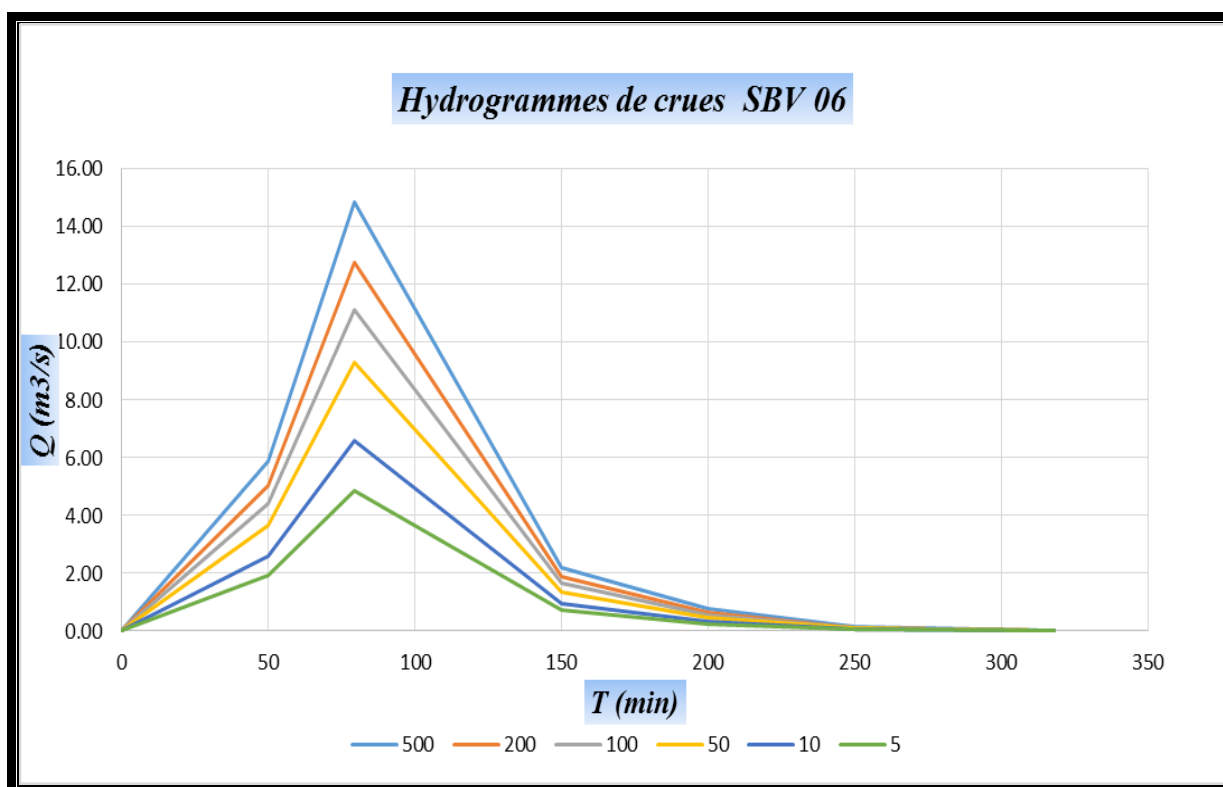


Figure III.11. Hydrogrammes de crues *SBV 06*

III.5. Conclusion

L'estimation quantiles de débits et de volumes des crues est le résultat de l'analyse statistique des données (crues). Dans ce chapitre, est vue l'absence de ces données (crues), nous avons opté pour les formules emperruqués basées sur les précipitations extrêmes.

Pour cela une présentation de la théorie de l'analyse statistiques des données (de précipitations extrêmes) est nécessaire, puisque son utilisation avec différentes lois de probabilité théoriques dans l'ajustement des précipitations journalières maximales fréquentielle dans le but de déterminer le débit caractéristique de la crue des différents sous bassins versants délimitant la ville d'AIN TOUTA. Aussi, le calcul des différents quantiles de débits est nécessaire dans l'établissement des hydrogrammes synthétiques mono-fréquence. Les débits maximas fréquentiels déterminés à l'aide de formules empiriques Turazza et SOKOLOVSKI sont assez proches, tan disque ceux trouvés par la formule de **Mallet-Gauthier** sont plus grands.

Toutefois, nous avons retenu les résultats obtenus par la méthode de **SOKOLOVSKY**, méthode qui prend en considération l'ensemble des paramètres physico climatiques du bassin versant.

CHAPITRE IV :

Application du modèle hydrologique HEC-HMS

Chapitre IV : APPLICATION DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS DE B.V AIN TOUTA

IV.1. Introduction

Le système de modélisation hydrologique HEC-HMS est un logiciel très flexible employé pour modéliser le processus pluie-débit dans un bassin versant ou une région. Il est conçu pour être utilisé pour de grandes surfaces géographiques afin de résoudre si possible un plus grand nombre de problèmes. Ce logiciel offre une grande liberté dans la modélisation des bassins versants grâce aussi bien aux nombreux éléments proposés pour le bassin versant qu'à la variété des théories proposées pour modéliser le ruissellement, les infiltrations, l'écoulement en rivière ou encore la répartition des pluies.

A l'aide de son interface fonctionnant sous l'environnement Windows le modèle HEC HMS est d'usage très souple. Les informations nécessaires pour les simulations sont groupées sous forme de projet qui peut être sauvé sur disque. Néanmoins, ce logiciel nécessite une étape de préparation des données, qui consiste en une schématisation du bassin versant en dehors de ce logiciel, ce schéma s'appelle modèle du bassin.

IV.2. Applications HEC-GEOHMS

HEC-GeoHMS a été développé comme une trousse d'outils d'hydrologie géospatiale pour les ingénieurs et les hydrologues ayant une expérience SIG limitée. Il combine les fonctionnalités des programmes ArcInfo dans un package facile à utiliser avec une interface spécialisée.

Le programme permet aux utilisateurs de visualiser les informations spatiales, de documenter les caractéristiques des bassins versants, d'effectuer une analyse spatiale, de délimiter les sous-bassins et les cours d'eau, de construire des entrées pour les modèles hydrologiques et d'aider à la préparation des rapports. Travailler avec HEC-GeoHMS via ses interfaces, menus, outils, boutons et aide en ligne sensible au contexte, dans un environnement Windows, permet à l'utilisateur de créer efficacement des entrées hydrologiques qui peuvent être utilisées directement avec HEC-HMS. Il est prévu que ces entrées hydrologiques fournissent à l'utilisateur un modèle HEC-HMS initial. L'utilisateur peut estimer les paramètres hydrologiques à partir des caractéristiques des cours d'eau et des bassins versants, des précipitations mesurées et des données de débit. L'utilisateur dispose d'un contrôle total sur HEC-HMS pour modifier les éléments hydrologiques et leur connectivité afin de représenter plus précisément les conditions de terrain.[15]

La relation entre le SIG, le HEC-GeoHMS et le HEC-HMS est illustrée sur la **figure IV.1**. Le SIG permet la digitalisation des cartes géographiques et topographiques et leur traitement. De ce traitement, il en résulte une base de données hydrologique spatiale qui se compose du MNT, du type du sol, de la couverture végétale, etc.

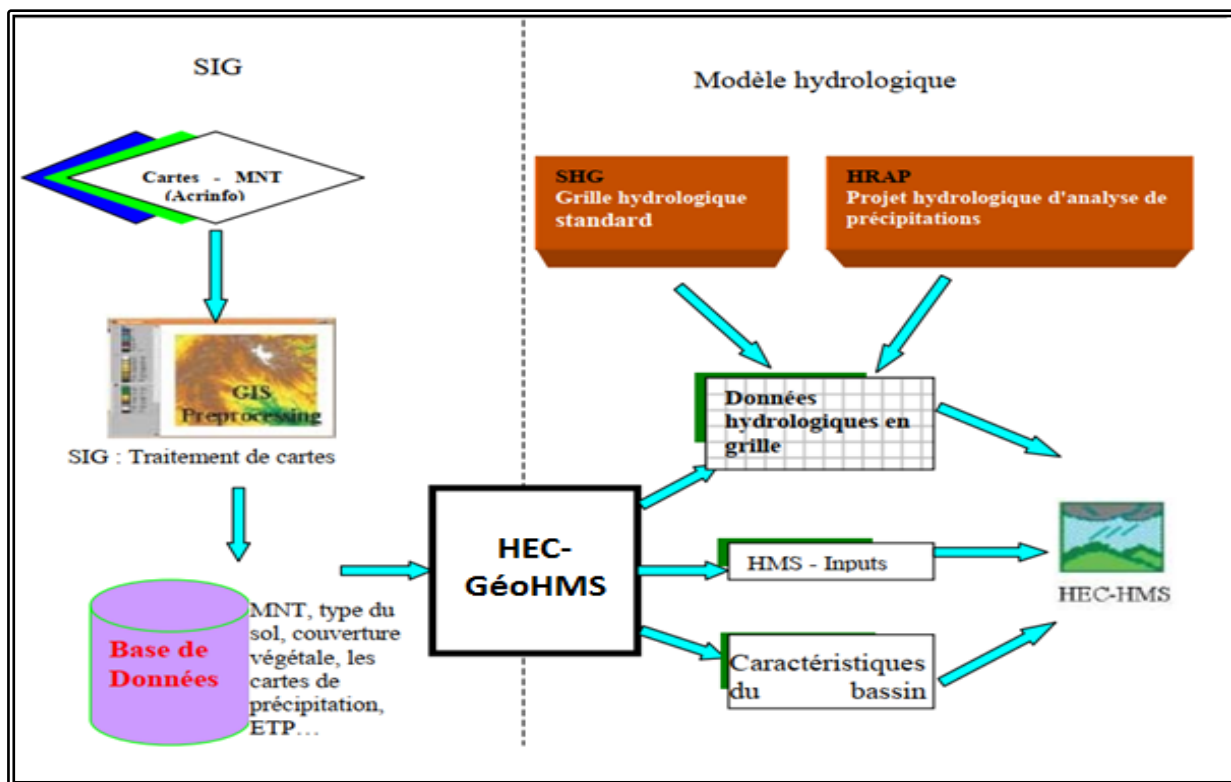


Figure IV.1. Vue d'ensemble du SIG et du modèle hydrologique

IV.3. Présentation du logiciel HEC-HMS

Le modèle hydrologique HEC-HMS a été développé par le Hydrologic Engineering Center (HEC) de l'U.S. Army Corps of Engineers (USACE).

Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié. Sa conception a été lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-1, tous appartenant à la fameuse gamme HEC (HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS, ...). [16].

- Le logiciel HEC-HMS permet de traiter ou de simuler à la fois les différentes données Suivantes :

- ✓ **Les précipitations** : Ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événements pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique.
- ✓ **Les pertes** : Par infiltration, retenue ou évapotranspiration qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant.
- ✓ **Les ruissellements directs** : Qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge.
- ✓ **L'hydrologie fluviale** : Concernée par l'écoulement de l'eau dans le lit de la rivière.

IV.4. Fonctionnalités :

Les fonctionnalités du programme sont complètement intégrées dans l'environnement de travail comprenant une base de données, des utilitaires d'introduction de données, ont moteur de calcul et des utilitaires de rédaction des résultats. Une interface graphique permet à l'utilisateur de se déplacer d'une interface du programme à une autre. Les fonctionnalités du programme et son ergonomie sont identiques pour les mêmes plateformes existantes [HEC-HM].

Les données d'entrée peuvent être conçues pour les éléments de bassins versants comme les sous bassins et les tronçons de cours d'eau ou bien simultanément pour des groupes d'éléments analogues. Les tableaux et formulaires pour l'introduction de données nécessaires sont accessibles à partir d'un schéma visuel du bassin versant.

Pour effectuer une première simulation, il est nécessaire de créer une base de données pour caractériser le bassin versant et déterminer les averses qui seront employées comme données d'entrée du modèle.

Les principales étapes de la simulation sont :

- ✓ Démarrage d'un nouveau projet.
- ✓ Définition du modèle de bassin versant.
- ✓ Données de la ou des stations météorologiques.
- ✓ Définition du modèle de précipitation.
- ✓ Définition des paramètres de contrôle de la simulation.
- ✓ Création et exécution d'une simulation.
- ✓ Visualisation des résultats.

IV.5. Préparation des entrées du modèle HEC-HMS :

La modélisation de la réponse d'un bassin versant soumis à un phénomène pluvieux sous le logiciel HEC-HMS est découpée en trois parties :

- ✓ la modélisation du bassin versant.
- ✓ la modélisation de la météorologie.
- ✓ les spécifications particulières.

Ce logiciel autorise ainsi d'utiliser différents types de méthodes pour la modélisation du bassin versant et de la pluviométrie. La composante spécification permet de spécifier chaque cas par la date de début et de fin de la simulation et le pas de temps de la simulation.[17].

IV.6. Modélisation du bassin versant :

La première étape consiste à schématiser le bassin versant étudié en éléments fondamentaux connectés entre eux sous forme d'un arbre ramifié. Le HEC-HMS offre l'opportunité de représenter toutes les entités naturelles ou artificielles installées dans un bassin et qui influencent le processus de transformation pluie-débit, allant depuis les sous bassins, les exutoires jusqu'aux canaux de rivières et les canaux de diversion d'eau, en passant par les réservoirs, les retenues de barrages,...etc. Les éléments et leurs rôles dans la représentation de l'état du bassin versant sont les suivants :

La modélisation proposée a pour objectif d'estimer le débit maximal probable des bassins versants de Ain Touta ainsi que le volume à son exutoire. Ce bassin versant a une superficie d'environ 84 km² et découpé en (40) sous-bassins.

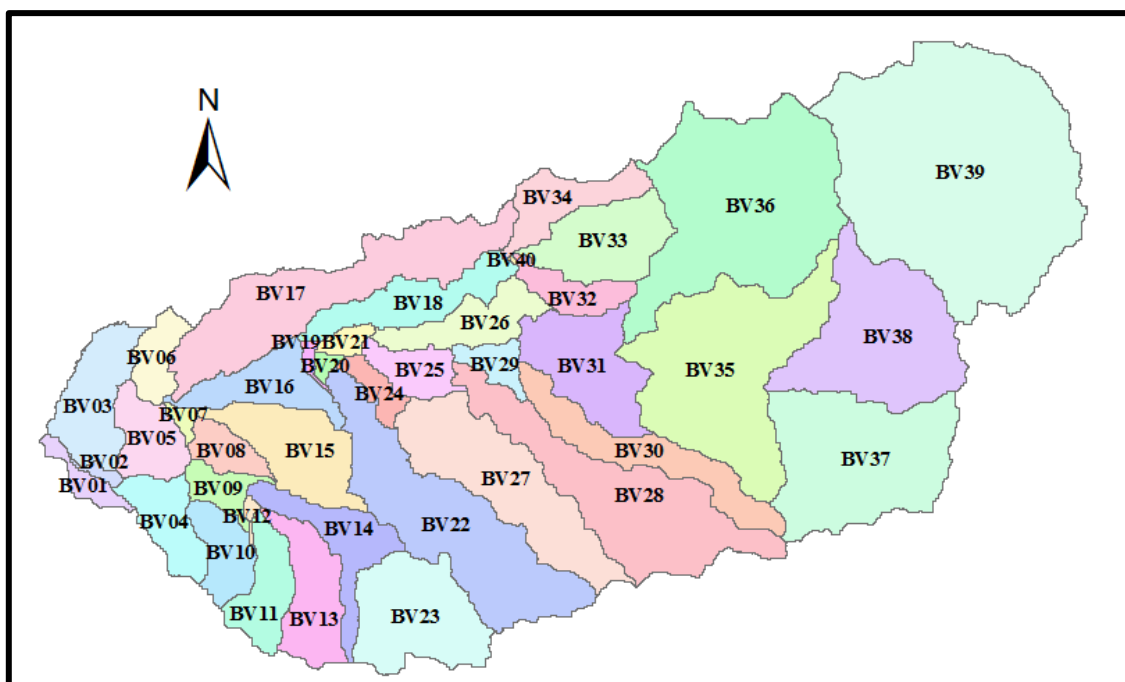


Figure IV.2. Carte des sous bassins

Après avoir créé un modèle de bassin (EDIT-Basin Model-New), l'utilisateur doit rentrer les différents éléments hydrologiques caractéristiques participant au ruissellement sur le bassin versant. On peut inclure sept types d'éléments différents :

- ❖ L'élément « **Subbassin** » : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.
- ❖ L'élément « **Reach** » : représente le plus souvent la rivière, et sert à faire la connexion entre les autres éléments. L'information de base attachée est la fonction de routage.
- ❖ L'élément « **Réservoir** » : décrit les réservoirs, les retenues de barrage,...etc. ses caractéristiques attribuées permettent de définir les conditions stockage-déstockage.
- ❖ L'élément « **Source** » : permet d'ajouter des stations de mesure de débit ou de représenter les conditions aux limites.
- ❖ L'élément « **Jonction** » : utilisé pour combiner aux moins deux débits véhiculés par deux éléments, comme dans le cas d'une confluence entre deux rivières.
- ❖ L'élément « **Diversion** » : représente des endroits où se produit des prélèvements d'eau, c'est le cas par exemple des seguias et des canaux de diversion.

❖ L'élément « Sink » : simule l'exutoire des sous bassins versants.

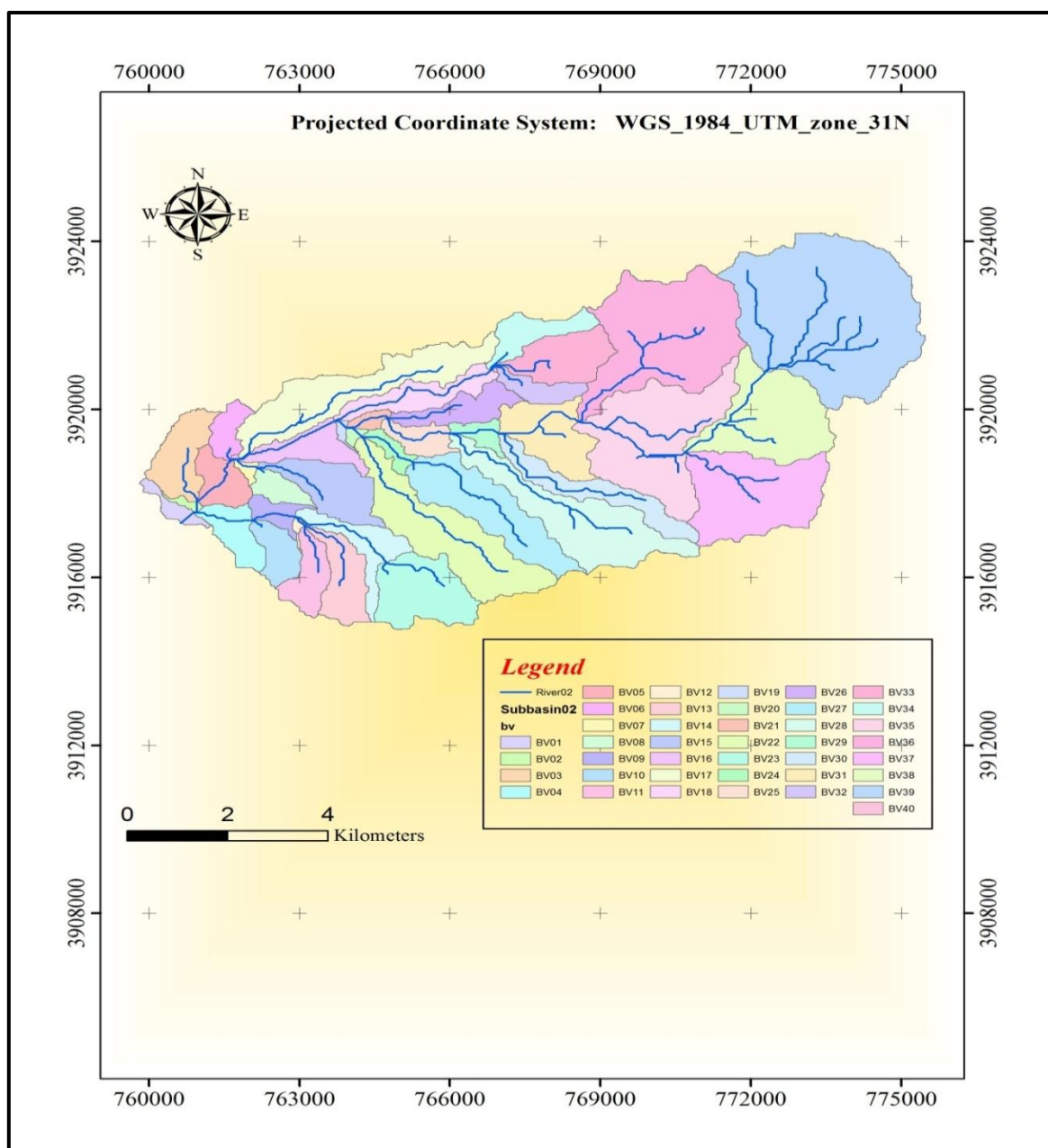


Figure IV.3.découpage BV de AIN TOUTA en sous bassins

IV.7. La structure du modèle HEC-HMS choisie et les données d'entrée du modèle [18]

Cette description portera sur la combinaison modulaire choisie pour modéliser les bassins drainants dans la ville Ain Touta, en expliquant ses concepts de base, en citant ses variables et ses paramètres et la façon dont nous allons les estimer et en listant ses avantages et ses limites, sans oublier la justification du choix à la fois du modèle et de la combinaison modulaire.

VI.7.1. Justification du choix du modèle

Le choix du modèle a été dicté par plusieurs contraintes de moyens et facteurs de privilège qui font de ce modèle un bon choix. Parmi ceux les plus importants :

* Les données exigées par le modèle sont plus ou moins simples, accessibles et disponibles. Donc, le modèle peut donc tourner sans soucis.

* Possibilité d'intégrer les majeurs facteurs affectant la transformation pluie-débit (morphométrie du bassin versant, occupation du sol, types de sols et humidité antérieure) et donc les résultats seront plus réalistes.

*La NRCS CN (Natural Ressources Conservation Service) a été validée sur plusieurs bassins versants dans le monde et dans l'Algérie et plus précisément dans le bassin versant Ain Touta.

IV.7.1.1. La fonction de production : la fonction utilisée est celle de type NRCS CN

IV.7.1.1.1. Le concept de base

Cette fonction de production apparue en 1950 et surnommée autrefois la SCS CN (Soil Conservation Service) est le fruit de plus de deux décennies d'analyses des relations pluies-débits sur des petits bassins. Elle relie la pluie nette participante au ruissellement à trois facteurs fondamentaux : l'occupation du sol, le type de sol et l'humidité antécédente, selon l'équation suivante :

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \dots\dots\dots (IV.1)$$

Avec :

P_e: les précipitations nettes au temps t ;

P : les précipitations brutes au temps t ;

I_a : l'abstraction initiale ;

S : le potentiel maximum de rétention.

Le NRCS a proposé une relation empirique supplémentaire liant l'abstraction initiale d'un bassin versant au potentiel maximum de rétention :

$$I_a = 0.2 S \dots\dots\dots (IV.2)$$

Ainsi, la première équation devient

$$P_e = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S} \dots\dots\dots (IV.3)$$

Pour chaque pas de temps, la pluie nette est la différence de la valeur de P_e au début et à la fin du pas de temps. L'influence des deux premiers facteurs susmentionnés est estimée par le paramètre CN qui est relié à S par l'équation :

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \dots\dots\dots (IV.4)$$

IV.7.1.1.2. Les variables

A- Découpage des bassins : Le découpage du bassin de Ain Toutaen sous bassins a été effectué de telle sorte à avoir des unités plus au moins homogènes des points de vues les différents facteurs exigés par le modèle (lithologique, hydrologique).

Pour cela, le bassin est découpé en (40) sous bassins.

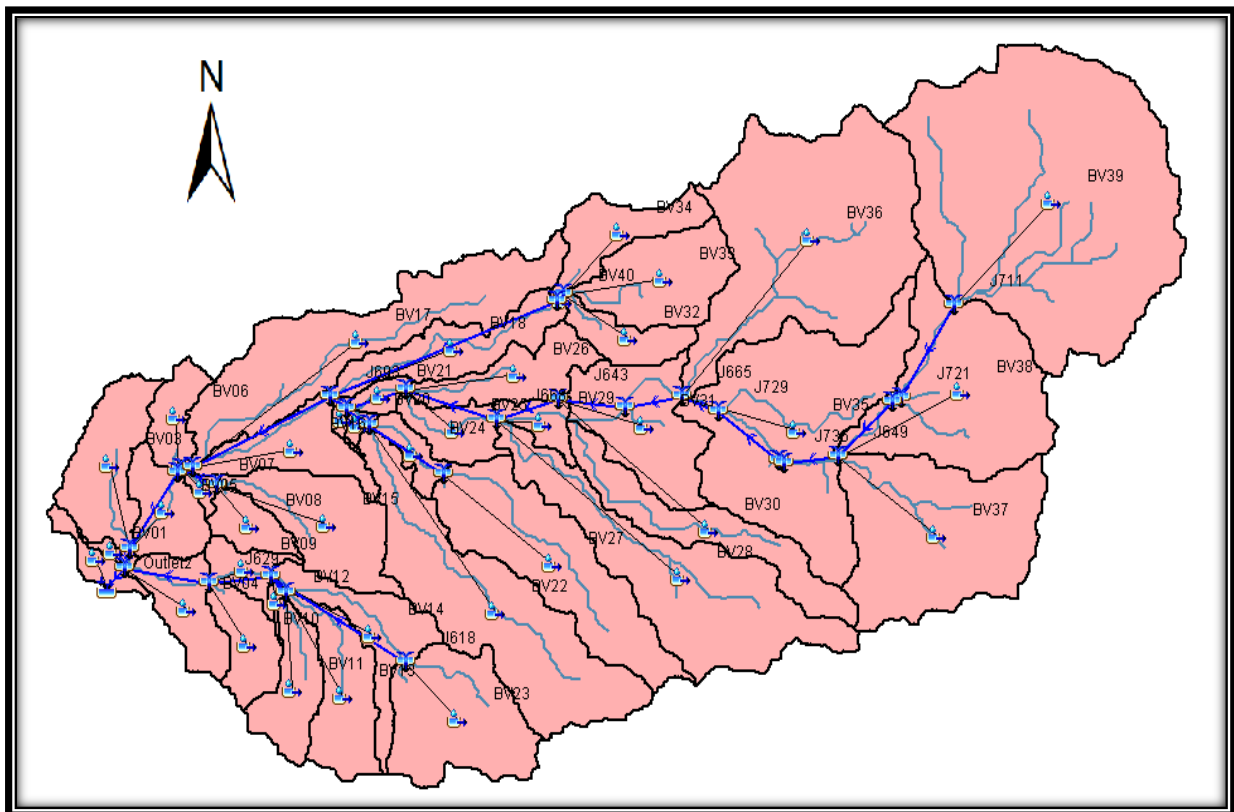


Figure IV.4.Fenêtre bassin versant AIN TOUTA et ses sous bassins.

Tableau IV.1.Caractéristiques et Données de base des 40 sous -bassins

N°BV	S/Bassin schéma	Surface (km²)	Pente s/bassin (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Curve-number (CN)	Impervious (%)
BV01	W1520	0.42	7.89	5.42	21.24	50
BV02	W1500	0.13	9.84	2.95	53.51	50
BV03	W1310	1.77	6.30	8.84	49.62	50
BV04	W1540	1.18	14.56	6.67	51.98	50
BV05	W1410	1.11	10.55	6.15	51.19	50
BV06	W1320	0.74	6.73	5.53	46.22	46.88
BV07	W1400	0.16	17.48	2.56	42.50	50
BV08	W1460	0.65	5.89	4.95	46.73	46.67
BV09	W1530	0.58	10.81	5.39	50.30	50
BV10	W1560	1.00	10.97	5.73	50.73	50
BV11	W1580	1.20	11.88	6.98	49.49	47.22
BV12	W1550	0.08	11.28	2.47	50.81	50
BV13	W1600	1.65	10.66	8.48	51.64	50
BV14	W1570	1.48	9.11	10.98	53.01	50
BV15	W1440	2.08	5.53	9.01	51.56	50
BV16	W1380	1.38	7.65	9.32	50.99	50
BV17	W1120	4.35	7.86	19.77	47.72	46.54
BV18	W1070	1.61	9.85	11.32	48.69	48.61
BV19	W1170	0.11	8.23	2.84	50.24	50
BV20	W1240	0.12	10.15	2.09	39.19	33.33
BV21	W1130	0.27	11.61	2.92	23.53	35.72
BV22	W1280	4.90	7.62	18.02	52.78	49.56
BV23	W1620	2.78	10.11	9.46	53.26	50
BV24	W1290	0.45	11.14	5.12	51.93	31.82
BV25	W1270	0.84	8.82	5.90	45.42	36.11
BV26	W1100	1.34	6.41	9.59	44.93	43.94
BV27	W1430	3.67	7.02	14.52	52.68	50
BV28	W1330	4.57	8.29	18.66	53.75	50
BV29	W1260	0.50	8.81	4.81	51.96	50
BV30	W1490	2.10	9.81	14.27	54.23	50
BV31	W1230	2.36	6.52	10.07	52.62	50
BV32	W1040	0.82	6.41	6.09	52.24	50
BV33	W1010	2.01	5.85	8.12	53.06	50
BV34	W950	1.24	7.06	8.45	52.20	50
BV35	W1350	6.02	6.94	17.58	52.36	50
BV36	W910	7.15	9.99	18.08	53.98	50
BV37	W1450	4.79	6.74	12.74	51.97	50
BV38	W1210	4.44	8.12	13.07	53.36	50
BV39	W1020	11.55	10.27	18.69	55.76	50
BV40	W1030	0.01	21.23	0.58	50.21	50

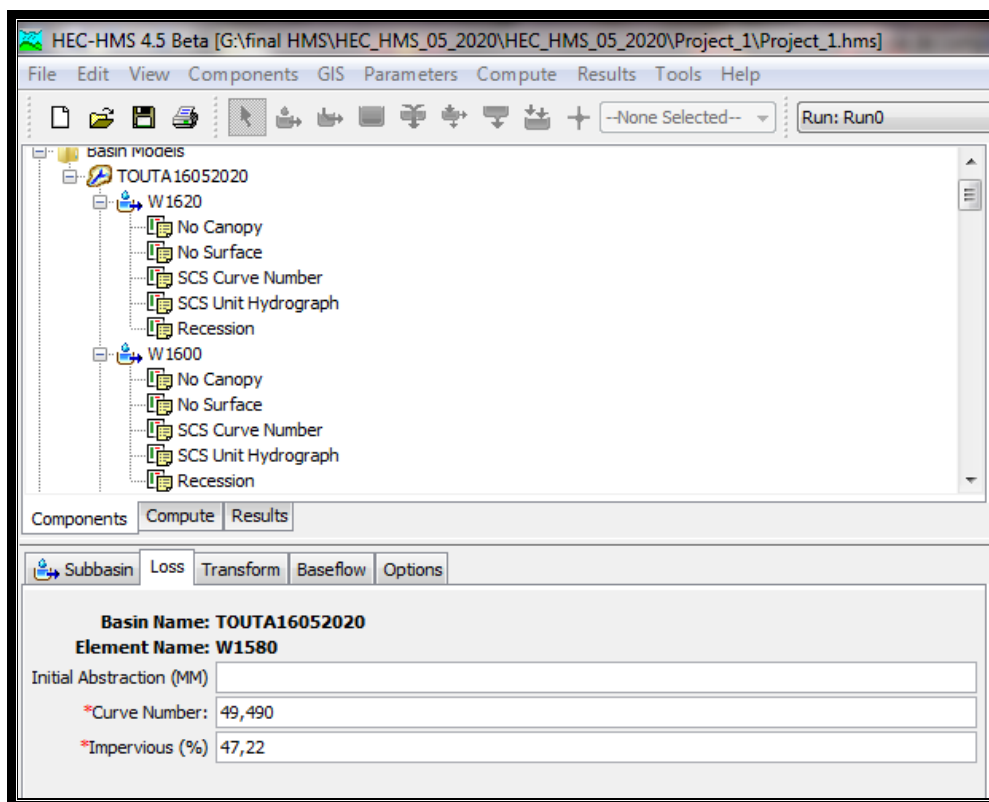


Figure IV.5.fenêtre de donnée de CurveNumber

Ces sous bassins sont drainés par un réseau hydrographique de caractéristiques suivantes :

Tableau IV.2. Données de base des Quarrent sous-bassins versants

Tronçon	Nœud (Aval)	Nœud (Amont)	Bassin	Distance (m)	Pente (m/m)
R700	W1520	W1500	BV01	344.12	0.0001
		W1540			
R670	W1520	W1410	BV02	2 479.70	0.015324
	W1540	W1310			
R650	W1310	W1320	BV05	1 325.05	0.009056
	W1410				
R550	W1400	W1440	BV07	575.43	0.017378
	W1380	W1460			
R530	W1320	W1380	BV05	58.99	0.0001
		W1400			
R510	W1400	W1120	BV07	158.71	0.006301
	W1380				
R500	W1120	W1170	BV16	2 276.89	0.010101
		W1070			
R340	W1170	W1240	BV19	293.97	0.006803
	W1070	W1130			
R390	W1240	W1290	BV20	406.19	0.007386
	W1130	W1280			

R540	W1290	W1430	BV16	1 355.65	0.010327
	W1280				
R350	W1240	W1270	BV21	977.27	0.005116
	W1130	W1100			
R420	W1270	W1260	BV25	1 712.40	0.00876
	W1100	W1330			
R370	W1330	W1230	BV29	1 050.57	0.006663
		W1490			
R380	W1230	J725	BV31	883.72	0.007921
	W1490				
R330	J725	W1350	BV31	1 063.66	0.008461
		W910			
R360	W1350	J729	BV35	575.43	0.006951
	W910				
R450	J729	J736	BV35	1 172.51	0.009382
R470	J736	J738	BV35	112.22	0.017822
R460	J738	W1210	BV35	777.25	0.006433
		W1450			
R440	W1210	J723	BV38	1 166.75	0.009428
	W1450				
R320	J723	J721	BV38	148.18	0.006749
R280	J721	W1020	BV38	1 497.66	0.009348
R260	W1170	W950	BV18	3 874.68	0.007743
	W1070	W1030			
R180	W950	W1010	BV40	131.89	0.015164
	W1030	W1040			
R690	W1540	W1530	BV04	1 265.89	0.016589
	W1500	W1560			
R680	W1560	W1550	BV09	951.84	0.018911
	W1530	W1570			
R710	W1570	W1580	BV12	327.54	0.015265
	W1550	W1600			
R760	W1570	1620	BV14	2 479.70	0.015324
	W1550				

B- La carte des sols : Cette donnée sert en combinaison avec la carte d'occupation des sols à déterminer la valeur de CN normal pour chaque composé hydrologique de sol. Elle doit être conforme à la classification NRCS qui définit les classes d'occupation du sol en quatre grands groupes.

La carte de sols type NRCS (Figure IV-07) est élaborée en exploitant les données des sols disponibles au site :SoilGrid.org, conformément à la classification NRCS qui définit les classes d'occupation du sol en quatre grands groupes :

- **Groupe "A"** : sols à faible potentiel de ruissellement. Les sols appartenant à ce groupe sont des sols de grande perméabilité, à vitesse d'infiltration rapide, même lorsqu'ils sont saturés. Relativement épais, ils sont généralement sableux ou graveleux. Ces sols possèdent le plus souvent une grande transmissivité.
- **Groupe "B"** : sols présentant une vitesse d'infiltration modérée et une transmissivité moyenne ; d'épaisseur moyenne, ils ont, en général, une texture moyennement fine à grossière.
- **Groupe "C"** : sols à vitesse d'infiltration lente et de transmissivité faible. Ils ont souvent de faible épaisseur, limitant les mouvements d'eau et à texture assez fine à fine.
- **Groupe "D"** : sols à fort potentiel de ruissellement. Ce sont des sols à vitesse d'infiltration très lente et de transmissivité excessivement faible. Ils sont en général argileux, peu épais, reposant sur une couche imperméable et possèdent une nappe phréatique proche de la surface.

La méthodologie utilisée pour tracer la carte de classification des sols est la suivante :

- 1- Dresser la carte des différentes composantes des sols des bassins pour les profondeurs entre 0 et 30 des composantes du sol (sable, limon et l'argile) à partir des données disponibles sur site SOILSGRID.ORG.
- 2- Dresser leurs cartes de la perméabilité en utilisant la formule :

Saxton et al (1986) : $K_s = 24 \exp \{ [12.012 - 0.0755 (\% Sa)] + [- 3.895 + 0.03671 (\% Sa) - 0.1103 (\% Ar) + 0.00087546 (\% Ar)^2] / [0.332 - 0.0007251 (\% Sa) + 0.1276 \log_{10} (\% Ar)] \}$ [19].

%Ar : teneur en argile, **%Li** : teneur en limon, **%Sa** : teneur en sable,

- 3- Dresser la carte des profondeurs de la couche imperméable à partir des données du même site.
- 4- Dresser la carte des groupes du sol en exploitant les deux tableaux :

Tableau IV.3. Classes de conductivité hydraulique saturée pour la désignation des groupes hydrologique des sols selon le USDA-NRCS(2007) lorsqu'une couche imperméable est présente a) à plus de **100 cm** de profondeur et b) entre **50 et 100 cm** de profondeur.[20]

a)

Paramètres	Groupe A	Groupe B	Groupe C	Groupe D
Potentiel de ruissellement	Faible	Modérémentfaible	Modérément élevé	Elevé
Conductivité hydraulique saturée (cm/hr)	> 3.6	> 1.44 à ≤ 3.6	> 0.144 à ≤ 1.44	≤0.144

b)

Paramètres	Groupe A	Groupe B	Groupe C	Groupe D
Potentiel de ruissellement	Faible	Modérémentfaible	Modérément élevé	Elevé
Conductivité hydraulique saturée (cm/hr)	>14.4	>3.6 à ≤14.4	> 0.35 à ≤3.6	≤0.35

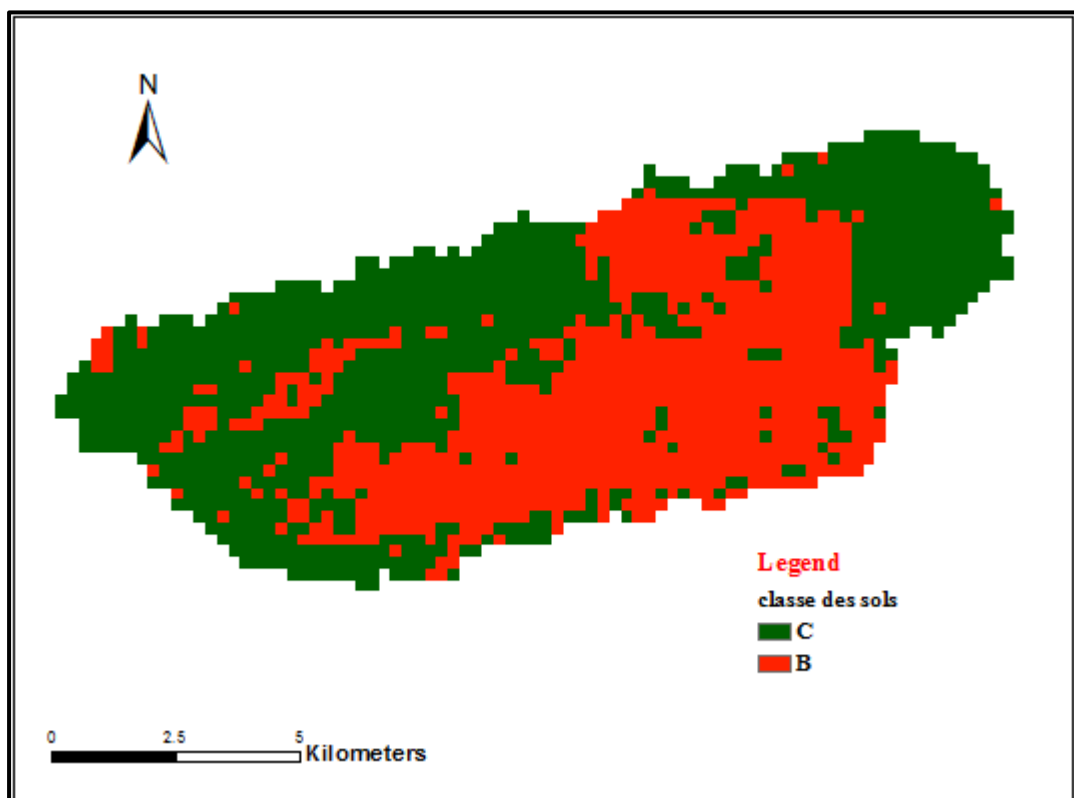


Figure IV.6. Carte des sols type NRCS des sous bassins versants

Les sols couvrant la totalité des sous bassins appartient aux groupes **B** et **C**.

C- Le pourcentage d'imperméable :

Il désigne la portion de la surface du bassin considérée comme étanche et directement connectée au réseau de drainage. Ce pourcentage est déduit lors de l'élaboration de la carte de classification des sols.

IV.7.1.1.3. Les paramètres

A- CurveNumberCN : Sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration. Il est déterminé pour un composé hydrologique de sol à partir de tables NRCS (Tableau IV.4), avec la combinaison des facteurs de la nature de l'utilisation du sol, de son traitement, des conditions hydrologiques avec le type de sol pour trouver la valeur de CN normal.

Pour un bassin versant composé de plusieurs classes d'occupation du sol et de types de sols, un CN composite doit être calculé par la formule :

$$CN_{composite} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \dots\dots\dots (IV-5)$$

Où :

CN_{composite} : le CN utilisé pour l'ensemble du bassin par la fonction de production ;

CN_i : le CN d'un composé hydrologique du sol (classe d'occupation du sol + classe de sol) ;

A_i : surface de drainage du composé hydrologique du sol.

Tableau IV.4. Valeurs de CN en fonction des classes d'occupation de sol type NRCS. [20]

Code	Description de l'occupation du sol			CN pour HSG ¹			
	Type d'occupation	Traitement	Condition hydrologique	A	B	C	D
11	Zone urbanisée	-	-	77	86	91	94
200	Jachère	Sol nu	-	77	86	91	94
210	Arboricultures	Lignes droites	Mauvaise ²	72	81	88	91
225	céréalicultures	C+T+CR	Mauvaise ²	60	71	78	81
323	Matorral	-	Mauvaise ³	48	67	77	83
343	Forêt claire	-	Mauvaise ⁴	45	66	77	83
342	Forêt moyenne	-	Moyenne ⁴	36	60	73	79
341	Forêt dense	-	Bonne ⁴	30	55	70	77
423	Chêne clair	-	Mauvaise ⁵	45	66	74	79
422	Chêne moyen	-	Moyenne ⁵	30	48	57	63
421	Chêne dense	-	Bonne ⁵	30	30	41	48
433	Genévrier clair	-	Mauvaise ⁵	55	75	85	89
432	Genévrier moyen	-	Moyenne ⁵	36	58	73	80
431	Genévrier dense	-	Bonne ⁵	30	41	61	71

B- Les cartes NDVI et CN : L'approche utilisée dans cette étude pour le calcul de CN, est de l'estimer à partir de l'indice de végétation normalisé dérivé NDVI déterminé de quatre images satellitaires LANDSAT 8 réparties sur les quatre saisons adaptées à la classification NRCS.

Cette approche a été utilisée pour obtenir des valeurs approximatives du facteur CN, en fait, la valeur du CN dépend de la nature de la végétation, du pourcentage du couvert végétal et de l'occupation du sol.

Pour estimer les valeurs du CN à partir de celle de l'NDVI, nous avons divisé ces dernières en 6 classes: [20]

- **Végétation dense :** Cette classe est représentée par des forêts de chêne, le chêne vert (*Quercus ilex*) et le chêne liège (*Quercus suber*), avec la présence des pinèdes généralement des pins d'Alep (*Pinus halepensis*).
- **Végétation dégradée :** Généralement des matorrals qui se caractérisent par la domination des arbustes avec des feuilles persistantes, larges et petites, rigides et épaisses, avec des petits arbres par fois présents avec ou sans sous-bois (**Blondel et Aronson, 1999**)
- **Végétation très dégradée :** Généralement des maquis dégradés et garrigues qui contiennent une association des végétaux dépassant rarement le stade arbustif.
- **Végétation clairsemée :** Des garrigues dégradés où la végétation arbustive y est moins dense et la strate arboré est absente, dispersé sur toute la zone, ces garrigues sont dominées essentiellement par : le Jujubier sauvage (*Ziziphus lotus*), l'asphodèle (*Asphodelus microcarpus*), le Palmier nain (*Chamaerops humilis*) ...etc.
- **Sols nus :** Cette classe englobe les sols nus des formations à base de thérophytes (herbes).
- **Surface des plans d'eau :** Englobe surfaces des cours d'eau.

Tableau IV.5: Les données utilisées pour les corrélations entre l'NDVI et CN pour les différents types des sols NRCS [20]

Couvert	NDVI	CN			
		A	B	C	D
Eau	-0.4	100	100	100	100
Sols nus	0.05	77	86	91	94
Végétation clairsemée	0.17	74	83	88	90
Végétation très dégradée	0.29	63	75	83	87
Végétation dégradée	0.38	57	72	81	86
Végétation dense	0.7	35	56	70	77
Végétation très dense	0.85	30	41	61	71

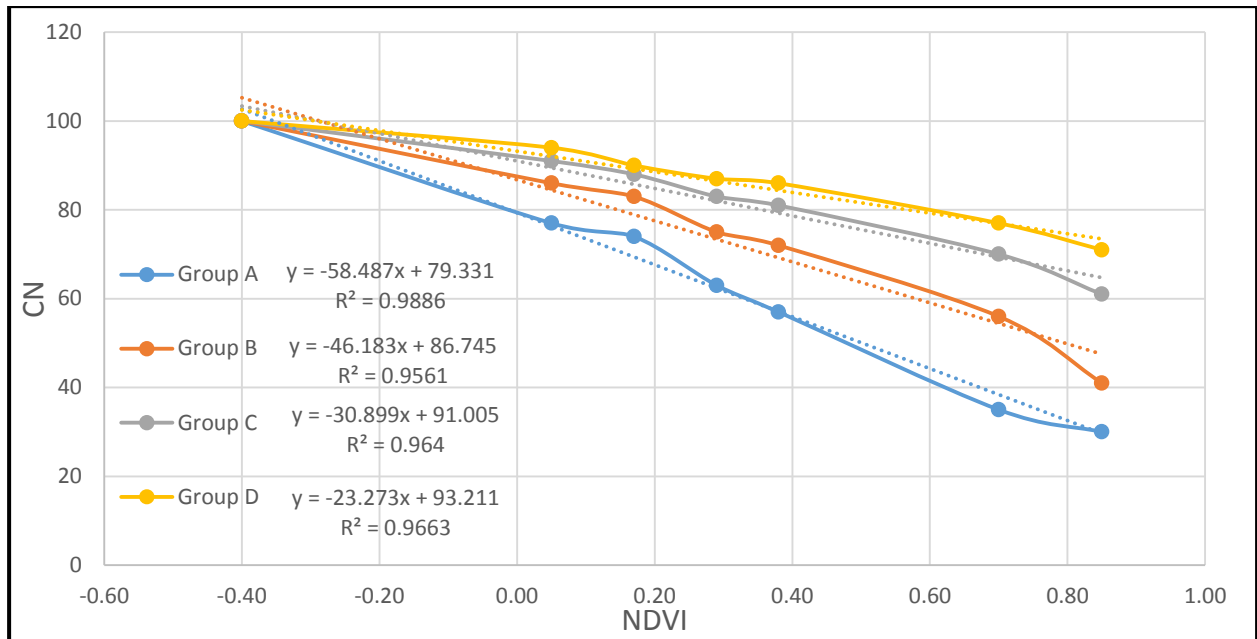


Figure IV.7. Corrélations entre les valeurs de l'NDVI et les valeurs du CN pour les différents types des sols NRCS.

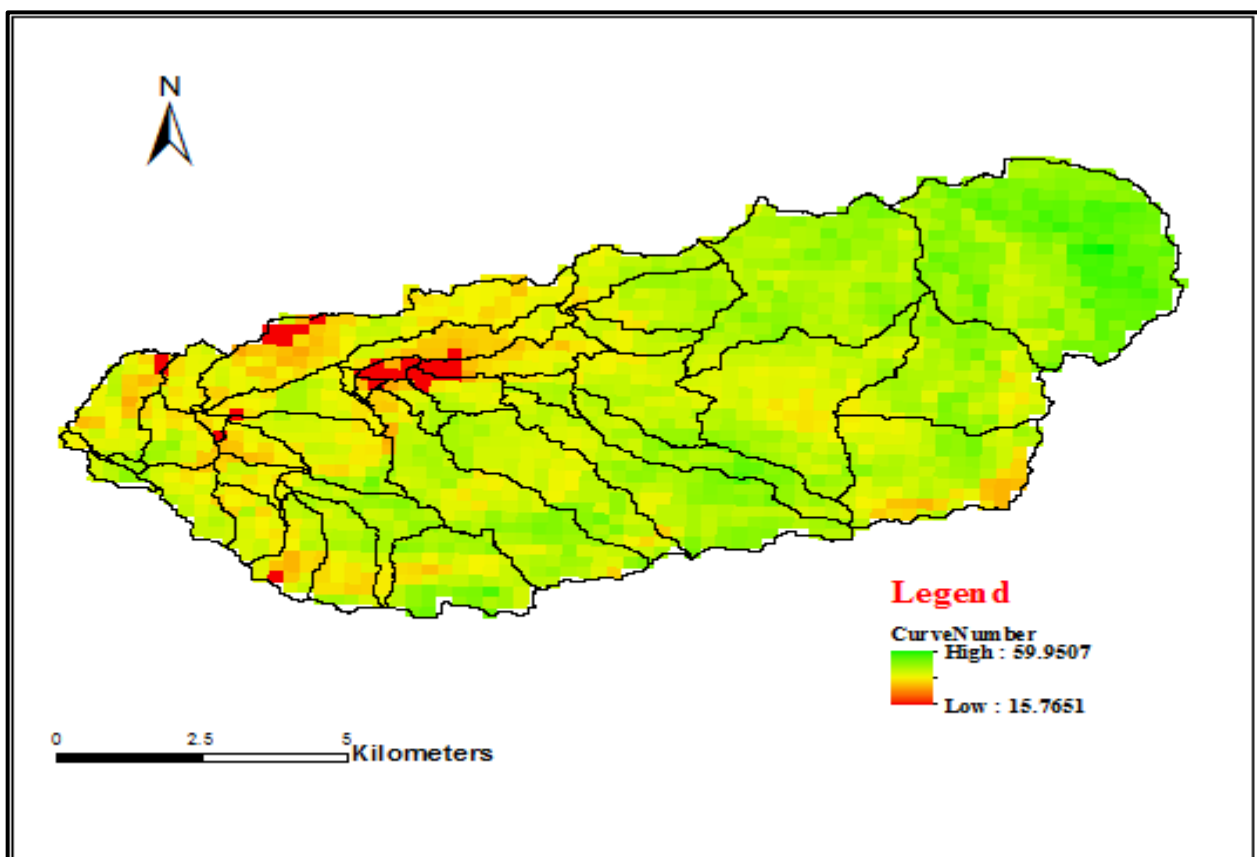


Figure IV.8. Carte CN moyens (quatre saisons) des sous bassins versants

C- Abstraction Initiale Ia: Abstraction initiale en mm, elle correspond aux pertes initiales provenant durant la première phase de l'événement pluvieux, dû aux interceptions, au stockage naturel dans les dépressions,...etc. L'écoulement ne débute qu'une fois la pluie brute dépasse la valeur de Ia. On estime sa valeur le plus souvent par calibration, cependant il existe des tableaux qui donnent des ordres de grandeur de ce paramètre.

Tableau IV.6. Valeurs usuelles de l'abstraction initiale Ia et du coefficient CN
(D'après SAGE INGENIERIE)

CN normal	Ia(mm)	Nature
75	9	Bois
80	8	Broussailles
85	5	Vergers
85	8	Labourou nu
89	3	Urbain

D- La pluie

Pour chaque événement, la pluie fréquentielle devrait être saisie sous forme de la hauteur de pluie tombée sur le bassin pendant le jour où cet événement est survenu, au quelle nous associons la distribution NRCS type II.

Nous appliquerons les pluies maximales journalières fréquentielles estimées aux bassins à partir des celles enregistrées dans la station de Batna.

IV.7.1.1.4. La fonction de transfert : l'hydrogramme unitaire de la NRCS

La fonction de transfert choisie dans cette étude est l'hydrogramme unitaire de la NRCS.

A- Le concept de base

Cet hydrogramme développé par le NRCS exprime le débit Ut comme proportionnel au débit de pointe Up, pour chaque temps t, fraction du temps de pointe Tp.

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \dots \dots \dots (IV-6)$$

Avec,

A : surface du bassin versant ;

C : constante de conversion (**2.08** pour le système international).

Le temps de pointe **T_p** est relié à la durée de la pluie nette par la formule :

$$T_p = T_{lag} \frac{\Delta t}{2} \dots\dots\dots(IV-7)$$

Où :

Δt : la durée de la pluie nette (c'est le pas de temps de simulation) ;

T_{Lag} : le Lag du bassin (différence entre le pic de la pluie nette et le pic de l'hydrogramme).

B- Les paramètres

Le **T_{Lag}** est calculé par la formule NRCS définie comme suit :

$$T_{lag} = L^{0.8} \times \left(\left(\left(\frac{1000}{CN} \right) - 10 \right) + 1 \right)^{0.7} / (1900 \times \sqrt{Y}) \dots\dots\dots(IV-8)$$

Avec, T_{Lag} : le lag en heures ;

L : la longueur depuis l'exutoire jusqu'à l'amont du plus grand cours d'eau en pied;

CN : le curvenumber composite du bassin ;

Y : pente du bassin en %.

* La fonction de routage choisie est celle du Lag, cette fonction également simple, n'exigent pas beaucoup de données. Cette fonction considère que l'hydrogramme de sortie est simplement l'hydrogramme d'entrée décalée, d'une durée spécifiée lag qui est le temps mis par la crue dans le lit du cours d'eau.

Selon la méthode de Kirpich, ce temps est donné par l'équation suivante :

$$Lag = T_{ch} = K .L^{0,77} S^{-0,385} \dots\dots\dots(IV-9)$$

où:

Lag = Tch : Temps mis par la crue dans le cours d'eau en min

K = 0,0078 pour le système international

L : longueur du cours d'eau (m)

S : pente du cours d'eau (m/m)

La forme du débit de base choisie est la récession exponentielle, elle est la mieux adaptée au contexte semi-aride.

$$Q_t = Q_0 \times K^t \dots\dots\dots(IV-10)$$

Où, Qt : le débit au temps t ;

Q₀ : le débit initial ;

K : la constante de décroissance exponentielle.

IV.7.1.1.5. Les avantages de la combinaison modulaire choisie

- * Le module météorologique adopté a permis de surmonter le problème d'absence des données de pluviographe.
- * La méthode NRCS CN est simple, fidèle, ne nécessite pas d'énormes quantités de données, et dépend directement d'un seul paramètre qui renferme trois facteurs de base dans la modélisation pluie-débit (l'occupation du sol, les sols et l'humidité antécédente).
- * La fonction de transfert sélectionnée n'exige pas beaucoup de données, et montre des résultats satisfaisants.
- * Le module de débit de base est le mieux adapté au contexte semi-aride, et va aider à mieux restituer les hydrogrammes de crues.
- * La combinaison ne contient que peu de paramètres ce qui diminue les erreurs causées par les phénomènes de compensation entre les paramètres et d'équi-finalité.

IV.7.1.2. Estimation des débits liquides des averses de différentes périodes de retour par HEC HMS

Dans cette partie, nous allons simuler l'effet des averses de différentes périodes de retour sur les hydrogrammes des crues produites par chaque sous bassin.

IV.7.1.2.1. Les données

Avant de lancer la simulation, nous avons préparé tous les fichiers de simulation d'un soule événement (pluies des périodes de retour 10 ans), en prenant en compte le type d'averse NRCS 1A (résultat de la calibration du modèle pour le bassin versant Ain Touta).

Tableau IV.7.Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation

Module du modèle	Entrée	Unité
Module bassin	La surface du sous bassin	km ²
	Le talweg : Longueur, pente, coef de Maning	m m/m, -
	La forme de la section moyenne	-
	Les dimensions de la section	m
Module météorologique	Pluie	mm
	Le type d'averse A1	-
	Affectation des pluies aux sous bassins	-
Contrôle spécifications	Date et heure du début et la fin de l'événement	-
Séries de données pluviométriques	Pluie enregistrée ou estimée pour chaque sous bassin	mm
Module de la fonction de production CSCN	Abstraction initiale« Ia»	mm
	Curve Nombre «CN»	-
	Le pourcentage d'imperméable	-
SCS unit hydrographe	Lag time	mm
Débit de base	Débit initial	m ³ /s
	Récession	-
	Ratio	-

IV.7.1.2.2. Résultats de la simulation et discussions

Les résultats résumés dans le tableau IV.8 et les graphes N° :10 à 21 , présentent les valeurs estimées par le modèle HEC-HMS aux Six bassins en termes du pic de l'hydrogramme et du volume du ruissellement jusqu'aux exutoires des principaux oueds drainant les bassins.

Tableau IV.8. les valeurs simulées du débit de pointe et du volume d'eau pour les averses quantiles

	T = 10 ans	T = 100 ans
BV 01		
$Q_p(m^3/s)$	8.30	12.10
Volume ($10^3 m^3$)	307.70	391.10
BV 02		
$Q_p(m^3/s)$	65.30	100.40
Volume ($10^3 m^3$)	1 989.90	2912.00
BV 03		
$Q_p(m^3/s)$	5.60	8.40
Volume ($10^3 m^3$)	215.30	293.50
BV 04		
$Q_p(m^3/s)$	6.20	9.40
Volume ($10^3 m^3$)	198.00	293.20
BV 05		
$Q_p(m^3/s)$	8.40	12.70
Volume ($10^3 m^3$)	212.20	288.40
BV 06		
$Q_p(m^3/s)$	6.20	9.20
Volume ($10^3 m^3$)	177.60	237.80

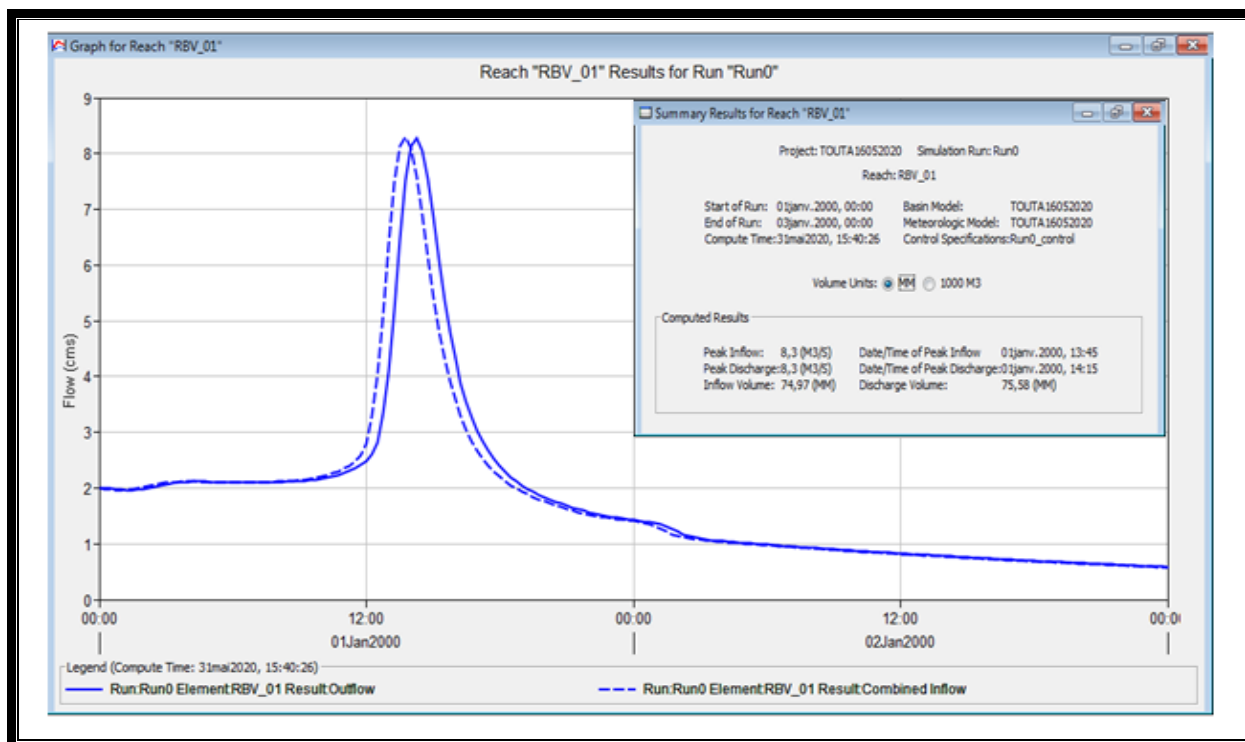


Figure IV .9.Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV01

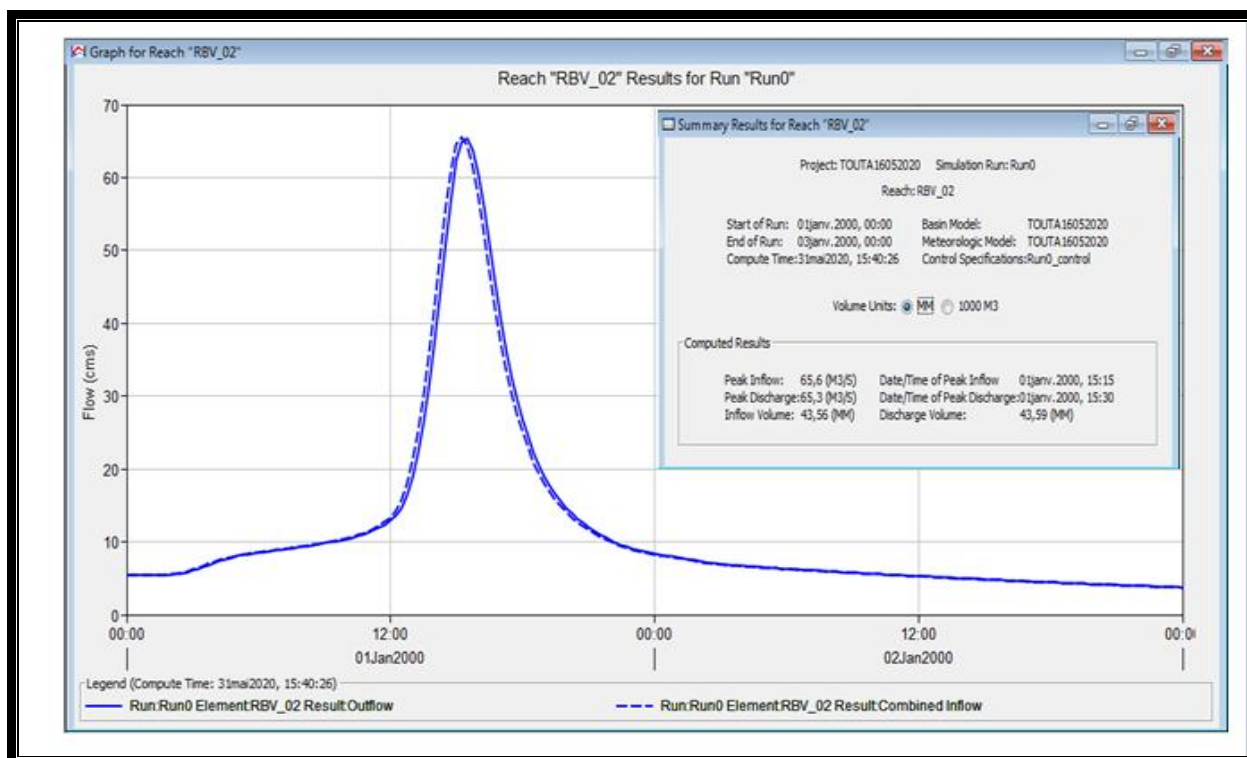


Figure IV.10. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV02

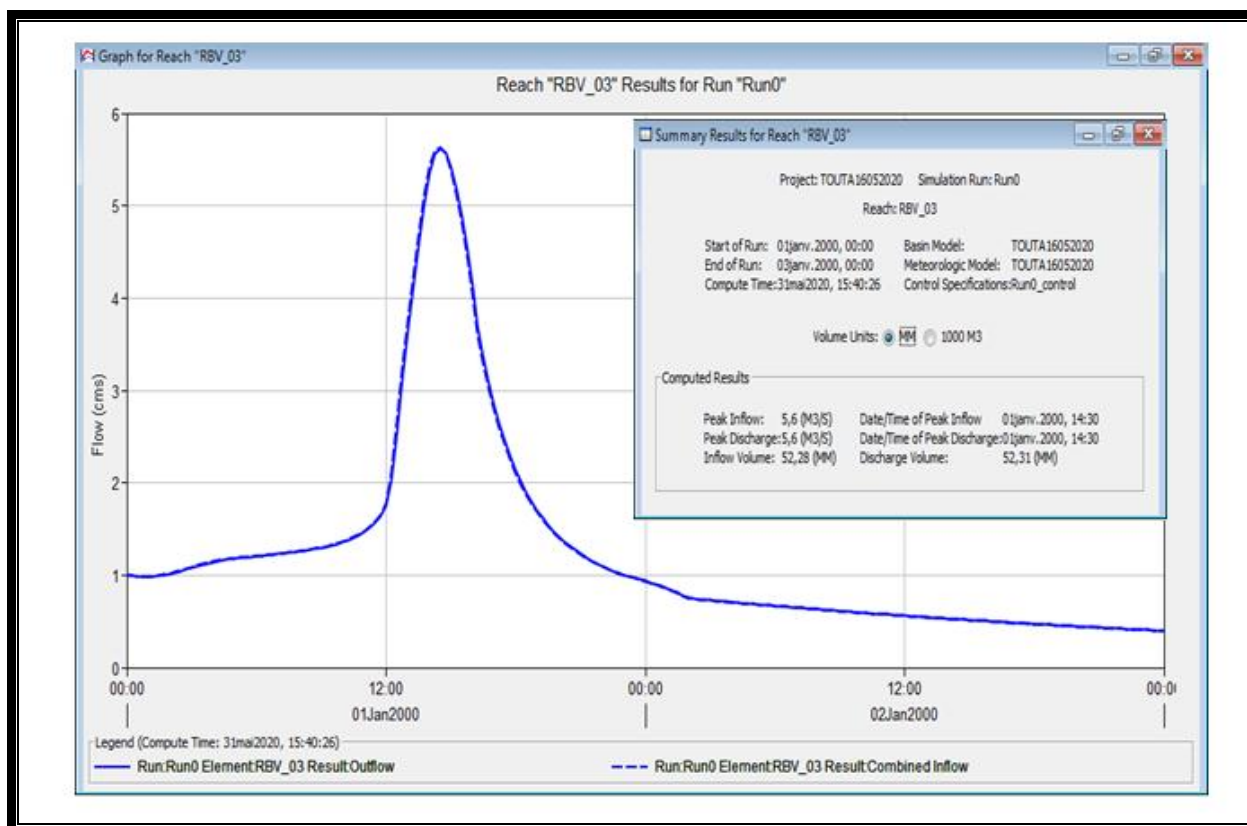


Figure IV.11. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV03

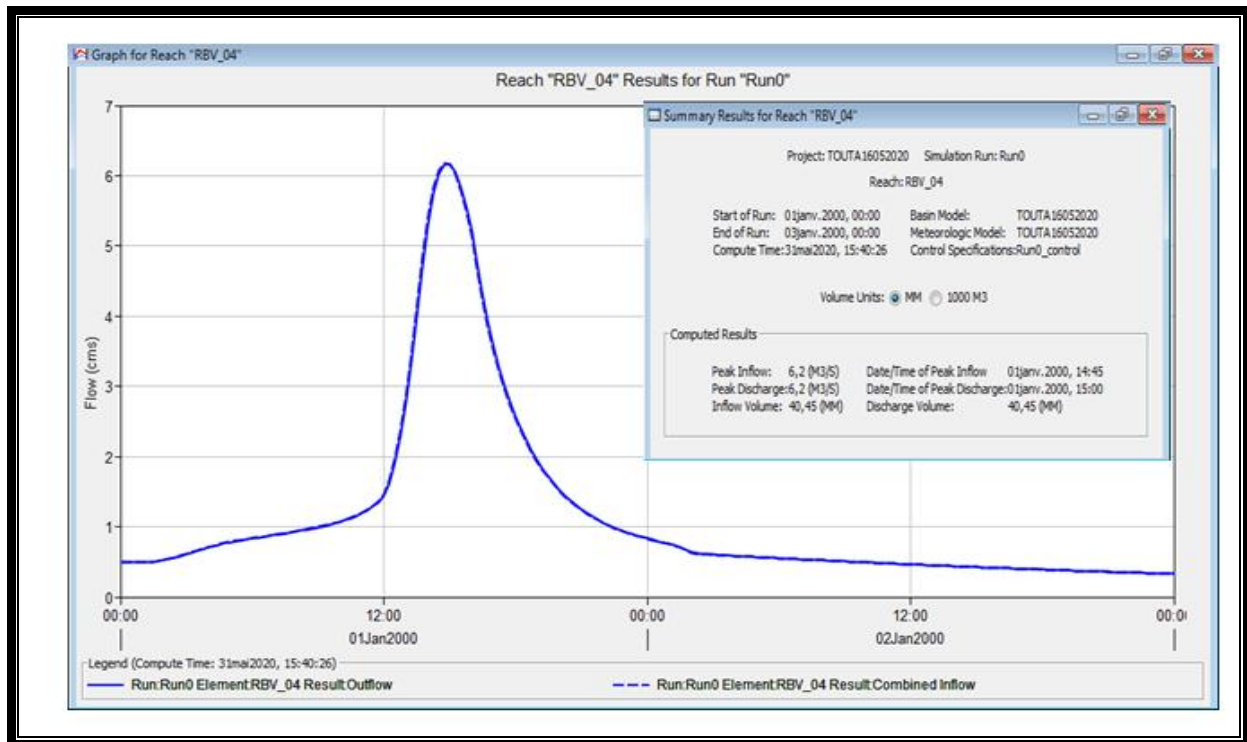


Figure IV.12. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV04

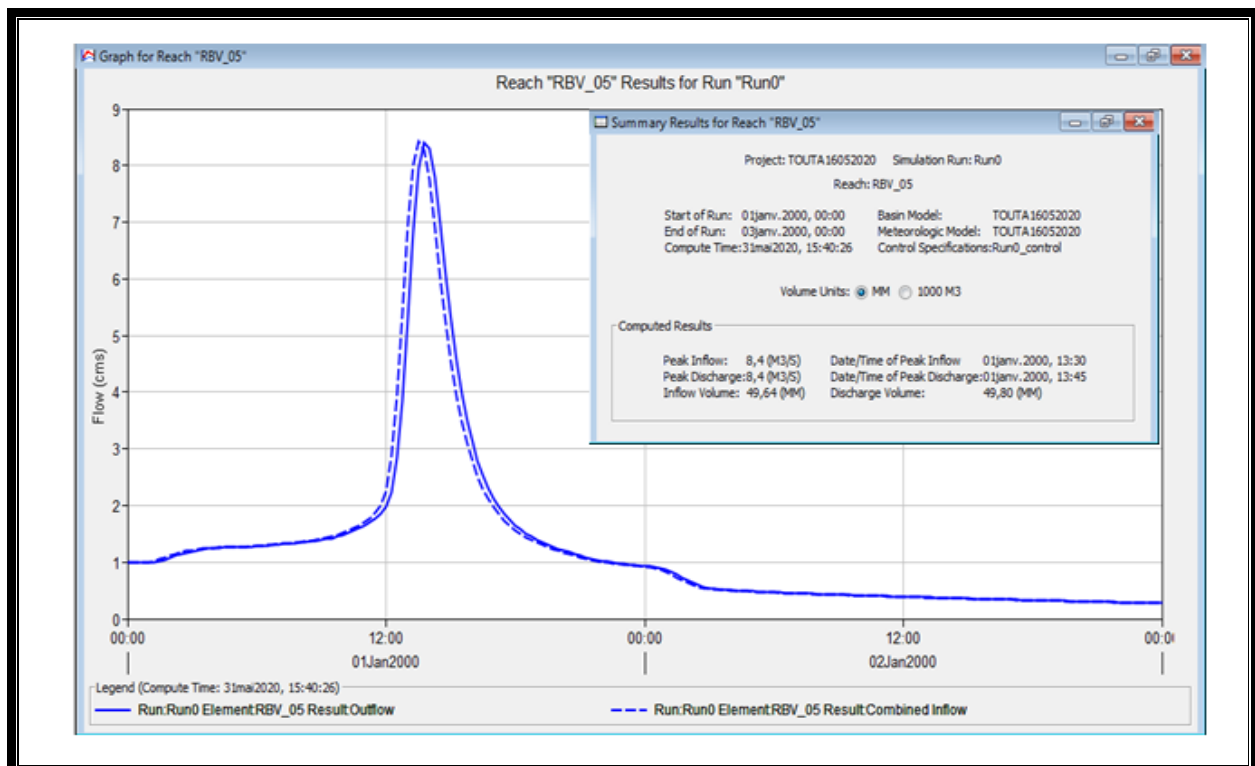


Figure IV.13. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV05

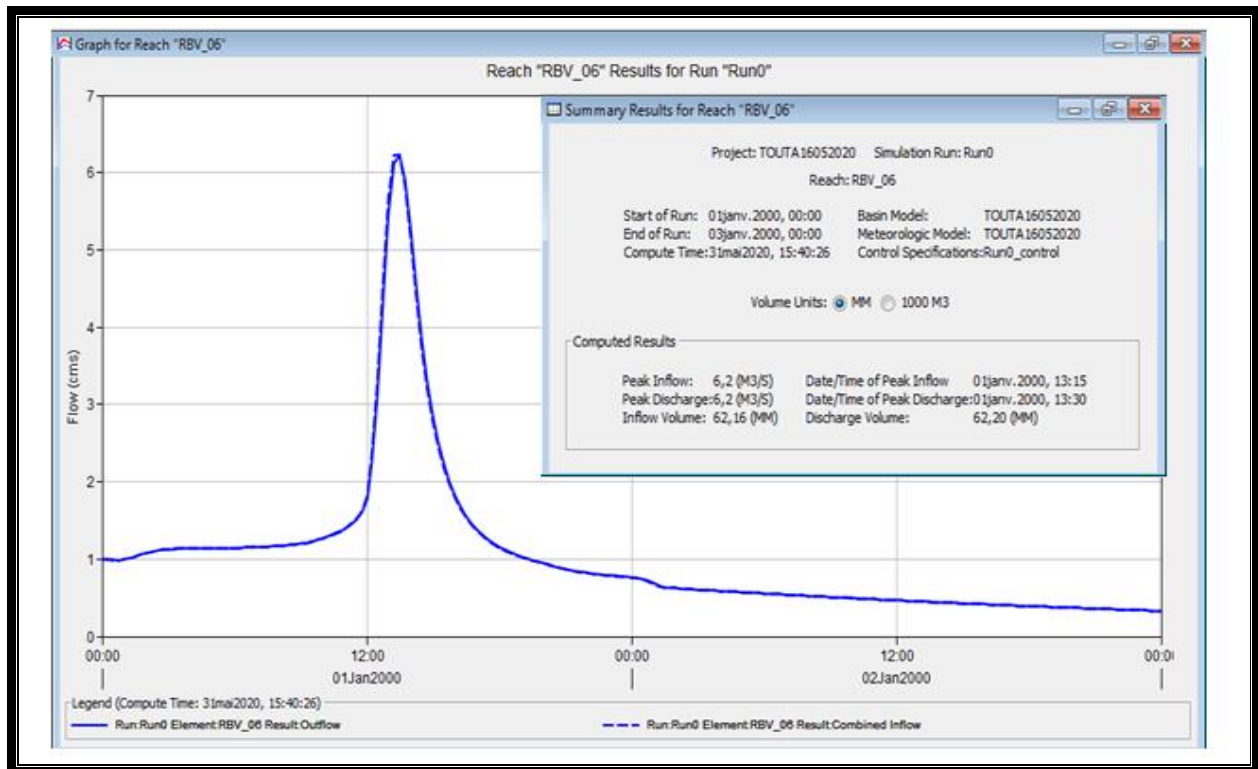


Figure IV.14. Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à l'exutoire du BV06

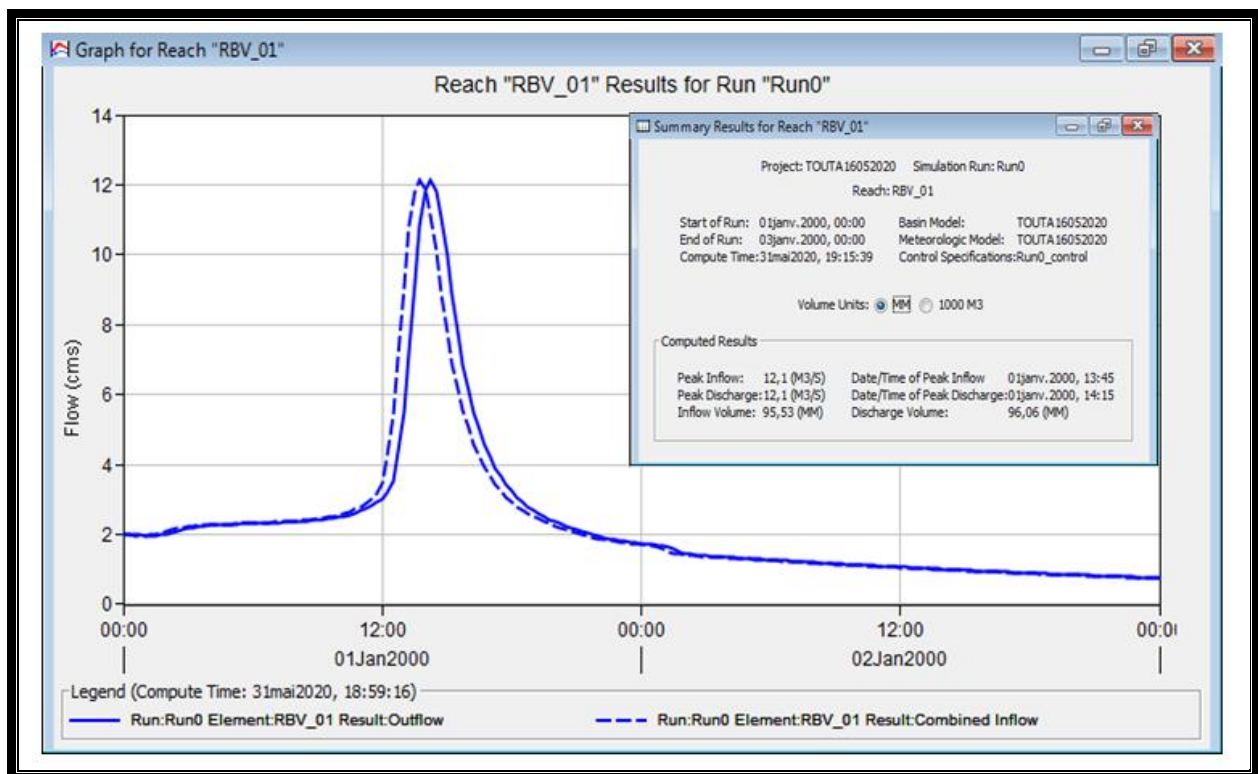


Figure IV.15. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV01

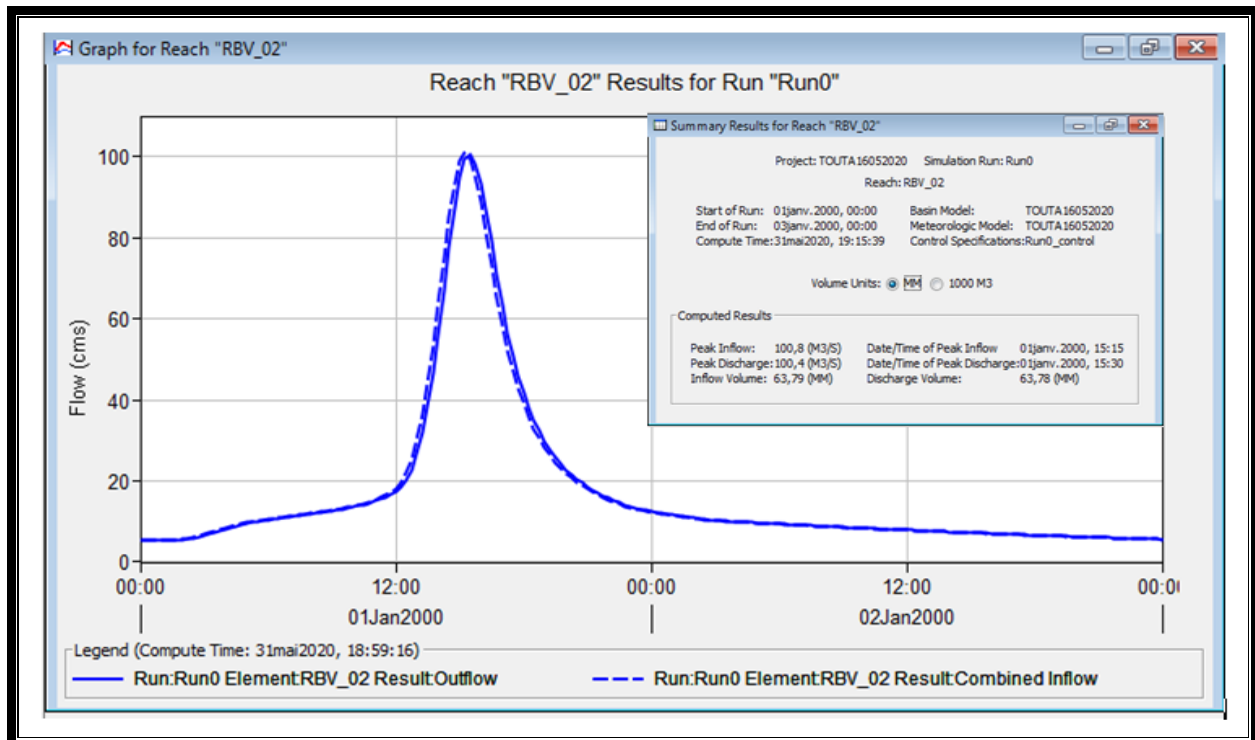


Figure IV.16. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV02

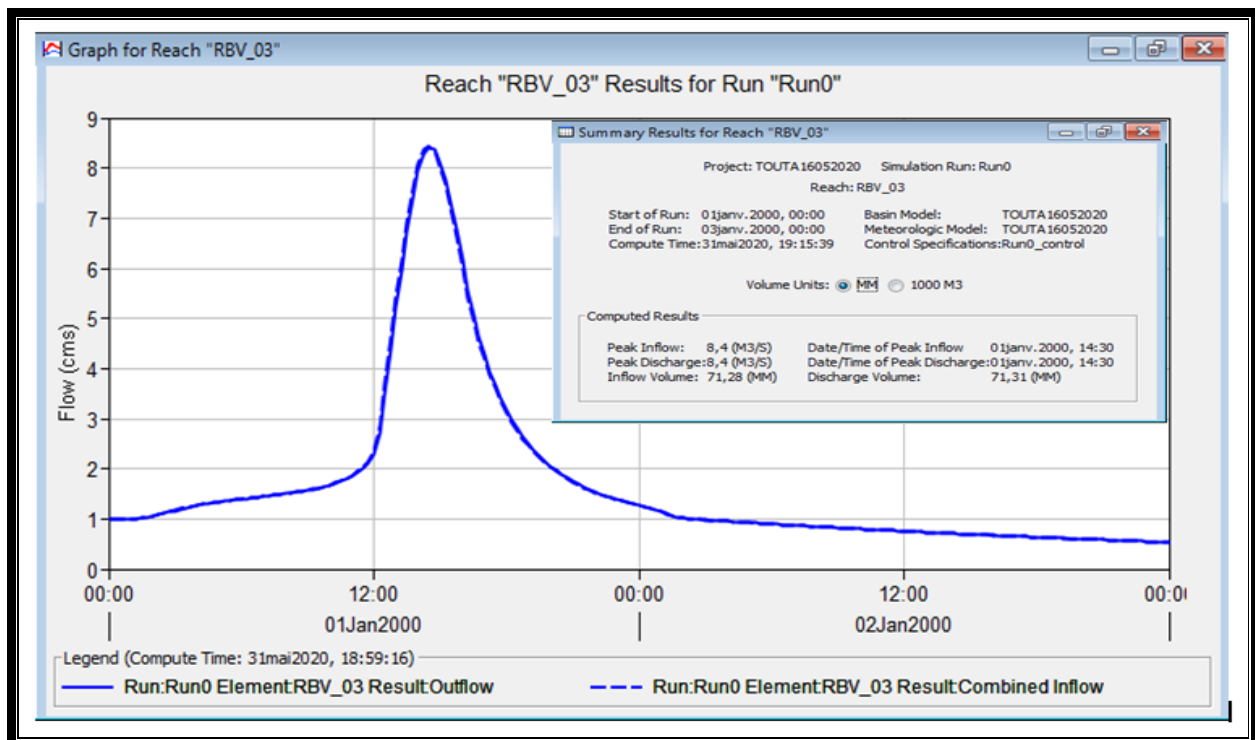


Figure IV.17. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV03

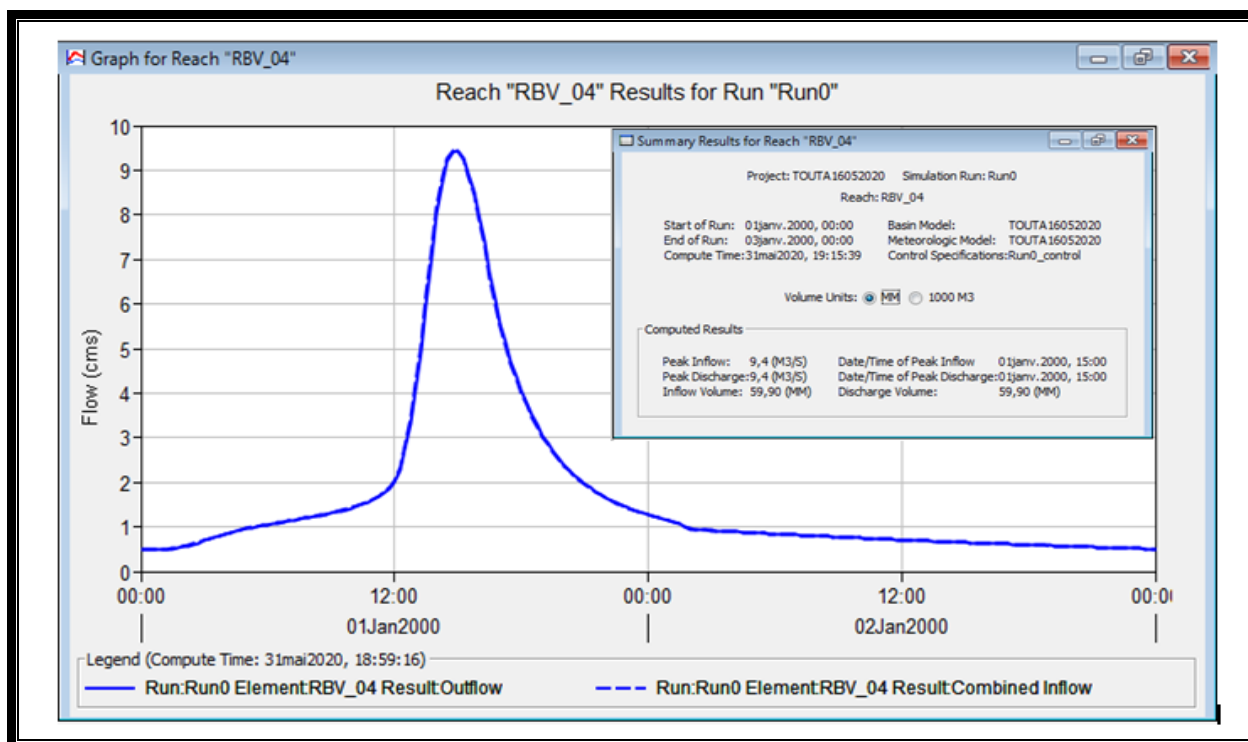


Figure IV.18. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV04

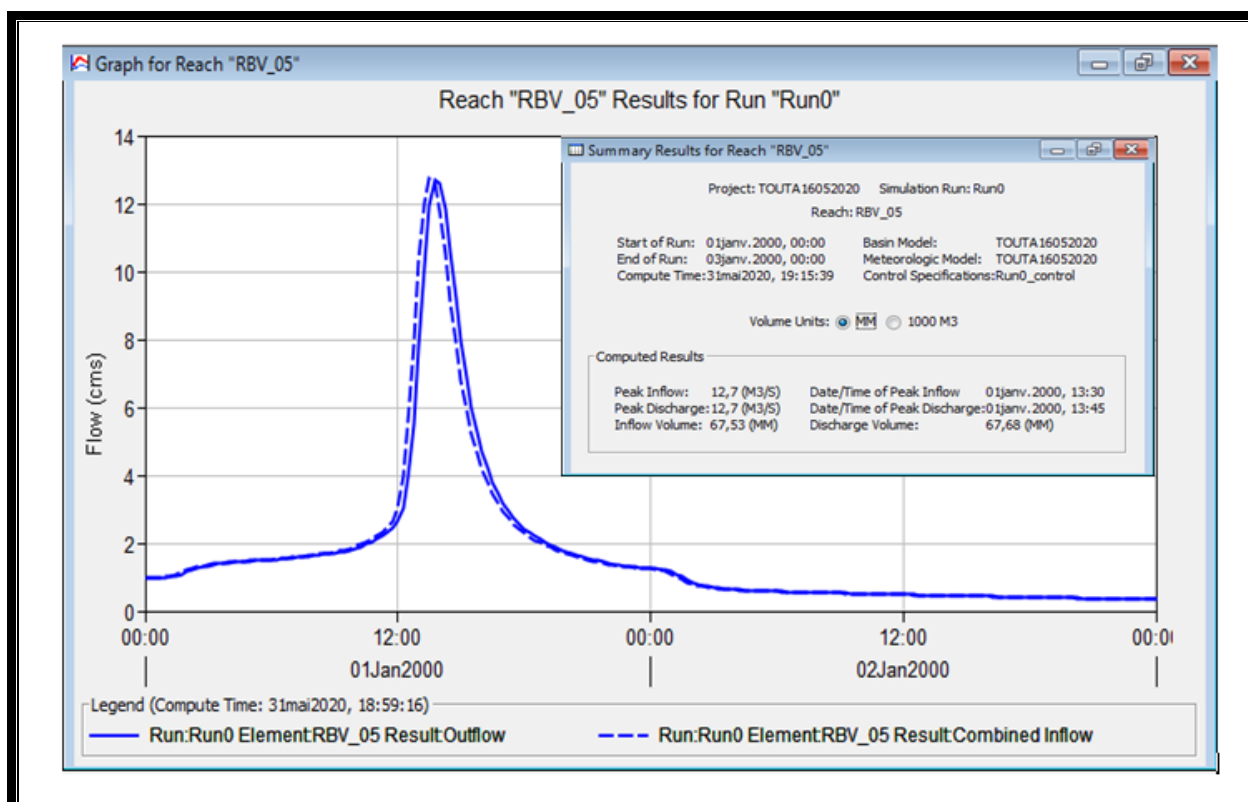


Figure IV.19. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l'exutoire du BV05

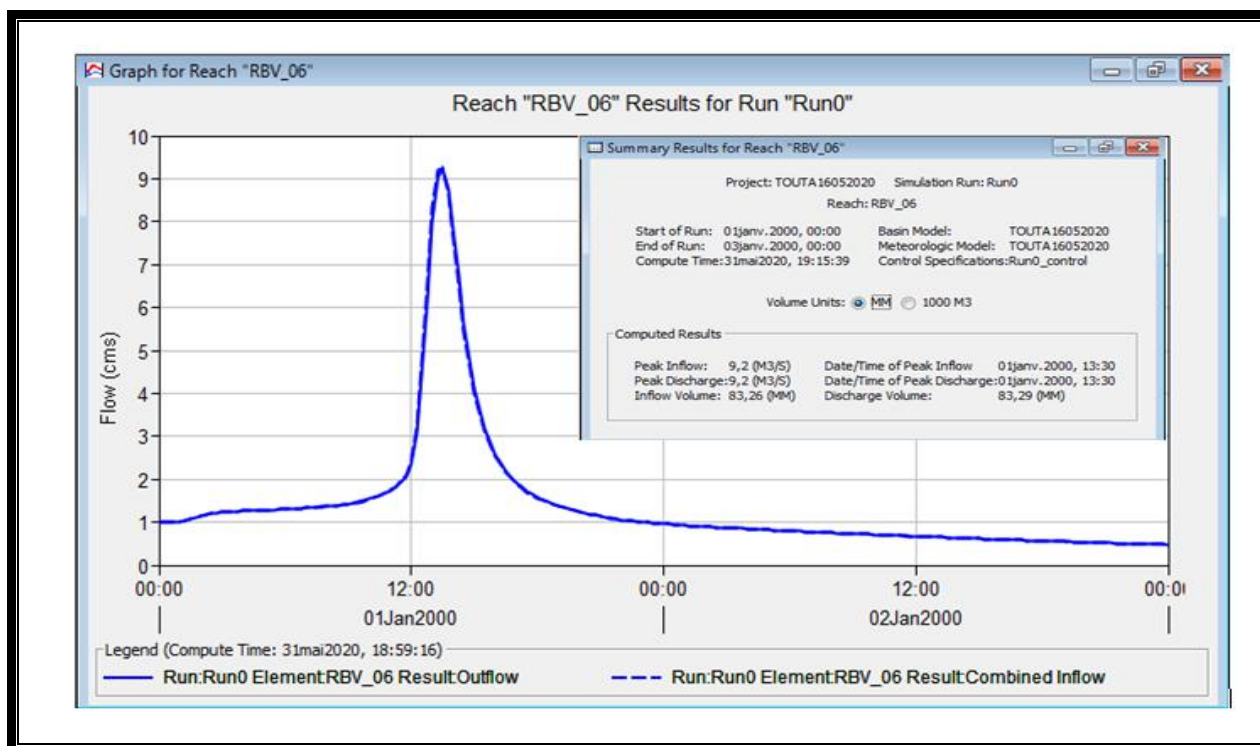


Figure IV.20. Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à l’exutoire du BV06

Tableau IV.9. les valeurs calculées par le formule empirique (SKOLOVSKY) et simulée par HEC-HMS du débit de pointe pour les averses quantiles

		Débits (m3/S)	
		Calculé par SKOLOVSKY	Simulé par HEC-HMS
T= 10 ans	BV01	6.88	8.30
	BV02	49.41	65.30
	BV03	3.66	5.60
	BV04	8.34	6.20
	BV05	9.98	8.40
	BV06	6.57	6.20
T= 100 ans	BV01	11.65	12.10
	BV02	83.67	100.40
	BV03	6.19	8.40
	BV04	14.13	9.40
	BV05	16.89	12.70
	BV06	11.13	9.20

IV.8. CONCLUSION :

A partir des résultats obtenus on remarque que les valeurs des débits extrêmes des crues fréquentielles estimées par le modèle hydrologique Hec Hms sont proches de celles trouvées par les formules empiriques de Turaza et Sokolovsky.

CHAPITRE V :

Application du modèle hydraulique HEC-RAS

Chapitre V : APPLICATION DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-RAS DE B.V AIN TOUTA

V.1. Introduction

Dans ce chapitre nous utiliserons le modèle de simulation hydraulique HEC-RAS, qui nous permet de calculer la propagation de l'onde de crue le long du système de rivière de la région d'étude, donnant ainsi le profil de la surface de l'eau.

A la suite de l'étude hydrologique qui a été conçue pour la production des hydrogrammes de crue fréquentielles de bassin Ain Touta, l'étude hydraulique a pour objet de déterminer à quelle hauteur les ouvrages d'aménagement doivent être dimensionnés pour protéger la ville de AIN TOUTA contre les inondations.

Ce chapitre présente d'abord l'application de HEC-GEORAS, en plus du principe de fonctionnement de HEC-RAS et les principaux menus du logiciel. Par la suite, les principales étapes requises pour la modélisation hydraulique, tout en réalisant l'exemple d'application pour le cas du bassin AIN TOUTA.

V.2. Application HEC-GEORAS

Afin de rendre possible les échanges entre HEC-RAS et les systèmes d'information géographique, le corps des ingénieurs de l'armée américaine a développé cette extension qui s'intègre après installation avec ARCGIS. La dernière version de HEC-GEORAS disponible sur le site officiel de HEC-RAS, est HEC-GeoRAS 10.3 qui est compatible avec ArcGIS 10.3 et qui nécessite au moins la licence ArcView en plus des deux extensions **Spatial Analyst** et **3D Analyst**.

HEC-Geo RAS est un ensemble de procédures, d'outils et d'utilitaires pour le traitement des données géo-spatiales dans ArcGIS en utilisant une interface utilisateur graphique. Il permet d'une part, la préparation des données géométriques à exporter vers HEC-RAS, et la récupération des résultats de simulation effectuée par HEC-RAS. L'élaboration du fichier de la géométrie à exporter, est basée sur un modèle numérique de terrain sous forme de TIN élaboré à partir du levé topographique de la ville de Ain Touta.

Les données résultantes de la simulation par HEC-RAS, peuvent être exploitées par HEC-Geo RAS sous ArcGIS pour analyser et cartographier les zones inondables, en plus d'autres possibilités. [21]

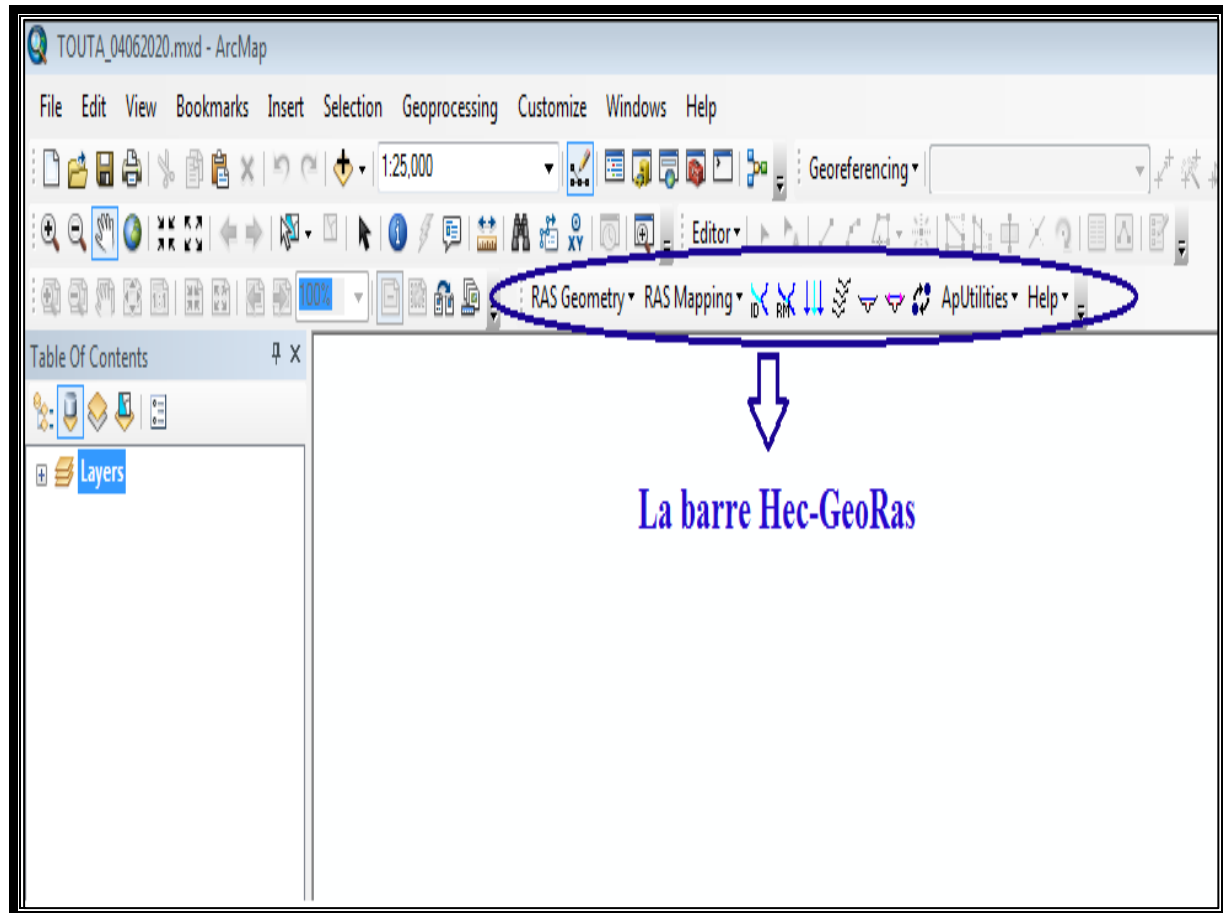


Figure. V.1 .L'extension Hec-GeoRas sur l'interface ArcMap

V.2.1.Préparation des données sur HEC-GeoRAS

Les données nécessaires pour les manipulations sur ArcGIS sont le MNT, la couche du bâti et celle du réseau de voies de circulation.

- ✓ **1 ère étape** : Paramétrer le type de terrain
 - ✚ Ouvrir le MNT sur ArcGIS => Activer l'extension HEC-GeoRAS => RAS Geometry => Cocher « Single » => Cocher le format du MNT => Sélectionner le MNT dans la liste déroulante => OK.
- ✓ **2 ème étape** : Créer les couches dans une géodatabase
 - ✚ RAS Geometry => Create RAS LAYERS => All => OK
- ✓ **3 ème étape** : Digitaliser l'axe central caractérisant le cours d'eau principal
 - ✚ Ouvrir session de mise à jour => Sélectionner « River » => Ligne => Digitaliser l'axe central.

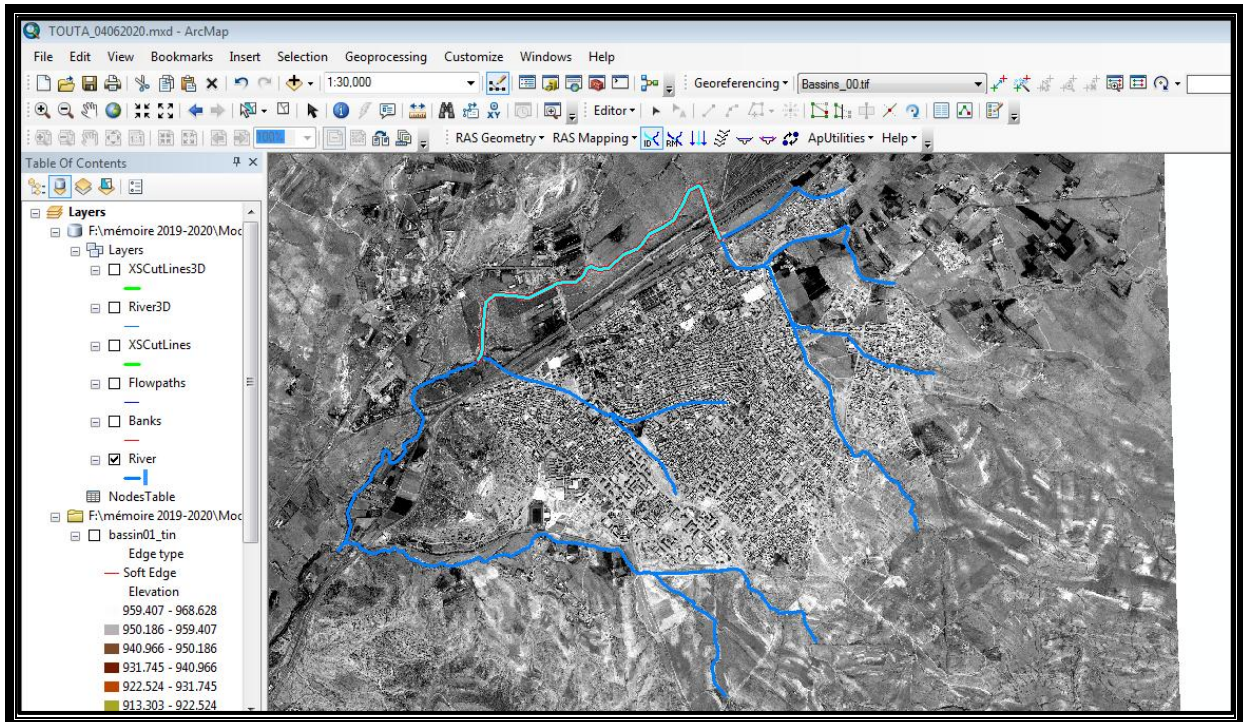


Figure.V.2. Digitaliser le cours d'eau.

Faire de même avec les affluents. Sélectionner le cours d'eau principal et le découper en deux à l'aide de l'outil Split Tool.

- **Remarque** : Il est nécessaire que les cours d'eau soient connectés entre eux. Pour cela il est conseillé d'utiliser l'outil Snapping. Également, faire bien attention de ne pas sortir du MNT car le logiciel le comptera comme une erreur.

-Renseigner les attributs des cours d'eau :

✚ Assign River Code and Reach Code to River => Sélectionner la partie du fleuve principal en amont => River Name : **Touta**=>Reach Name : **A_04** => OK

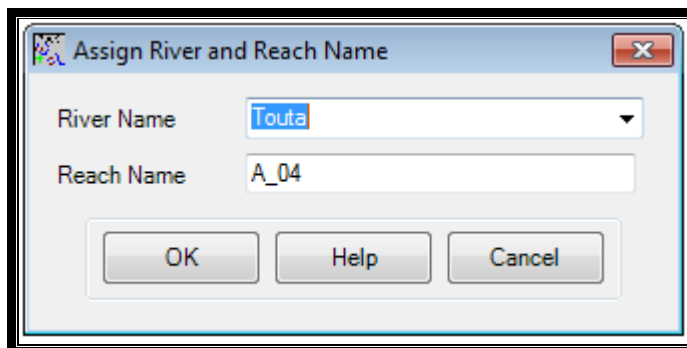


Figure.V.3. Sélectionner les Oueds par Hec-GeoRas.

Vérifier que les cours d'eau digitalisés sont connectés entre eux :

- ✚ RAS Geometry => Stream Centerline Attributes => All => Stream Centerline : River => Terrain => MNT => Stream Profiles 3D (pour avoir une version 3D des cours d'eau): River3D => OK
- ✓ **4 ème étape :** Digitaliser les berges des cours d'eau
- ✚ Ouvrir session de mise à jour => Sélectionner « Banks » => Ligne.

Les berges sont la représentation de l'emplacement du lit mineur du cours d'eau. On commence par la rive gauche d'amont en aval. Si des intersections avec les affluents sont présentes, au lieu de les traverser, il faut digitaliser la berge en deux lignes séparées.

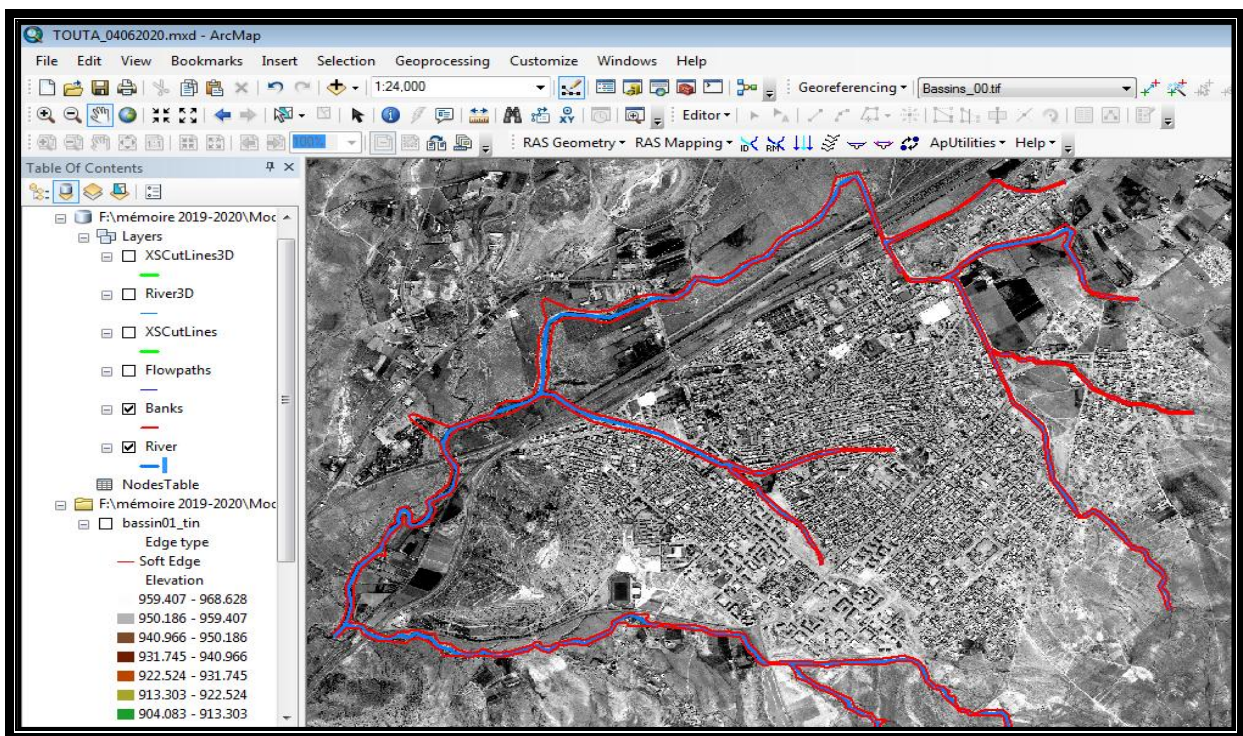


Figure.V.4. Les berges (les lignes rouges).

- ✓ **5 ème étape :** Digitaliser le sens d'écoulement

Le sens d'écoulement correspond aux zones inondables. Ici, on considère une grande partie de la ville de Touta si l'on se réfère aux inondations .

- ✚ RAS Geometry => Create RAS Layer => Flow path centerlines => Oui => Stream Centerline: River => Flow Path Centerlines: Flowpaths => OK.

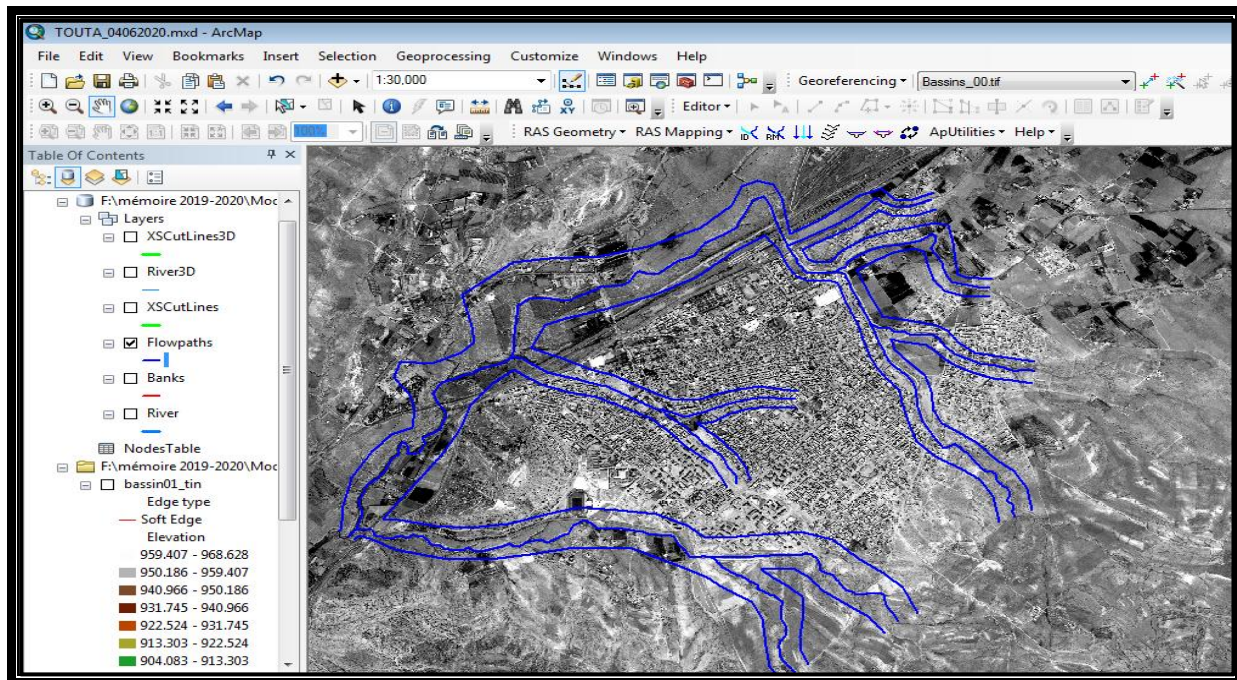


Figure.V.5. Digitaliser le sens d'écoulement.

- + Ouvrir session de mise à jour => Sélectionner Flowpaths => Ligne.
- + De la même manière que pour la digitalisation des berges, il est conseillé de commencer par l'amont des cours d'eau puis l'aval, et d'utiliser l'outil Snapping afin de connecter les lignes entre elles.

Renseigner les attributs des sens d'écoulement :

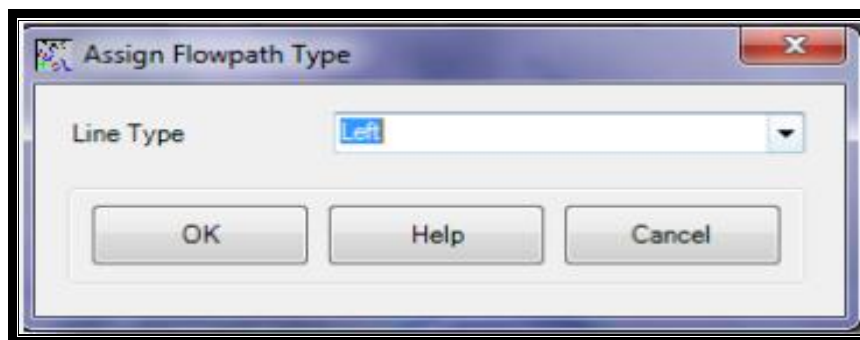


Figure.V.6. Sélection les attributs des sens d'écoulement.

- + Select Flowpath and Assign Line Type Attributes => Sélectionner les lignes => LineType : Left, Channel ou Right => OK.
- ✓ **6^{ème} étape :** Créer les transects
- + Ouvrir session de mise à jour => Sélectionner « XS Cutlines » => Ligne.

Voici les recommandations afin d'éviter les erreurs :

- ✚ Les transects doivent être perpendiculaires à l'axe central des cours d'eau
- ✚ Ils ne doivent pas traverser deux fois la même berge
- ✚ Ils doivent traverser les lignes des sens d'écoulement
- ✚ Marquer la présence des ponts par deux transects parallèles
- ✚ Les transects ne doivent pas sortir de l'emprise du MNT

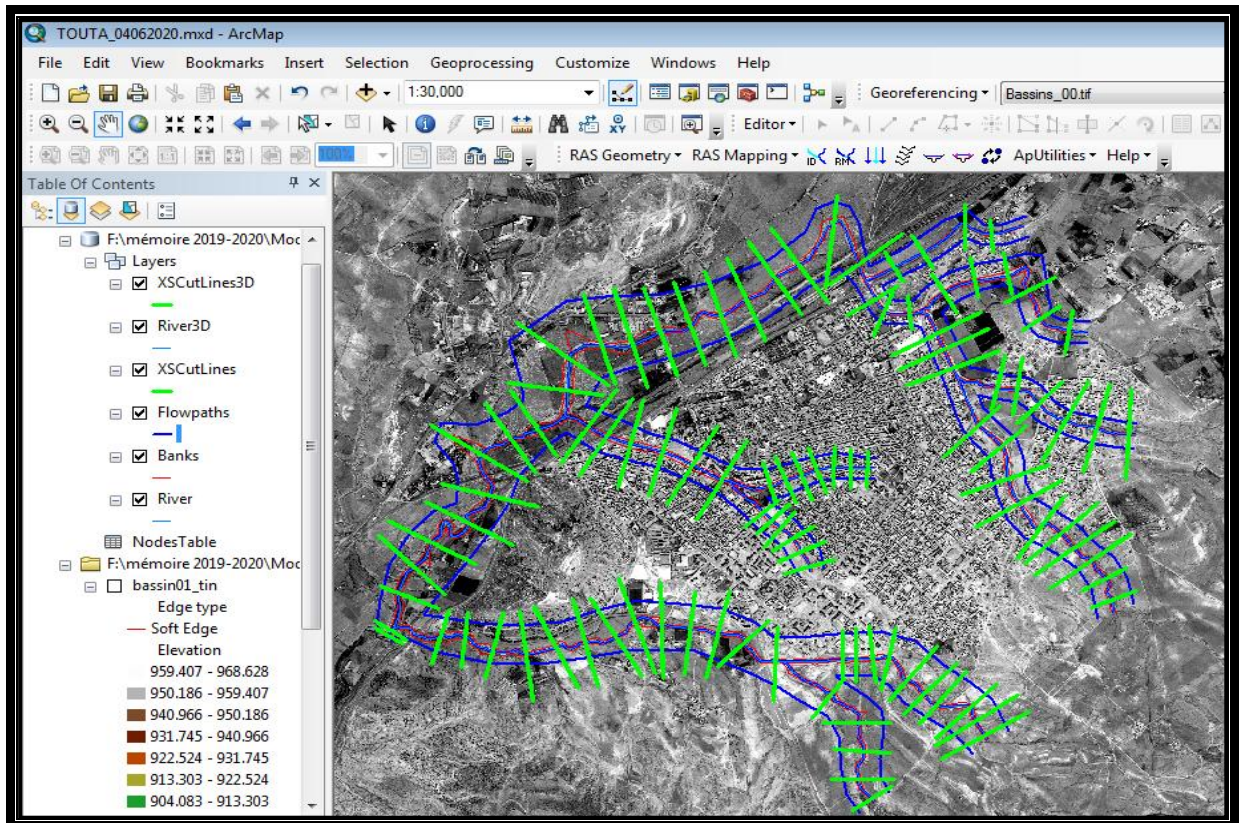


Figure.V.7. Digitaliser les transects.

Renseigner les attributs des transects :

- ✚ RAS Geometry => XS Cutlines Attributes => RiverReach Name/Stationing.

On vérifie que chaque transect ne traverse pas deux fois la même berge :

- ✚ RAS Geometry => XS Cutlines Attributes => Bank Stations => XS Cutlines : liste déroulante « XS CutLines » => Cocher « Bank Lines » => Bank Lines : liste déroulante « Banks » => OK.

On vérifie également que les transects ne traversent pas deux fois les lignes des sens d'écoulements:

✚ RAS Geometry => XS Cutlines Attributes => Downstream Reach Lengths.

Pour donner un profil en trois dimensions aux lignes de transects, on procède de la manière suivante :

✚ RAS Geometry => XS Cutlines Attributes => Elevations => XS Cutlines : liste déroulante « XS CutLines » => Terrain : MNT => XS Cutlines Profiles : XSCutLines3D => OK.

✓ **7ème étape** : Réviser les couches et les exporter

✚ RAS Geometry => Layer Setup => Onglet « Required Surface »: MNT => Onglet « Required Layers » : River/XS CutLines/XSCutLines3D => Onglet « Optional Layers»: Faire correspondre chaque paramètre avec chaque couche => Onglet « Optional Tables» : Faire correspondre chaque paramètre avec chaque table => OK.

✚ RAS Geometry => Export RAS Data => Choisir le dossier d'enregistrement => OK

V.3. Application du modèle hydraulique HEC-RAS

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 de l'U.S Army Corps of Engineers. Il s'agit d'une nouvelle version d'un modèle hydraulique auparavant nommé HEC-2, qui comporte maintenant un interface graphique permettant d'éditer, modifier et visualiser les données d'entrée, de même qu'observer les résultats obtenus.[15]

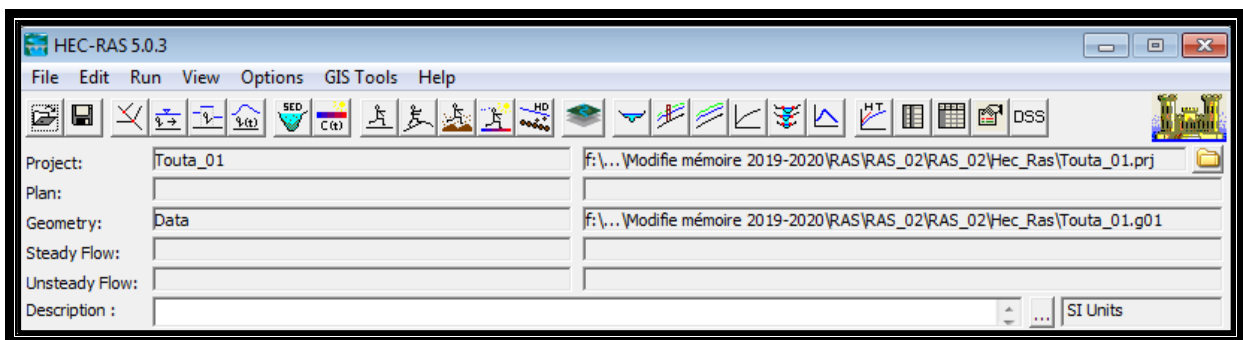


Figure.V.8. L'interface du logiciel HEC-Ras 5.0.3.

V.3.1. Structure du modèle hydraulique HEC-RAS

Dans la terminologie HEC-RAS, un projet est un ensemble de fichiers de données associés à un système fluvial particulier. Une analyse d'écoulement stable, une analyse d'écoulement instationnaire et des calculs de transport de sédiments peuvent être effectués dans le cadre du projet. Les fichiers de données d'un projet sont catégorisés comme suit:

(1) **plan data**, (2) **geometric data**, (3) **steady flow data**, (4) **unsteady flow data**, (5) **sediment data**, and (6) **hydraulic design data**. [15]

1. Données de plan(plan data) : Un plan représente un ensemble spécifique de données géométriques et de données de flux - les deux éléments requis pour effectuer une analyse hydraulique. Une fois les données géométriques et de flux entrées dans les projets, les plans peuvent être formulés en comparant les données géométriques et de flux.

2. Données géométriques (geometric data) : Les données géométriques représentent les éléments physiques d'un système de cours d'eau. Les données géométriques comprennent la connectivité de la rivière, les sections transversales des canaux, les longueurs de portée, les coefficients de perte d'énergie, les informations de jonction des cours d'eau et les données de structure hydraulique.

3. Données de débit stationnaire (steady flow data) : Des données de débit constant comprenant le régime d'écoulement, les conditions aux limites et les informations de débit de pointe sont nécessaires pour effectuer une analyse de débit constant.

4. Données de débit instationnaire(unsteady flow data) : L'utilisateur doit saisir les conditions aux limites de toutes les limites externes du système, ainsi que tous les emplacements internes souhaités, et définir les conditions initiales de flux et de zone de stockage dans le système au début de la période de simulation. Les conditions aux limites peuvent être saisies manuellement par l'utilisateur ou importées à partir d'un fichier HEC-DSS.

5. Données sur les sédiments (sédiment data) : Les capacités de transport des sédiments de HEC-RAS sont en cours de développement. Cette fonctionnalité devrait être disponible dans les futures versions du programme.

6. Données de conception hydraulique(hydraulic design data) : Cette option permet à l'utilisateur d'effectuer une série de modifications de canal et d'évaluer l'hydraulique de ces modifications. Ces données peuvent être utilisées pour déterminer si une modification de canal entraînera un affouillement supplémentaire du lit du canal et des berges.

V.3.2. Lancement des calculs sur HEC-RAS :

Importation du fichier de la géométrie

Une fois que les données ont pu être créées sur ArcGIS, la phase qui suit consiste à traitement de celles-ci sur le logiciel HEC-RAS :

 File => Save Project As => Choisir emplacement du projet => Nommer :

Touta_01.prj (extension du projet à ne pas confondre avec l'extension du fichier de projection accompagnant les couches shapefiles) => OK.

- ✚ Edit => Geometric Data => File => Import Geometry Data => GIS Format... => Sélectionner le fichier avec l'extension .sdf => Import data as: SI (metric) units => Next

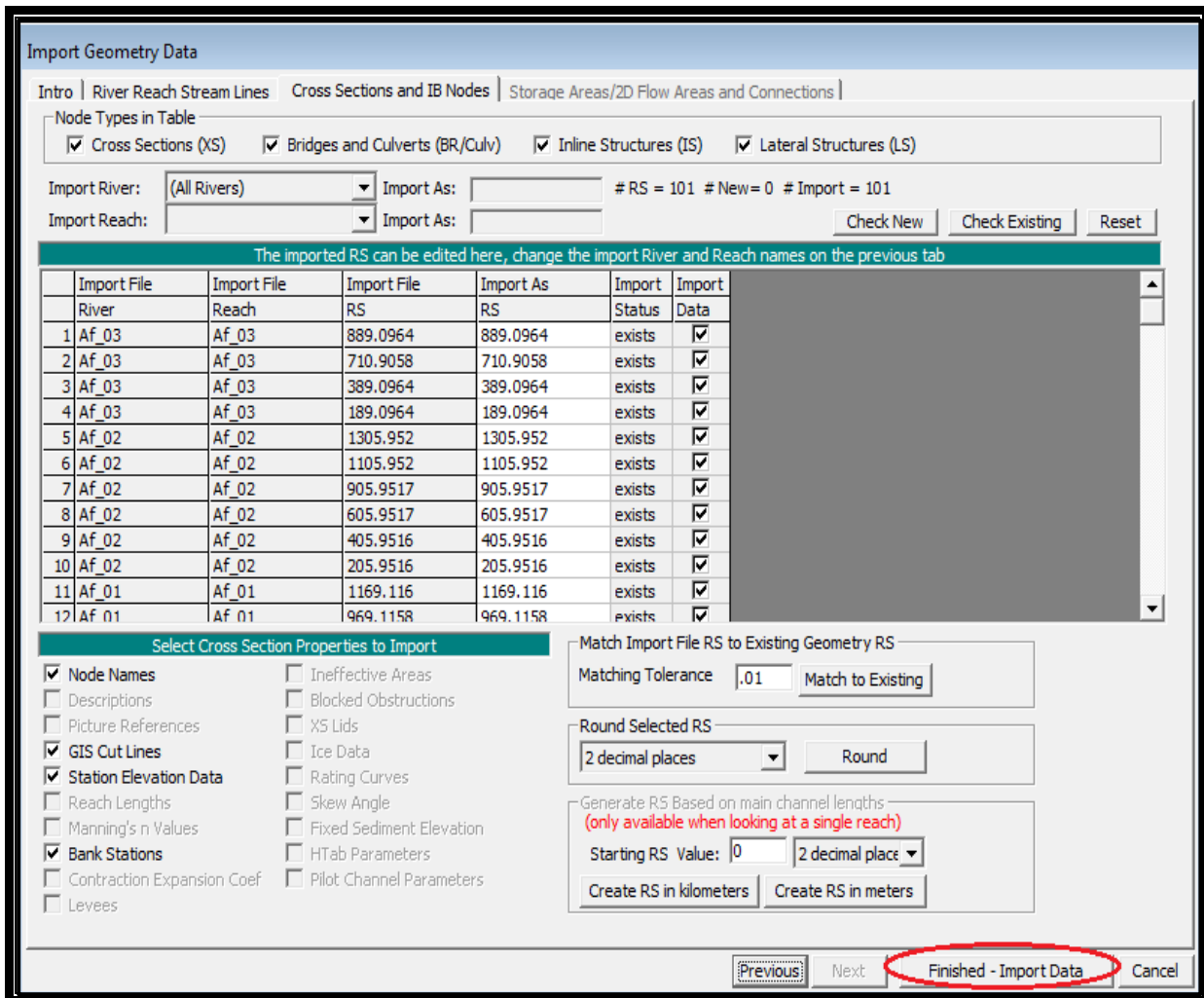


Figure.V.9. Cliquer sur Finished – Import Data.

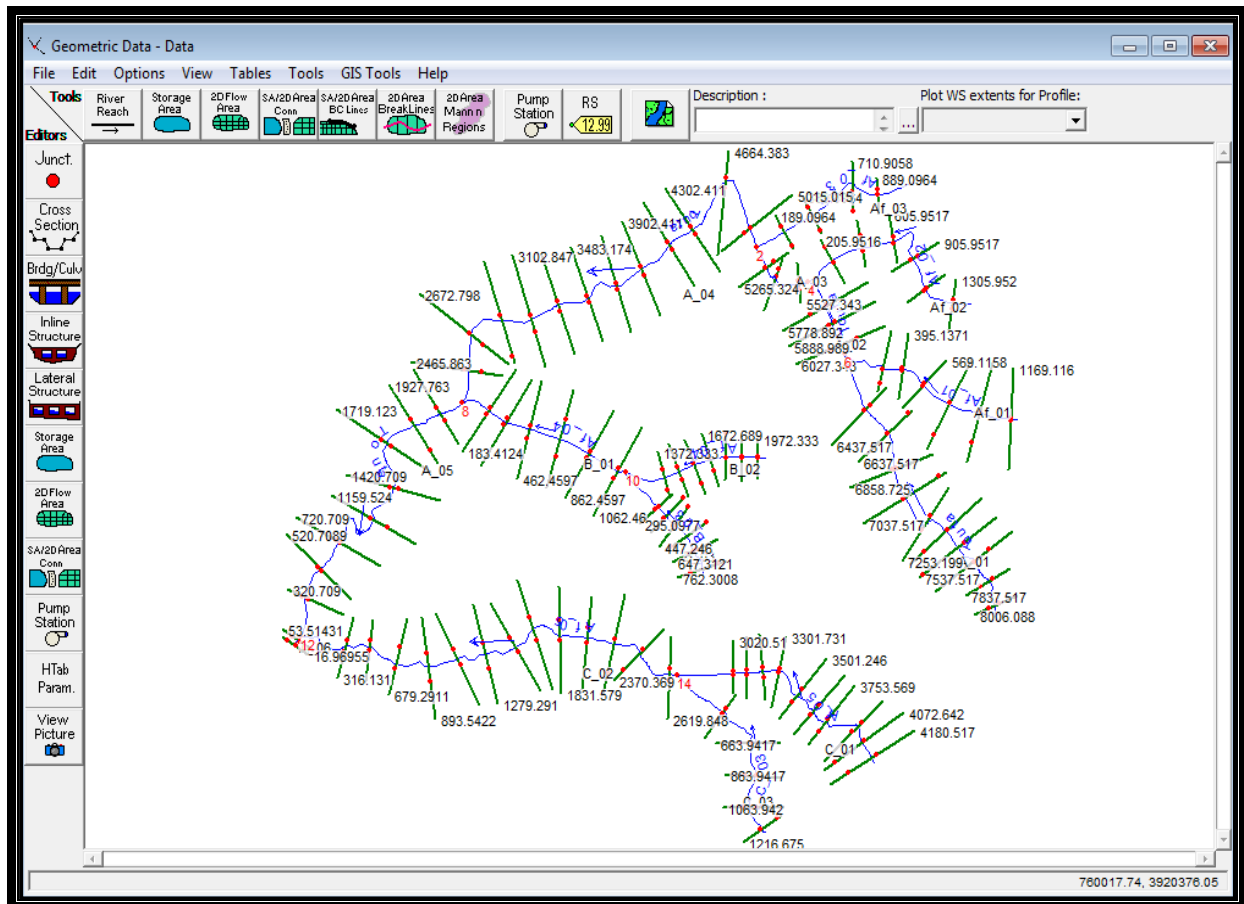


Figure.V.10. L'importation de la géométrie du tronçon a modélisée dans Hec Ras.

On passe donc à l'étape de traitement des données afin de pouvoir lancer la simulation :

- ✚ Tools => Cross Section Points Filter => Onglet « Multiple Locations » => River : (AllRivers) => Cliquer sur la flèche => Onglet « Minimize Area Change » => Number of points to trim cross section down to : 250 => Cliquer sur « Filter Points on Selected XS » => Fermer la fenêtre qui s'ouvre => OK.

Le travail suivant consiste à sélectionner une par une les sections transversales (car peu Nombreuses) et de renseigner les valeurs de Manning :

- ✚ Sélectionner la première section => Edit Cross Section => Manning's n Values => LOB : 0.02 => Channel : 0.02 => ROB : 0.02 => Cliquer sur une des deux flèches => Attribuer les valeurs jusqu'à la dernière section transversales => Fermer

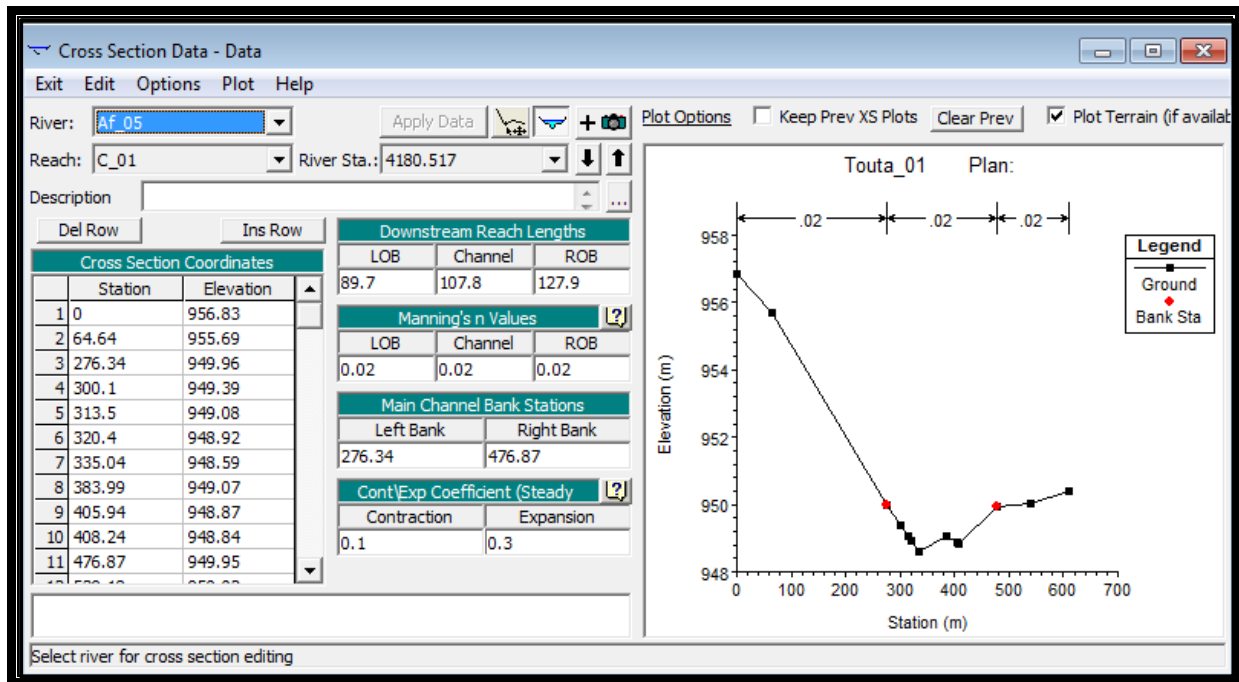


Figure.V.11. Attribution du coefficient de Manning à chaque section transversale.

V.4. Résultats de la simulation par HEC-RAS

Après la simulation, les résultats sont transformés vers l'ArcGis. Dans ce dernier on peut les surfaces inondables, la profondeur d'eau et les vitesses. Les résultats sont les suivants :

V.4.1. Les zones inondables :

Les figures, ci-dessous, montrent des représentations des zones inondables de la ville :

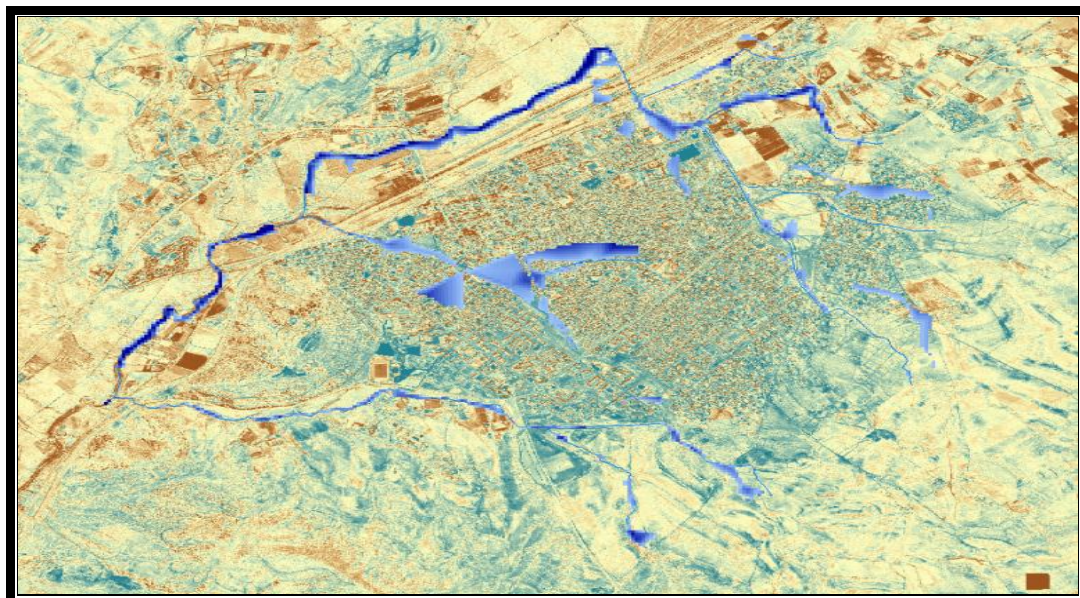


Figure.V.12. Zones inondables (cruce centennale)

V.4.2. Les hauteurs

Sur les figures suivantes on peut la profondeur d'eau en un point donnée dans un instant donné ainsi que le long du talweg :

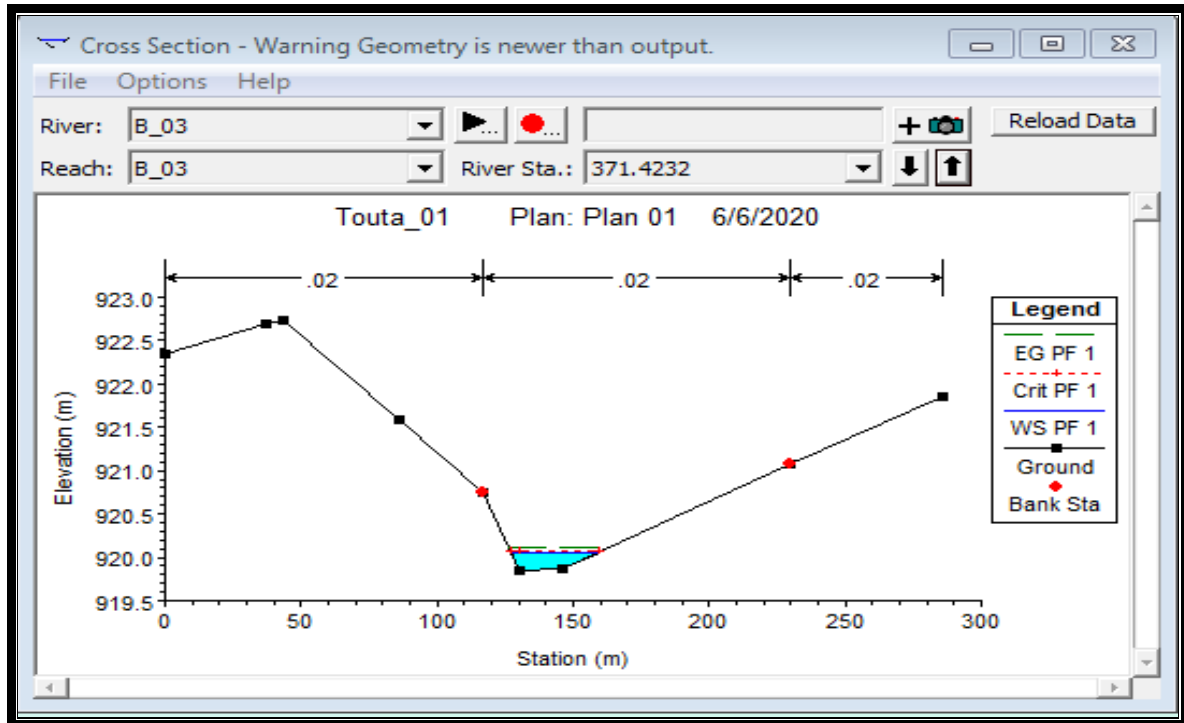


Figure.V.13.Graphe de la hauteur d'eau pour un point spécifique dans l'oued

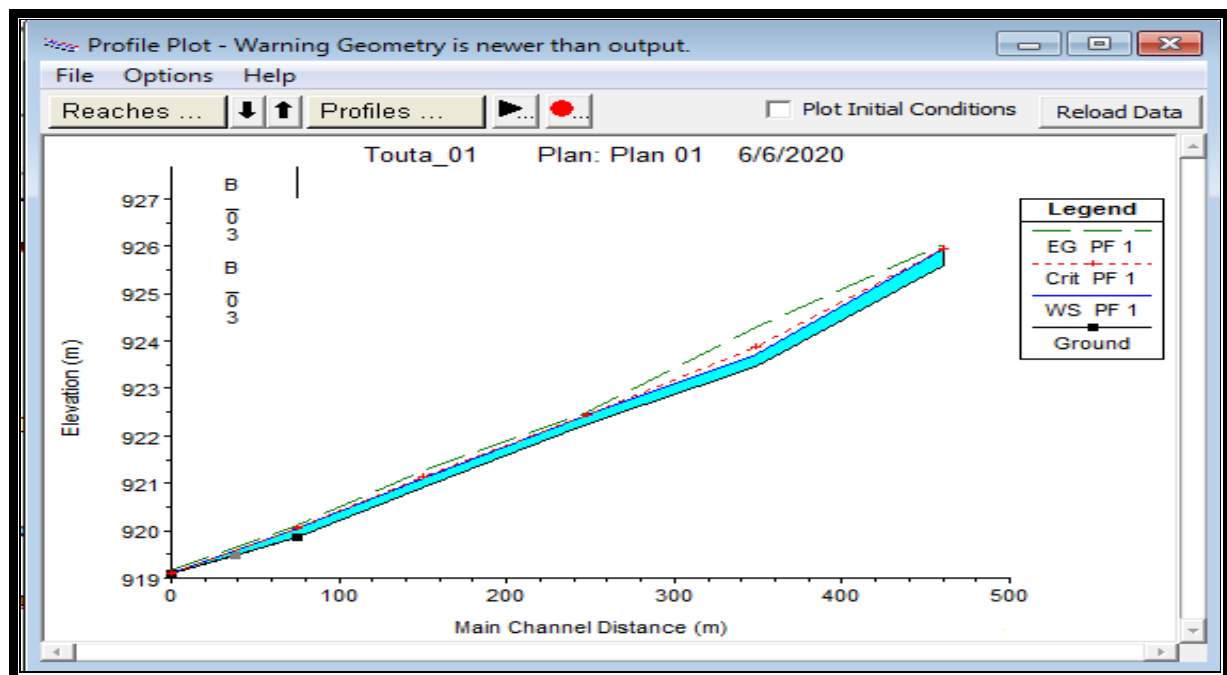


Figure.V.14.Graphe de la hauteur d'eau pour le long du talweg B3

V.4.3. Discussion des résultats :

Après analyse des résultats nous constatons ce que suit :

- ✚ Les zones inondables sont importantes pour les deux crues décennale et centennale
- ✚ Les hauteurs d'eau sont importantes au niveau des oueds limitant la ville et faible dans le noyau aux niveaux du Rivers Af 04 et B03.
- ✚ Les vitesses sont importantes aux niveaux du Rivers Af 04 et B03.

V.4.4. Les actions de prévention et de secours

Pour conclure cette partie de l'étude, nous allons projeter les aménagements possibles afin d'éviter de subir des inondations lors des crues dans la ville. Nous tentons de donner des solutions réelles avec calculs hydrauliques. Les solutions proposées consistent :

- ✚ Aménagement de oued Jar Ighiren drainant le sous bassin 1 limitant la ville du Nord-Est en galerie 2,5 x 1,5 m.
- ✚ Aménagement de oued Oued Ain Arous drainant le sous bassin 2 limitant la ville du Nord-Est (également) en canal trapézoïdal $b = 3$, $B = 6$ et $h = 3$.
- ✚ Prolongement des canaux trapézoïdaux existants drainant les sous bassins 03 Oued Siadi et 04 Oued Ain Foulis.
- ✚ Réalisation de deux collecteurs dans les allées principaux de la ville drainant les eaux du sous bassin 5-1 et 5-2 vers le réseau d'assainissement existant (les dimensions et les calculs hydrauliques dépend du réseau d'assainissement existant).
- ✚ Aménagement de oued Dissen drainant le sous bassin (6 et 5) limitant la ville du Sud-Ouest en galerie 3 x 2 m.

V.5. Calculs hydrauliques

Les calculs ont été établis par le logiciel SIC².

Résultats Des Calculs Hydraulique

- ✚ Le premier ouvrage est l'aménagement d'oued Jar Ighire (BV 01) en galerie (2,0 x 1,5) ; évacuera un débit centennal de **12,79 m³/s**, de pente minimale de **1,26 %**.

Les caractéristiques hydrauliques de ce canal sont :

Tableau.V.1.Ouvrage 01 : Données de base

Type de section		
Choix du type de section	Rectangulaire	
Définition de la section rectangulaire		
		Paramètre fixé Paramètre à varier
Largeur au fond (m)	2	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Caractéristiques du bief		
		Paramètre fixé Paramètre à varier
Coefficient de Strickler ($m^{1/3}s^{-1}$)	70	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Pente du fond (m/m)	0.0126	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Hauteur de berge (m)	1,5	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Caractéristiques hydrauliques		
		Paramètre fixé Paramètre à varier
Débit (m^3/s)	12.79	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Tirant d'eau (m)	1.214	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Paramètres de calcul		
Précision de calcul(m)	0.001	

Tableau.V.2.Ouvrage 01 : Résultats des calculs

La charge spécifique (m)	2.628
La charge critique (m)	2.414
La largeur au miroir (m)	2.000
Le périmètre mouillé (m)	4.428
La surface mouillée (m ²)	2.428
Le rayon hydraulique (m)	0.548
La vitesse moyenne (m/s)	5.268
Le Froude	1.526
Le tirant d'eau critique (m)	1.609
Le tirant d'eau normal (m)	1.215
Le tirant d'eau fluvial (m)	2.196
Le tirant d'eau torrentiel (m)	1.214
Le tirant d'eau conjugué (m)	2.083
La perte de charge (m/m)	0.013
Variation linéaire de l'énergie spécifique (m/m)	-0.000
Impulsion (N)	81 831.950
La force tractrice (Pa)	67.874

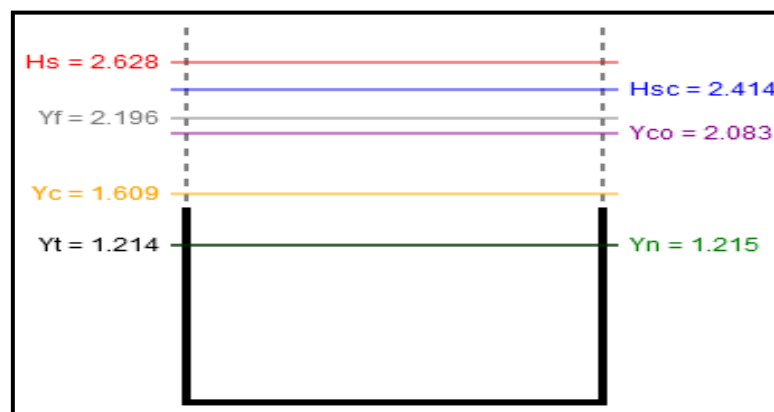


Figure.V.15.Schéma de l'ouvrage 01

Le deuxième ouvrage est un canal ceinture (BV 02) Oued Arous évacuera un débit centennal de **88,40 m³/s**, de pente minimale de **0,47%**.

Ce canal est trapézoïdal de dimensions **b = 3,5 ; B = 6,5 et H = 3,0 m**

Les caractéristiques hydrauliques de ce canal sont :

Tableau.V.3. Ouvrage 02 : Données de base

Type de section		
Choix du type de section	Trapézoïdale	
Définition de la section trapézoïdale		
		Paramètre fixé Paramètre à varier
Largeur au fond (m)	3.5	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Fruit des berges (m/m)	0.5	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Caractéristiques du bief		
		Paramètre fixé Paramètre à varier
Coefficient de Strickler (m ^{1/3} s ⁻¹)	70	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Pente du fond (m/m)	0.0047	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Hauteur de berge (m)	3	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Caractéristiques hydrauliques		
		Paramètre fixé Paramètre à varier
Débit (m ³ /s)	88.4	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Tirant d'eau (m)	2.912	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Paramètres de calcul		
Précision de calcul(m)	0.001	

Tableau.V.4. Ouvrage 02 : Résultats des calculs

La charge spécifique (m)	4.824
La charge critique (m)	4.685
La largeur au miroir (m)	6.412
Le périmètre mouillé (m)	10.011
La surface mouillée (m ²)	14.432
Le rayon hydraulique (m)	1.442
La vitesse moyenne (m/s)	6.125
Le Froude	1.304
Le tirant d'eau critique (m)	3.354
Le tirant d'eau normal (m)	2.912
Le tirant d'eau fluvial (m)	3.921
Le tirant d'eau torrentiel (m)	2.912
Le tirant d'eau conjugué (m)	3.837
La perte de charge (m/m)	0.005
Variation linéaire de l'énergie spécifique (m/m)	-0.000
Impulsion (N)	727 428.387
La force tractrice (Pa)	66.495

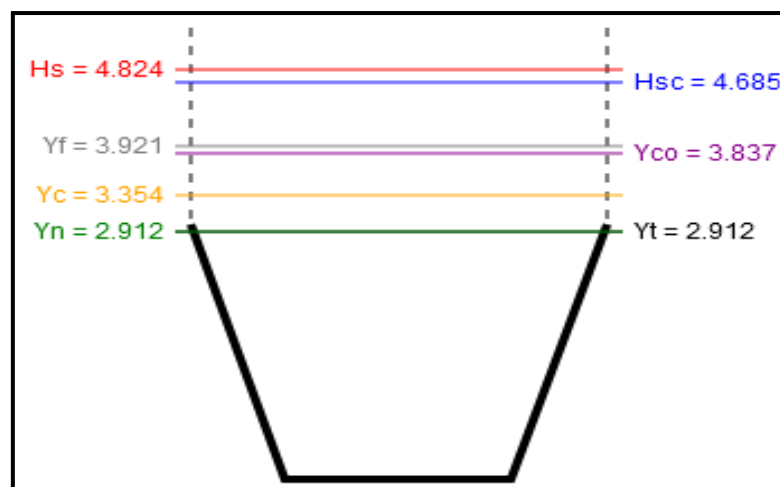


Figure.V.16.Schéma de l'ouvrage 02

✚ Le troisième ouvrage est un canal ceinture (BV 03 Oued Ain Foulis) évacuera un débit centennal de **8,55 m³/s**, de pente minimale de **0,80 %**.

Ce canal est rectangulaire de dimensions **b = 2,0** et **H = 1,5 m**.

Les caractéristiques hydrauliques de ce canal sont :

Tableau.V.5. Ouvrage 03 : Données de base

Type de section		
Choix du type de section	Rectangulaire	
Définition de la section rectangulaire		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Largeur au fond (m)	<input type="text" value="2.0"/>	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Caractéristiques du bief		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Coefficient de Strickler (m ^{1/3} s ⁻¹)	<input type="text" value="70"/>	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Pente du fond (m/m)	<input type="text" value="0.0199"/>	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Hauteur de berge (m)	<input type="text" value="1.5"/>	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Caractéristiques hydrauliques		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Débit (m ³ /s)	<input type="text" value="8.55"/>	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Tirant d'eau (m)	<input type="text" value="0.758"/>	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Paramètres de calcul		
Précision de calcul(m)	<input type="text" value="0.001"/>	

Tableau.V.6. Ouvrage 03 : Résultats des calculs

La charge spécifique (m)	2.379
La charge critique (m)	1.846
La largeur au miroir (m)	2.000
Le périmètre mouillé (m)	3.516
La surface mouillée (m ²)	1.516
Le rayon hydraulique (m)	0.431
La vitesse moyenne (m/s)	5.640
Le Froude	2.068
Le tirant d'eau critique (m)	1.230
Le tirant d'eau normal (m)	0.758
Le tirant d'eau fluvial (m)	2.184
Le tirant d'eau torrentiel (m)	0.758
Le tirant d'eau conjugué (m)	1.870
La perte de charge (m/m)	0.020
Variation linéaire de l'énergie spécifique (m/m)	-0.000
Impulsion (N)	53 857.119
La force tractrice (Pa)	84.293

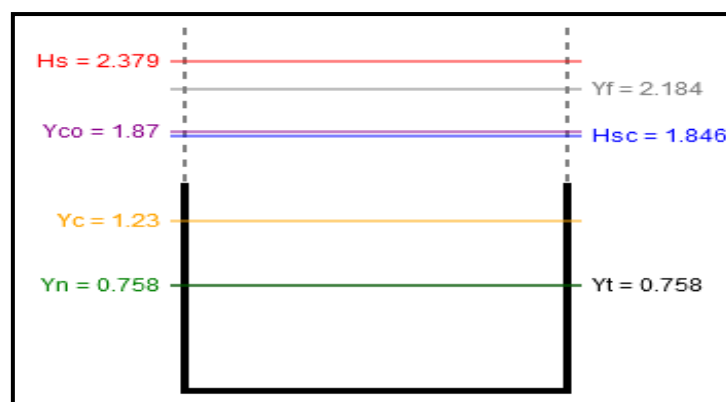


Figure.V.17.Schéma de l'ouvrage 03

- Le Quatrième ouvrage est l'aménagement d'un canal oueds Siadi (BV 04) en galerie de dimensions (3 x 2), évacuera un débit centennal de **14,37 m³/s**, avec une pente minimale de **1,48%**.

Les caractéristiques hydrauliques de cette galerie sont :

Tableau.V.7. Ouvrage 04 : Données de base

Type de section		
Choix du type de section	Rectangulaire	
Définition de la section rectangulaire		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Largeur au fond (m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="3"/>	
Caractéristiques du bief		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Coefficient de Strickler (m ^{1/3} s ⁻¹)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="70"/>	
Pente du fond (m/m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="0.0148"/>	
Hauteur de berge (m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="1"/>	
Caractéristiques hydrauliques		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Débit (m ³ /s)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="14.37"/>	
Tirant d'eau (m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="0.847"/>	
Paramètres de calcul		
Précision de calcul(m)		<input type="text" value="0.001"/>

Tableau.V.8. Ouvrage 04: Résultats des calculs

La charge spécifique (m)	2.477
La charge critique (m)	1.991
La largeur au miroir (m)	3.000
Le périmètre mouillé (m)	4.694
La surface mouillée (m ²)	2.541
Le rayon hydraulique (m)	0.541
La vitesse moyenne (m/s)	5.655
Le Froude	1.962
Le tirant d'eau critique (m)	1.327
Le tirant d'eau normal (m)	0.847
Le tirant d'eau fluvial (m)	2.245
Le tirant d'eau torrentiel (m)	0.847
Le tirant d'eau conjugué (m)	1.964
La perte de charge (m/m)	0.015
Variation linéaire de l'énergie spécifique (m/m)	0.000
Impulsion (N)	91 822.671
La force tractrice (Pa)	78.564

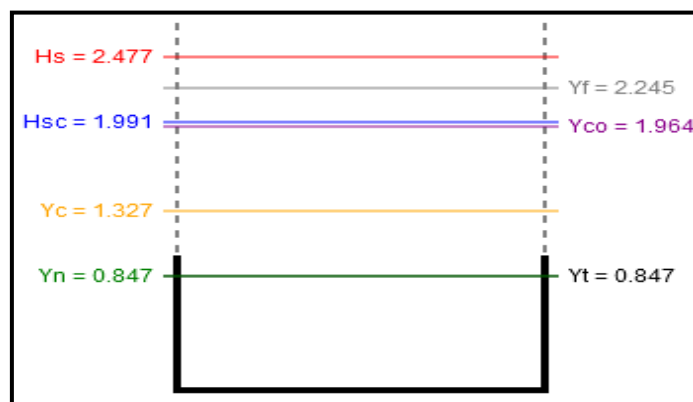


Figure.V.18.Schéma de l'ouvrage 04

✚ Le cinquième ouvrage est un canal ceinture des oueds Dissen et El-Houassi, se compose de deux parties :

La première partie est une galerie de dimensions (3 x 2), évacuera un débit centennal de **14,37 m³/s** (BV5 oued Dissen), avec une pente minimale de **1,48%**.

La deuxième partie est un canal trapézoïdale de dimensions (b = 3 ; B = 5 et H = 2m), évacuera un débit centennal de **22,24 m³/s** (BV 05 et BV 06 oued El-Houassi), avec une pente minimale de **1,10 %**.

Les caractéristiques hydrauliques de ce canal sont :

a/Partie rectangulaire (galerie 3 x 2) : Oued Dissen

Tableau.V.9.Ouvrage 5-1 : Données de base

Type de section		
Choix du type de section	Rectangulaire	
Définition de la section rectangulaire		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Largeur au fond (m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="3"/>	
Caractéristiques du bief		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Coefficient de Strickler (m ^{1/3} s ⁻¹)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="70"/>	
Pente du fond (m/m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="0.0148"/>	
Hauteur de berge (m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="1"/>	
Caractéristiques hydrauliques		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Débit (m ³ /s)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="14.37"/>	
Tirant d'eau (m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="text" value="0.847"/>	
Paramètres de calcul		
Précision de calcul(m)		<input type="text" value="0.001"/>

Tableau.V.10.Ouvrage 5-1 : Résultats des calculs

La charge spécifique (m)	2.477
La charge critique (m)	1.991
La largeur au miroir (m)	3.000
Le périmètre mouillé (m)	4.694
La surface mouillée (m ²)	2.541
Le rayon hydraulique (m)	0.541
La vitesse moyenne (m/s)	5.655
Le Froude	1.962
Le tirant d'eau critique (m)	1.327
Le tirant d'eau normal (m)	0.847
Le tirant d'eau fluvial (m)	2.245
Le tirant d'eau torrentiel (m)	0.847
Le tirant d'eau conjugué (m)	1.964
La perte de charge (m/m)	0.015
Variation linéaire de l'énergie spécifique (m/m)	0.000
Impulsion (N)	91 822.671
La force tractrice (Pa)	78.564

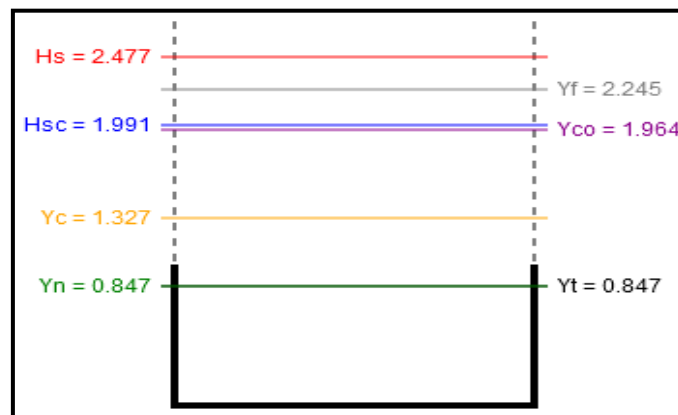


Figure.V.19. Schéma de l'ouvrage 5-1

b/ Partie trapézoïdale $b = 3,0$; $B = 5,0$ et $H = 2,0$ m : Oued El-Houassi

Tableau.V.11.Ouvrage 5-2 : Données de base

Type de section		
Choix du type de section	Trapézoïdale	
Définition de la section trapézoïdale		
		Paramètre fixé Paramètre à varier
Largeur au fond (m)	3	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Fruit des berges (m/m)	0.5	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Caractéristiques du bief		
		Paramètre fixé Paramètre à varier
Coefficient de Strickler ($m^{1/3}s^{-1}$)	70	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Pente du fond (m/m)	0.011	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Hauteur de berge (m)	2	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Caractéristiques hydrauliques		
		Paramètre fixé Paramètre à varier
Débit (m^3/s)	14.37	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Tirant d'eau (m)	0.824	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>
Paramètres de calcul		
Précision de calcul(m)	0.001	

Tableau.V.12. Ouvrage 5-2 : Résultats des calculs

La charge spécifique (m)	2.156
La charge critique (m)	1.762
La largeur au miroir (m)	3.824
Le périmètre mouillé (m)	4.843
La surface mouillée (m ²)	2.811
Le rayon hydraulique (m)	0.581
La vitesse moyenne (m/s)	5.111
Le Froude	1.903
Le tirant d'eau critique (m)	1.235
Le tirant d'eau normal (m)	0.824
Le tirant d'eau fluvial (m)	1.989
Le tirant d'eau torrentiel (m)	0.824
Le tirant d'eau conjugué (m)	1.752
La perte de charge (m/m)	0.011
Variation linéaire de l'énergie spécifique (m/m)	-0.000
Impulsion (N)	84 353.424
La force tractrice (Pa)	62.694

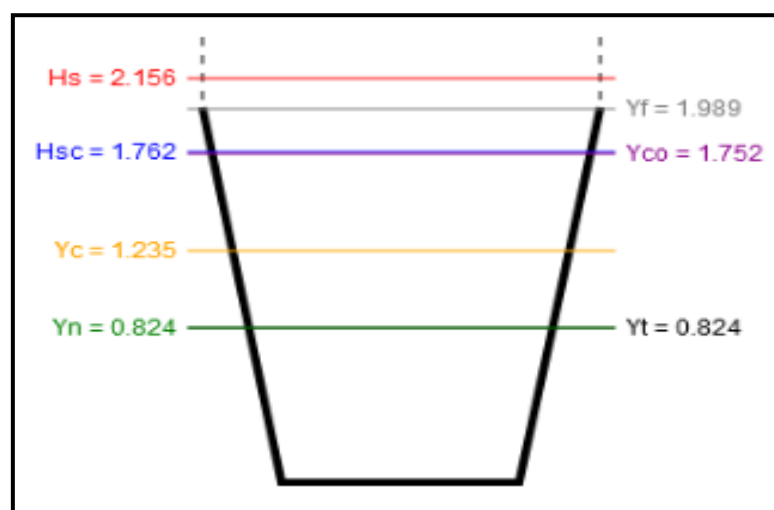


Figure.V.20. Schéma de l'ouvrage 5-2

V.6.Conclusion

Après cette analyse, nous constatons ce que suit :

- ✚ Les zones inondables sont importantes pour les deux crues décennale et centennale
- ✚ Les hauteurs d'eau sont importantes au niveau des oueds limitant la ville et faible dans le noyau aux niveaux du Rivers Af 04 et B03.
- ✚ Les vitesses sont importantes aux niveaux du Rivers Af 04 et B03.

Les aménagements projetés dans cette étude pour éviter de subir des inondations lors des crues dans la ville sont :

- ✚ Aménagement de oued Jar Ighiren drainant le sous bassin 1 limitant la ville du Nord-Est en galerie 2,5 x 1,5 m.
- ✚ Aménagement de oued Oued Ain Arous drainant le sous bassin 2 limitant la ville du Nord-Est (également) en canal trapézoïdal $b = 3$, $B = 6$ et $h = 3$.
- ✚ Prolongement des canaux trapézoïdaux existants drainant les sous bassins 03 Oued Siadi et 04 Oued Ain Foulis.
- ✚ Réalisation de deux collecteurs dans les allées principaux de la ville drainant les eaux du sous bassin 5-1 et 5-2 vers le réseau d'assainissement existant (les dimensions et les calculs hydrauliques dépend du réseau d'assainissement existant).
- ✚ Aménagement de oued Dissen drainant le sous bassin (6 et 5) limitant la ville du Sud-Ouest en galerie 3 x 2 m.

Après calculs hydrauliques, on peut conclure que ces ouvrages drainent les eaux des crues dans des bonnes conditions.

Conclusion générale

La synthèse des risques liés aux inondations dues aux débordements des cours d'eau est basée essentiellement sur trois principaux concepts : hydrologique, hydraulique et cartographique. L'hydrologie permet d'alimenter le modèle hydraulique par les conditions aux limites amont à l'aide d'hydrogrammes des crues fréquentielles et permet d'alimenter le coter socio-économique pour donner une mesure équivalente de la vulnérabilité. La composante hydraulique permet de faire une simulation nécessaire afin de déterminer l'aléa et de délimiter les zones inondables, chose nécessaire à la proposition des solutions à apporter au problème. Cette simulation ou l'écoulement à surface libre est décomposée en écoulement dans les canaux principaux et écoulement dans les plaines d'inondation actives.

Dans ce mémoire, notre recherche s'intéressait premièrement à appliquer une combinaison appropriée du modèles HEC-HMS et HEC-RAS aux sous bassins versants et à la de AIN TOUTA située dans la wilaya de BATNA, qui est très vulnérable aux inondations.

La modélisation des réponses hydrologiques des sous bassins en question a été faite en utilisant le modèle HEC-HMS et de sa combinaison modulaire configurée sous ARCGIS.

Ensuite le modèle HEC-RAS a été utilisé pour simuler les effets des débits de l'évènement (crue) produite par l'ensemble des sous bassins déjà déterminé par Hec Hms dans la ville.

Les aménagements que nous avons proposé dans le dernier chapitre de cette étude sont :

- ✚ Aménagement de oued Jar Ighiren drainant le sous bassin 1 limitant la ville du Nord-Est en galerie 2,5 x 1,5 m.
- ✚ Aménagement de oued Oued Ain Arous drainant le sous bassin 2 limitant la ville du Nord-Est (également) en canal trapézoïdal $b = 3$, $B = 6$ et $h = 3$.
- ✚ Prolongement des canaux trapézoïdaux existants drainant les sous bassins 03 Oued Siadi et 04 Oued Ain Foulis.
- ✚ Réalisation de deux collecteurs dans les allées principaux de la ville drainant les eaux du sous bassin 5-1 et 5-2 vers le réseau d'assainissement existant (les dimensions et les calculs hydrauliques dépend du réseau d'assainissement existant).
- ✚ Aménagement de oued Dissen drainant le sous bassin (6 et 5) limitant la ville du Sud-Ouest en galerie 3 x 2 m.

Après calculs hydrauliques, on peut conclure que ces ouvrages drainent les eaux des crues dans des bonnes conditions.

List Bibliographique

- [1] : LEDOUX, Bruno. « *La gestion du risque inondation* », 11 rue Lavoisier-Paris, Edition TEC et DOC, 2006.
- [2]: ANDRE, Musy. « Hydrologie générale », Bucarest, édition HGA, 1998
- [3] : Gilard, O. et Gendreau, N. « Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants. », Revue des sciences de l'eau, 429 – 444 P. 3 (1998).
- [4] : MERABET, « Protection de la ville de béni-ounif (BECHAR) contre les inondations application de logiciels HEC-HMS et HEC-RAS », 2006.
- [5] : BLIN, Pierrick. « Développement d'une nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation (crue) pour des résidences », Canada, Thèse de Grande de Maître Université du Québec, 2001.
- [6] : N'GAHANE, Pierre. « Service Interministériel de Défense et de Protection Civiles de la Préfecture des Alpes de Haute-Provence », Marseille, juillet 2009.
- [7] : Base de données internationale sur les catastrophes naturelles et technologiques (EM-DAT).
- [8] : (DGPC), Direction Générale du Protection Civil, Algérie, 2007.
- [9]: ANRH, Les données pluviométriques de la station de Batna.
- [10] : O.N.M, (office nationale de météorologie).
- [11]:TOUAIBIA.B ; Manuel pratique d'hydrologie, ENSH, Blida, Algérie. 2004.
- [12] : MEKKI ELYAKOUT, Etude de protection de ville Ain khadra contre inondation par logiciel HEC-RAS. Université Mohamed Boudiaf - M'sila ; Année universitaire ; 2016 /2017.
- [13] :CTH, Organisme national de contrôle technique de la construction Hydraulique.
- [14] :ALLOUACHE.A ; Cours hydrologie 3, BEN kadja, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2018.
- [15] :The Civil Engineering (Handbook ,Second ,Edition, de W.F. Chen et J.Y. Richard Liew .29 aout 2002.
- [16] :MESEK ABDELKADER, Modélisation pluie-débit des bassins versants de l'oued mina: application du modèlehydrologique HEC-HMS. Thèse de Magister Université de Mohamed Boudiaf U.S.T.O.
- [17] :HENINE Hocine,Interfaçage entre un modèle hydrologique / modèle hydrodynamiqueau sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG ,Thèse de Magister, ENP .
- [18]: FARDJOUI .N, Etude de protection de la ville Ain El melah contre inondation par logiciel HEC-RAS. Université Mohamed Boudiaf - M'sila ; Année universitaire ; 2017 /2018.

[19] : Le sol propriétés et fonctions ; Tome 2 ; phénomènes physiques et chimiques ; Application agronomique et environnementales *Raoul CALVET ; professeure Honoraire. Institut National Agronomique .Paris Grignon ; page 214.

[20] : Berghout , Ali. «MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS CERTAINS BASSINS VERSANTS DU NORD EST DE L'ALGERIE, Thèse de doctorat Université du Bejaia, 2017.

[21] : DJEBABLA.T et DEBABSIA.F,Utilisation combiné du logiciel HEC-RASet HEC-GEORAS pour la délimitation des zones inondables dans le sous bassin de Guelma (moyenne Seybouse). Mémoire de Mastre Université 08 Mai 1945 Guelma ;2017/2018.