

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 : TECHNOLOGIE
FILIERE : HYDRAULIQUE
OPTION : HYDRAULIQUE URBAINE

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

Par: Boudani Mohamed
Boulanouar Mohamed

Intitulé

**Cartographie des zones à risque d'inondations.
Cas du bassin versant de Boussellam
(Soummam)**

Soutenu devant le jury composé de:

HAMIDOU Mohamed	Université de M'sila	Examineur
ADJISSI Omar	Université de M'sila	Examineur
MOKHTARI Elhadj	Université de M'sila	Encadreur
ABDELKEBIR Brahim	Université de Guelma	Co-Encadreur

Année universitaire : 2020 /2021

Remerciement

A l'occasion de la rédaction de ce mémoire de fin d'étude nous tient particulièrement a remercié ALLAH de nous avoir accordé la foi, le courage, la volonté de continuer nos études, et d'effectuer ce modeste travail.

*Nos plus vifs remerciements tout d'abord à notre promoteur Monsieur **MOKHTARI EIHADJ**, pour avoir accepté de nous encadrer en ce sujet. Ainsi pour leur orientation, leurs judicieux conseils et leur disponibilité durant toute la période de notre travail.*

*Nous remercié notre Co-promoteur monsieur **ABDELKEBIR BRAHIM** pour leur information et leur conseils.*

J'adresse tous mes respects et mes remerciements à ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour l'élaboration de cette Étude et particulièrement à

A tous les enseignants del'Hydraulique qui ont contribués à ma formation.

Aux membres de jury qui ont bien voulue examiner mon travail.

Sans oublier de remercier tous nos amis et nos collègues de promotion Hydraulique.

Merci

Boudani Mohamed

Boulanouar Mohamed

DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à : Mes chers parents, que nulle dédicace ne peut exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aid, en témoignage de mon profond amour et grand sacrifice pour leurs. Mes chers frères : billal, hicham, abde elsallam et ritadj. Pour leur grand amour et leur soutien qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude. Mon très cher ami mohamed. Mes chers amis qui sans leur encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour. Et à toute ma famille et à tous ceux que j'aime

Boudani Mohamed

On consacrer ce modeste travail : A nous chère parents qui nous a soutenus moralement et financièrement à tracer notre voie. A nos frères et nos sœurs pour l'aide qu'ils nous ont apportées. A nos amies pour leurs conseils et leurs encouragements qui étaient pour nous un grand soutien. Surtout nafaâ A tous nos amis chacun de son nom. A tous nos collègues de group master hydraulique urbaine 2021 A tous nos enseignants. A tous ceux que j'aime et m'aiment.

Boulanouar Mohamed

Sommaire

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

Chapitre I. Généralités sur les inondations

I.1. Introduction générale	2
I.2 Le phénomène inondation	3
I.2.1 Quelques définitions	3
I.2.2 Le débit de la rivière	5
I.2.3 Le lit de la rivière	6
I.3. L'aléa inondation	8
I.3.1 La période de retour de crues	8
I.3.2 La hauteur et la durée de submersion	9
I.3.3 La vitesse du courant	9
I.3.4 Le volume de matière transportée	9
I.4 Le risque inondation	10
I.4.1 L'influence des facteurs anthropiques	10
I.4.2 Les atteintes aux hommes, aux biens et aux activités	11
I.4.3 Les atteintes à l'environnement	11
I.5. Conclusion	12

Chapitre II. Présentation de la région d'étude-

II.1. Introduction	13
II.2. Présentation de la zone d'étude	13
II.2.1. Situation géographique du bassin versant de la Boussellam	13
II.2.2. Relief et hydrographie du bassin versant	14
II.2.3. Situation climatique du bassin versant de Boussellam	15
II.2.4. Caractéristique morpho-métriques	17
II.2.5. Caractéristiques Hypsométriques (Altitudes)	19
II.2.6 Caractéristiques du réseau hydrographique	25
II.2.7. Géologie	29
II.2.8. Le couvert végétal	30
II.3. Conclusion	31

Chapitre III. Etude hydrologique du bassin versant

III.1.Introduction	32
III.2.Données disponibles des débits	32
III.3 Ajustement de la série des débits de pointe aux stations de boussemam suivant les lois de distribution	36
III.3.1 Ajustement suivant la loi de GUMBEL	36
III.3.1.1. Description théorique	36
III.3.1.2. Résultats pratiques	38
III.3.2 Ajustement suivant la loi de GALTON (Log Normale)	41
III.3.2.1. Description théorique	41
III.3.2.2. Résultats pratiques	42
III.4 Choix du modèle statistique adéquat pour les deux stations et sélection de la station représentative	45
III.4.4. Comparaison entre les deux lois d'ajustement	46
III.5.Hydrogramme de crue	46
III. 6Détermination du volume de la crue	51
III.7Conclusion	52

Chapitre IV. Cartographie des zones inondables par HEC RAS

IV.1. Introduction	53
IV.2. Dispositif et outils informatiques utilisées	53
IV.2.1. Arc GIS	54
IV.2.2 HecGeoRAS	56
IV.2.3HEC-RAS	59
IV.3. Application du logiciel HEC-RAS Cas non régime permanent 2D	63
IV.4.Les aménagements de protection contre les inondations	74
IV.5. Conclusion	76
Conclusion générale	77
Références bibliographiques	78

Liste des Tableaux

Tableau II.1. Températures moyennes mensuelles	15
Tableau II.2. Humidité relative (en %) enregistrée en 2003 Source : ONM	16
Tableau II.3. Vitesse mensuelle moyenne du vent (1994-2003)	16
Tableau II.4. Valeurs des précipitations mensuelles et annuelles des 26 stations du bassin versant de la Soummam	17
tableau hysométrique du bassin versant	19
Tableau II.5. L'indice global de pente.	23
Tableau II.6. Deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M	25
Tableau II.7. Caractéristiques morpho-métriques et hydrographiques de BV de la Bousselam	30
Tableau III.2.1 Débits max annuelles de station de FERMATOU	32
Tableau III.2.2 Débits max annuelles de station de BOUBIREK	34
Tableau III.2.3. Débits max annuelles de station de SIDI YAHIA	35
Tableau III.3.1 : Ajustement de la loi GUMBEL et GALTON de la station FERMATOU (150601)	38
Tableau III.3.2 Résultats du test Khi carré	39
Tableau III.3.3: Ajustement de la loi Gumbel et GALTON de la station BOUBIREK (150703)	39
Tableau III.3.4 Résultats du test Khi carré	40
Tableau III.3.5: Ajustement de la loi Gumbel et GALTON de la station SIDI YAHIA (150901)	40
Tableau III.3.6 Résultats du test Khi carré	41
Tableau III.3.7 Résultats du test Khi carré	43
Tableau III.3.8 Résultats du test Khi carré	43
Tableau III.3.9. Résultats du test Khi carré	44
Tableau III.4.1 Estimation des débits de pointe correspondants aux différentes périodes de retour d'après la station de Fermatou suivant la loi de GUMBEL	45
Tableau III.4.2 Estimation des débits de pointe correspondants aux différentes périodes de retour d'après la station de Boubirek suivant la loi de GUMBEL	45
Tableau III.4.3 Estimation des débits de pointe correspondants aux différentes périodes de retour d'après la station de Sidi Yahia suivant la loi de GUMBEL	46
Tableau III.5.1 Estimation des débits de pointe correspondants Hydrogrammes de crues	47

fréquentielles du sous BV FERMATOU

Tableau III.5.2 Estimation des débits de pointe correspondants Hydrogrammes de crues 48

fréquentielles du sous BV BOUBIREK

Tableau III.5.3 Estimation des débits de pointe correspondants Hydrogrammes de crues 50

fréquentielles du sous BV SIDI YAHIA

Tableau III.6.1 Estimation du volume de crue de l'Oued FERMATOU 51

Tableau III.6.2 Estimation du volume de crue de l'Oued BOUBIREK 52

Tableau III.6.3 Estimation du volume de crue de l'Oued SIDI YAHIA 52

Liste des figures

Figure I.1 Inondation par remontée de nappe	3
Figure I.2: : Embâcle sur un torren	4
Figure I.3 Les inondations littorales ou submersions marines	5
Figure I.4: Lits d'un cours d'eau	7
Figure I.5 : Le transport solide	10
Figure I.6 : Hydrogramme de crue	10
Figure II.1. Localisation géographique de la zone d'étude	14
Figure II.2. Réseau hydrographique du bassin versant de la Boussellam	14
Figure II.4. La courbe hypsométrique du bassin de Boussellam	20
Figure II.5. Carte Hypsométrique BV de Bousselam	20
Figure II.6. Carte de pentes du BV de la boussellam	22
Figure II.7. Réseau hydrographique et ses ordres du BV de Boussellam	26
Figure II.8. La ligne de drainage du bassin versant de la Boussellam	27
Figure II.9. Carte de végétation du bassin versant Boussellam	30
Figure III.2.1 La répartition max annuelle des débits de station de FERMATOU	33
Figure III.2.2 Variabilité chronologique des débits annuels de station de FERMATOU	33
Figure III.2.3 La répartition max annuelle des débits de station de BOUBIREK	34
Figure III.2.4 Variabilité chronologique des débits annuels de station de BOUBIREK	35
Figure III.2.5 La répartition max annuelle des débits de station de SIDI YAHIA	36
Figure III.2.6 Variabilité chronologique des débits annuels de station de SIDI YAHIA	36
Figure III.3.1 Ajustement à une loi de GUMBEL de station FERMATOU	38
Figure III.3.2 Ajustement à une loi de GUMBEL de station BOUBIREK	40
Figure III.3.3 Ajustement à une loi de GUMBEL de station SIDI YAHIA	41
Figure III.3.4 Ajustement à une loi de GALTON de station FERMATOU	42
Figure III.3.5 Ajustement à une loi de GALTON de station BOUBIREK	43
Figure III.3.6 Ajustement à une loi de GALTON de station SIDI YAHIA	44
Figure III.5.1 Hydrogramme de crue fréquentielle du sous BV FERMATOU	48
Figure III.5.2 Hydrogramme de crue fréquentielle du sous BV BOUBIREK	49
Figure III.5.3 Hydrogramme de crue fréquentielle du sous BV SIDI YAHIA	51
Figure IV.1. Représentation schématique du dispositif informatique utilisé	54
Figure IV.2. Interface de ArcMap	55
Figure IV.3. La barre générale d'outils	55

Figure IV.4.Interface de ArcCatalog	56
Figure IV.5. Interface de l'Arc Catalogue travers d'ArcMap	56
Figure IV.6. Interface de ArcToolbox	57
Figure IV.7.L'extension HecGeoRas sur l'interface ArcMap	58
Figure IV.8. Entités géométriques numérisées sur ArcMap à l'aide de l'extension Hec-GeoRas	58
Figure IV.9. Interface de HEC-RAS 5.0.3	59
Figure IV.10.Exemple de section avec une hauteur d'eau	59
Figure IV.11.Conservation de la charge entre deux sections (source : HEC-RAS)	61
Figure IV.12.Découpage de la section pour le calcul du frottement (source : HEC-RAS)	62
Figure IV.13.Petit volume de contrôle (source : HEC-RAS)	62
Figure IV.14.Système de référence spatiale	63
Figure IV.15.Nouveau terrain Couche	63
Figure IV.16.Mappeur RAS	64
Figure IV.17.Données géométriques	65
Figure IV.18.La zone de flux 2D et le maillage	65
Figure IV.19. Importation de l'image à partir la fenêtre géométrique	66
Figure IV.20. La ligne de délimitation en aval	67
Figure IV.21.Fenêtre de la simulation	68
Figure IV.22.L'élévation du plan d'eau T = 10 ans	69
Figure IV.23.Vitesse de l'écoulement T = 10 ans	69
Figure IV.24.Les lignes de courantT = 10 ans	70
Figure IV.25.La zone inondable de la ville Draa El MiaadT = 10 ans	70
Figure IV.26.L'élévation du plan d'eau T = 50 ans	71
Figure IV.27.Vitesse de l'écoulement T = 50 ans	71
Figure IV.28.Les lignes de courantT = 50 ans	72
Figure IV.29.La zone inondable de la ville Draa El Miaad T = 50 ans	72
Figure IV.30.L'élévation du plan d'eau T = 100 ans	73
Figure IV.31.Vitesse de l'écoulement T = 100 ans	73
Figure IV.32.Les lignes de courantT = 100 ans	74
Figure IV.33.La zone inondable de la ville Draa El Miaad T = 100 ans	74
Figure IV.34.Coupe type de digue	76

Introduction générale

Introduction générale

Les inondations sont un phénomène naturel qui se produit lorsque le niveau d'eau d'une rivière augmente; Pour dépasser le niveau de ses berges et les submerger, et plus l'écoulement de l'eau de la source au cours de la rivière est rapide, plus les crues sont importantes.

Les inondations constituent une menace pour les biens et les personnes dans la plupart des régions du monde. Caused plus de 50 % des catastrophes naturelles : en moyenne 20000 Nombre de décès/an dans le monde.

Le bassin versant de Boussellam, objet de notre étude, est parmi les zones les plus touchées par Le phénomène d'inondation se situe au Sud-est de grand bassin versant de la Soummam. L'objectif global de ce travail est d'appliquer le modèle HEC-RAS 1D et 2D, un Modèle de simulation hydraulique qui permet de définir les limites du champ Crues de référence issues d'une étude topographique destinée à décrire Géométrie du sol pour la mise à l'échelle de la structure de protection.

Réaliser un système qui permet de modéliser le processus de l'inondation à partir des prévisions météorologiques.

Faire une représentation cartographique de l'information sur cet aléa future qui permettra au décideur d'avoir une idée claire et précise sur le danger futur.

Proposer des ouvrages hydrauliques qui permettent la protection des aléas exposés aux inondations futures.

Le mémoire, ici présenté est composé de quatre chapitres :

Chapitre I. Généralités sur les inondations

Chapitre II. Présentation de la région d'étude ;

Chapitre III. Etude hydrologique ;

Chapitre IV. Cartographie des zones inondables par HEC RAS.

Chapitre I.

Généralités sur les inondations

Chapitre I. Généralités sur les inondations

I.1. Introduction générale

Les cours d'eau représentent, pour les riverains, à la fois une richesse et une menace. Cette dualité a longtemps été considérée comme globalement bénéfique, mais aujourd'hui il semble que cet équilibre se soit rompu. [1]

D'après les informations de l'International DisasterDatabase du Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres, les inondations sont au cours des deux dernières décennies au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde. Elles représentent 34% des catastrophes enregistrées à l'échelle mondiale entre 1990 et 2007. [2]

Pour réduire les dommages causés par les inondations et pour assurer la sécurité des biens et des personnes, il faut une parfaite identification des régions présentant le risque d'inondabilité et des facteurs favorisant ou amplifiant l'ampleur des dégâts et des pertes engendrées par ces catastrophes. La détermination des débits des crues du projet reste un outil précieux pour le dimensionnement des ouvrages de protection contre les inondations.

La protection contre le risque 'inondations' est une action importante pour le développement durable. Une protection appropriée contre les crues était, est et restera une condition fondamentale pour une société avertie. [3] Depuis toujours, l'homme a aménagé les cours d'eau et a développé des systèmes d'assainissement urbain et agricole afin de réduire les risques d'inondation. Les mesures prises pour une réduction de la vulnérabilité sont le plus souvent des mesures structurelles : réalisation d'endiguement, de recalibrage, de rectification, etc. Néanmoins, ces aménagements ont souvent des incidences perverses à l'aval.

L'Algérie est confrontée aux phénomènes des crues et d'inondations qui sont plus fréquents que les séismes. Ces phénomènes provoquent des catastrophes plus destructrices et occasionnent d'importants dégâts humains et matériels. Les exemples de Bab El Oued – Alger en 2001, de Sidi Bel Abbes en 2006, de Ghardaïa en 2008 et El Bayadh en 2001. [3]

De nombreuses recherches se sont donc attachées, depuis plus d'un siècle, à essayer de comprendre les processus de génération des débits et le fonctionnement du bassin versant qui représente l'entité hydrologique de production et de concentration des écoulements.

Le moyen, pour arriver à comprendre la génération des débits et à établir des simulations, est de remonter jusqu'à leurs causes premières qui sont les pluies.

I.2 Le phénomène inondation

I.2.1 Quelques définitions

I.2.1.1 L'inondation :

Est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau.

I.2.1.2. 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. [4]

On distingue trois types d'inondation :

I.2.1.2.1 La montée lente des eaux en région de plaine

Les inondations de plaine se produisent lorsque la rivière sort lentement de son lit mineur et inonde la plaine pendant une période relativement longue. La rivière occupe son lit moyen et éventuellement son lit majeur.

Après une ou plusieurs années pluvieuses, il arrive que la nappe affleure et qu'une inondation spontanée se produise : on parle d'inondation par remontée de nappe phréatique. Ce phénomène concerne particulièrement les terrains bas ou mal drainés. Sa dynamique lente perdure plusieurs semaines.[4]



Figure I.1: Inondation par remontée de nappe[5]

I.2.1.2.2 Formation rapide de crues torrentielles

Lorsque des précipitations intenses, telles des averses violentes, tombent sur tout un bassin versant, les eaux ruissellent et se concentrent rapidement dans le cours d'eau, engendrant des crues torrentielles brutales et violentes. Le cours d'eau transporte de grandes quantités de

sédiments et de flottants (bois morts, etc.), ce qui se traduit par une forte érosion du lit et un dépôt des matières transportées. Ces dernières peuvent former des barrages, appelés embâcles, qui, s'ils viennent à céder, libèrent une énorme vague pouvant être mortelle. [4]



Figure I.2: Embâcle sur un torrent[5]

I.2.1.2.3 Le ruissellement pluvial

L'imperméabilisation du sol par les aménagements (bâtiments, voiries, parkings, etc.) et par les pratiques culturales limite l'infiltration des précipitations et accentue le ruissellement. Ceci occasionne souvent la saturation et le refoulement du réseau d'assainissement des eaux pluviales. Il en résulte des écoulements plus ou moins importants et souvent rapides dans les rues. Au sens large, les inondations comprennent également les inondations par rupture d'ouvrages de protection (brèches dans les digues) et les inondations dans les estuaires. Ces dernières résultent de la conjonction de la crue des fleuves, de fortes marées et de situations dépressionnaires (régime de tempête). [4]



Figure I.3 : Les inondations littorales ou submersions marines (Source graphies / MEDD-DPPR)[5]

I.2.1.3 Un cas particulier : les laves torrentielles

Les laves torrentielles se forment dans le lit des torrents au cours d'une crue liquide, lorsqu'une grande quantité de matériaux meubles (éboulis, paquets de terre, etc.) y est mobilisable. Ces écoulements sont composés d'un pourcentage de matériaux solides supérieur à 50 %, de tailles variées, allant des matériaux fins jusqu'à de très gros blocs.

La lave torrentielle se comporte comme un fluide visqueux très dense, dans lequel les blocs paraissent flotter dans une pâte boueuse (mélange d'eau et de fins*). Elle a un pouvoir destructeur plus important qu'une crue torrentielle de débit équivalent, en raison de sa densité élevée, de la vitesse de déplacement (plusieurs km / h selon la pente du torrent) et de la quantité de matériaux charriés. Les blocs transportés peuvent atteindre plusieurs dizaines de tonnes. Lorsque la lave torrentielle survient, l'écoulement liquide du torrent s'arrête. Alternent alors des successions de bouchons (embâcles) et de coulées boueuses (débâcles) qui déferlent dans le lit du torrent. Par ailleurs, en raison des quantités de matériaux transportés, le colmatage du lit du torrent peut s'accompagner de divagations dans les zones urbanisées de fond de vallée, qui occupent les cônes de déjection torrentiels. [4]

I.2.2 Le débit de la rivière

I.2.2.1 La crue

La crue correspond à l'augmentation de la quantité d'eau qui s'écoule dans la rivière (débit) et peut concerner l'ensemble du lit majeur de la rivière. L'importance de l'inondation dépend de trois paramètres : la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la durée de la crue.

Ces paramètres sont conditionnés par les précipitations, l'état du bassin versant bassin versant et les caractéristiques du cours d'eau et les caractéristiques du cours d'eau (profondeur, largeur de la vallée, etc.). Ces caractéristiques naturelles peuvent être aggravées par la présence d'activités humaines. [4]

I. 2.2.2 L'étiage

Le débit d'étiage est le débit minimum d'un cours d'eau, observé sur un temps donné en période de basses eaux.

I.2.3 Le lit de la rivière

I.2.3.1 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).

I.2.3.2 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 kilomètres. Sa limite est celle des crues exceptionnelles.

On distingue deux types de zones :

- les zones d'écoulement, au voisinage du lit mineur ou des chenaux de crues, où le courant a une forte vitesse ;
- les zones d'expansion de crues ou de stockage des eaux, où la vitesse est faible. Ce stockage est fondamental, car il permet le laminage de la crue, c'est-à-dire la réduction du débit et de la vitesse de montée des eaux à l'aval. [4]

I.2.3.3 Le lit moyen

Sous certains climats, notamment méditerranéens, il peut être identifié 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 par la ripisylve, sur lequel s'écoulent les crues moyennes . [4]

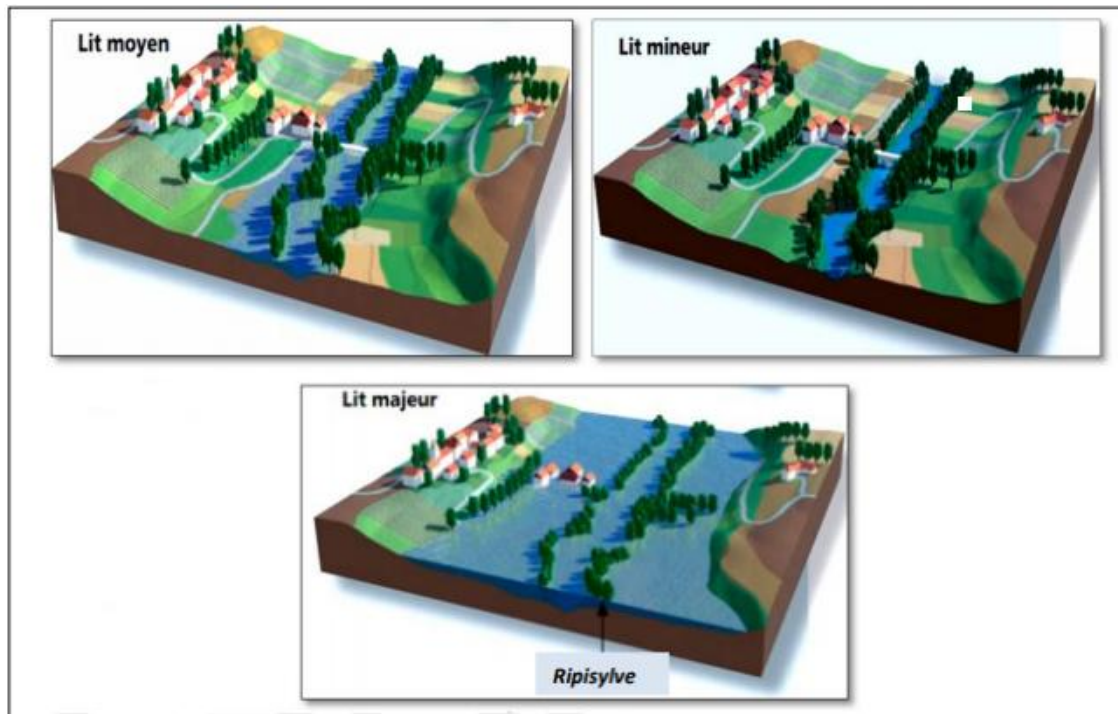


Figure I.4 : Lits d'un cours d'eau. (MEDD, 2004)

I.2.4 Le processus de formation des crues

Comprendre ce processus revient à analyser les différents facteurs concourant à la formation et à l'augmentation temporaire des débits d'un cours d'eau. En simplifiant, on distingue :

I.2.4.1 l'eau mobilisable

Constituée de l'eau reçue par le bassin versant.

I.2.4.2 le ruissellement

Qui correspond à la part de l'eau qui n'a pu s'infiltrer dans le sol. Il dépend de la nature du sol, de son occupation de surface et de l'intensité de l'épisode pluvieux.

I.2.4.3 le temps de concentration

Qui est défini par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau partant du point le plus éloigné de l'exutoire du bassin versant parvienne jusqu'à celui-ci. [5]

I.2.2.4 la propagation de l'onde de crue

Qui est fonction de la structure du lit et de la vallée alluviale, notamment de la pente et des caractéristiques du champ d'inondation.

I.2.3 L'influence des facteurs naturels

De nombreux paramètres influencent l'apparition d'une crue. Tout d'abord la quantité et surtout la répartition spatiale et temporelle des pluies, par rapport au bassin versant, sont

déterminantes. Il peut s'agir de pluies répétées et prolongées de régime océanique (celles affectant par exemple les grands bassins de la Loire ou de la Seine) ou d'averses intenses de courte durée, qui touchent de petits bassins versants.

La nature et l'occupation du sol dictent l'évaporation et la consommation d'eau par les plantes. L'absorption d'eau par le sol, l'infiltration dans le sous-sol ou le ruissellement influencent fortement le temps de concentration des eaux. Enfin, la topographie du lit, la pente et la forme du bassin versant jouent également. Ainsi, pour une même quantité de pluie, une crue apparaîtra ou non. À ces paramètres s'ajoutent des facteurs naturels aggravants, comme la formation et la rupture d'embâcles ou la fonte des neiges. Les matériaux flottants transportés par le courant peuvent en effet s'accumuler en amont des passages étroits. La rupture éventuelle de ces embâcles provoque une onde puissante et destructrice en aval. Concernant la fonte des neiges, il est rare en France que des crues importantes soient provoquées uniquement par ce phénomène, même s'il demeure un facteur aggravant. [4]

I.3. L'aléa inondation

Quatre paramètres principaux sont nécessaires pour qualifier l'aléa Inondation :

I.3.1 La période de retour de crues

On associe souvent à la notion de crue la notion de période de retour (crue décennale, centennale, millennale, etc.): plus cette période est grande, plus les débits et l'intensité sont importants. [4]

On distingue par ordre croissant :

I.3.1.1 les crues fréquentes

Dont la période de retour est comprise entre un et deux ans.

I.3.1.2 les crues moyennes

dont la période de retour est comprise entre dix et vingt ans.

I.3.1.3 les crues exceptionnelles

Dont la période de retour est de l'ordre de cent ans.

I.3.1.4 la crue maximale vraisemblable

Qui occupe l'intégralité du lit majeur.

Les événements les plus souvent représentés sur la carte d'aléa sont la crue décennale (Q10) et la crue centennale (Q100). L'aléa de référence servant de base à l'élaboration des documents réglementaires correspond à l'événement centennal ou au plus fort événement connu, s'il présente une fréquence supérieure à cent ans. [4]

I.3.2 La hauteur et la durée de submersion

La hauteur de submersion peut avoir un impact important sur le bâti, notamment lorsqu'elle dépasse la cote de référence. La structure porteuse de l'habitation peut être endommagée et les sols et murs gorgés d'eau. Lorsque la durée de submersion est importante (supérieure à 24 h voire 48 h), des problèmes sanitaires peuvent survenir, l'eau étant souvent sale, contaminée par les égouts ou parfois le mazout échappé des cuves. Pour l'homme, on considère généralement que des hauteurs d'eau supérieures à 50 cm sont dangereuses. À titre d'exemple, une voiture commence à flotter à partir de 30 cm d'eau. [4]

I.3.3 La vitesse du courant

La vitesse d'écoulement est conditionnée par la pente du lit et sa rugosité. Elle peut atteindre plusieurs mètres par seconde. La dangerosité de l'écoulement dépend du couple hauteur / vitesse. À titre d'exemple, à partir de 0,50 m / s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, avec un risque d'être emporté par le cours d'eau ou d'être blessé par des objets charriés à vive allure. [4]

I.3.4 Le volume de matière transportée

Ce volume est communément appelé « transport solide ». Il s'agit de matériaux (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs, etc.) se trouvant dans les cours d'eau, et dont le transport peut s'effectuer soit par suspension dans l'eau, soit par déplacement sur le fond du lit, du fait des forces liées au courant. Le terme de transport solide ne comprend pas le transport des flottants (bois morts...). Chacun des trois derniers paramètres a plus ou moins d'importance selon les caractéristiques morphodynamiques de la rivière. Par exemple, l'aléa inondation d'une rivière, dont la pente en long est faible (inférieure à 0,1 %) sera surtout caractérisé par la hauteur et la durée de submersion. L'aléa inondation d'une rivière torrentielle sera essentiellement caractérisé par une vitesse du courant élevé et un fort transport solide. [4]

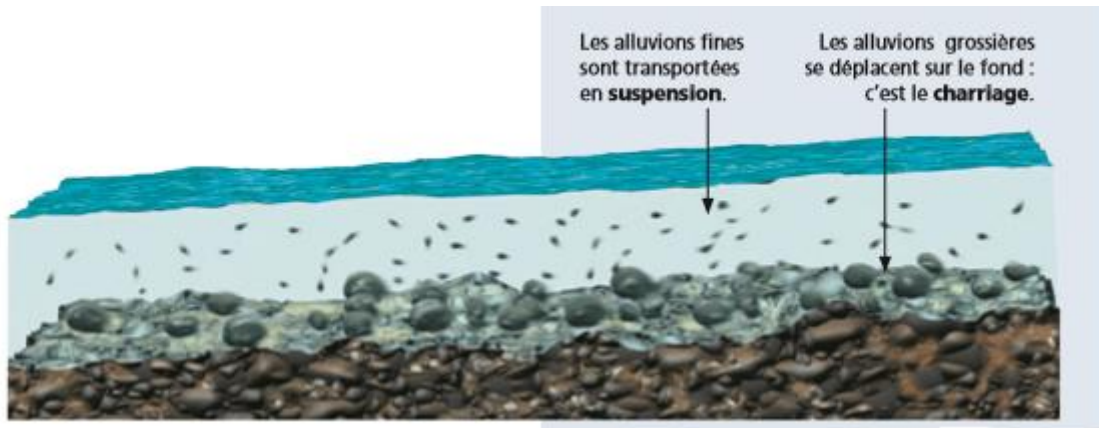


Figure I.5. Le transport solide

I.4 Le risque inondation

I.4.1 L'influence des facteurs anthropiques

Les facteurs anthropiques constituent des facteurs aggravants et ont un rôle fondamental dans la formation et l'augmentation des débits des cours d'eau.

I.4.1.1 L'urbanisation et l'implantation d'activités dans les zones inondables

Elles constituent la première cause d'aggravation du phénomène. En parallèle, l'augmentation du niveau de vie et le développement des réseaux d'infrastructures ont accru dans des proportions notables la valeur globale des biens et la fragilité des activités exposées (vulnérable).

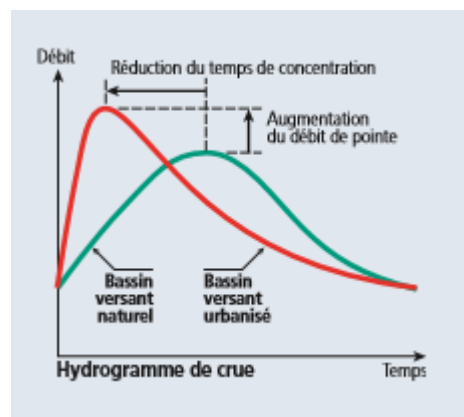


Figure I.6. Hydrogramme de crue

I.4.1.2 La diminution des champs d'expansion des crues

Consécutives à l'urbanisation et parfois aggravées par l'édification de digues ou de remblais, elle a pour conséquence une réduction de l'effet naturel d'écèlement des crues, bénéfique aux secteurs habités en aval des cours d'eau. [5]

I.4.1.3 L'aménagement parfois hasardeux des cours d'eau

Beaucoup de rivières ont été modifiées localement sans se soucier des conséquences en amont ou en aval. Ces aménagements (suppression de méandres, endiguement, ec.) peuvent avoir pour conséquences préjudiciables l'accélération de crues en aval et l'altération du milieu naturel.[4]

I.4.1.4 La défaillance des dispositifs de protection

Le rôle des dispositifs de protection (digues, déversoirs) peut être limité. Leur mauvaise utilisation et leur manque d'entretien peuvent parfois exposer davantage la plaine alluviale que si elle n'était pas protégée.[4]

I.4.1.5 L'utilisation ou l'occupation des sols sur les pentes des bassins versants

Toute modification de l'occupation du sol (déboisement, suppression des haies, pratiques agricoles, imperméabilisation) empêchant le laminage des crues et la pénétration des eaux, favorise une augmentation du ruissellement, un écoulement plus rapide et une concentration des eaux.[4]

I. 4.2 Les atteintes aux hommes, aux biens et aux activités

La vulnérabilité de la population est provoquée en particulier par sa localisation en zone inondable. Sa mise en danger survient surtout lorsque les délais d'alerte et d'évacuation sont trop courts ou inexistants, lors des crues rapides ou torrentielles. Le danger se traduit par le risque d'être emporté ou noyé, ainsi que par l'isolement sur des îlots coupés de tout accès. Lors des inondations du Sud-Est des dix dernières années, plus du tiers des victimes étaient des automobilistes surpris par la crue. L'interruption des communications peut gêner, voire empêcher l'intervention des secours. Par ailleurs, on estime que les dommages indirects (perte d'activité, chômage technique, etc.) sont souvent plus importants que les dommages directs occasionnés aux biens mobiliers et immobiliers.[4]

I.4.3 Les atteintes à l'environnement

Les dégâts au milieu naturel sont dus à l'érosion, aux déplacements du lit ordinaire, aux dépôts de matériaux, etc. Les phénomènes d'érosion, de charriage, de suspension de matériaux et d'alluvionnement participent à l'évolution du milieu naturel dans ces aspects positifs comme négatifs. Pour les zones industrielles situées en zone inondable, un risque de pollution et d'accident technologique est à prendre en compte.[4]

I.7. Conclusion

L'inondation est un risque prévisible dans son intensité, mais il est difficile de connaître le moment où elle se manifestera. Les paramètres concourant à la formation des crues sont nombreux, cependant l'un d'eux est déterminant : la pluie. La prévision des inondations consiste donc principalement en une observation continue des précipitations. Enfin, l'inondation est considérée comme un événement climatique extrême. Souvent qualifiée de risque naturel, elle est lourde de conséquences (pertes humaines, sociales, économiques et environnementales) tant pour les pays développés que pour les nations en développement bien que tous ne soient pas affectés de la même manière. La capacité à gérer l'impact de l'inondation varie également d'un pays, d'une région, d'une communauté et d'un groupe de population à l'autre. Dans tous les cas il est primordial de s'intéresser aux procédés de protection contre les inondations.

Chapitre II.

Présentation de la région d'étude

Chapitre II. Présentation de la région d'étude

II.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous avons traité d'une description générale du bassin versant de Boussellam afin de donner les indications géographiques, géomorphologiques, géologique et hydrogéologiques, bases indispensables à la compréhension future des mécanismes hydrologiques.

II.2.Présentation de la zone d'étude

II.2.1. Situation géographique du bassin versant de la Boussellam

L'oued Boussellam est le principal affluent du Soummam avec une longueur de 150 Km et une surface de 4100 Km² leur bassin est subdivisé en quatre sous bassin (le Boussellam amont (C/ 15 06, S/ 1785 Km²) celui de Boussellam moyen (C/ 15 07, S/1234 Km²) et El Main (C/ 15 08, S/930 Km²) et le Boussellam aval (C/ 15 09, S/1061 Km²). [1]

C : Code du sous bassin selon l'ABH, S : Surface du sous bassin.

Le sous bassin du Boussellam amont qui fait l'objet de cette étude contient 35 % de la surface du grand Boussellam (1785 Km²) de code 15 06 d'après l'Agence des Bassins Hydrographiques et une longueur de 65 Km, il est situé entre le grand bassin Constantinois à l'Est celui de Hodna au Sud et le sous bassin de Boussellam moyen à l'Ouest et il est limité au Nord par Dj. Medjounes, Dj Aissel, Dj Megris, et Dj Matriona, à l'Est par Kef Boudjemline, Dj. Merouane, Dj. Youssef, et Dj. Sekrine et au Sud par Dj. Hassane, Dj. Sattor, et Kef Della.

Le sous bassin du Boussellam amont s'étend sur les hauts plateaux sétifiennes avec une superficie de 1785 Km² et inscrit dans le territoire de la wilaya de Sétif elle est située au Nord-est de l'Algérie.

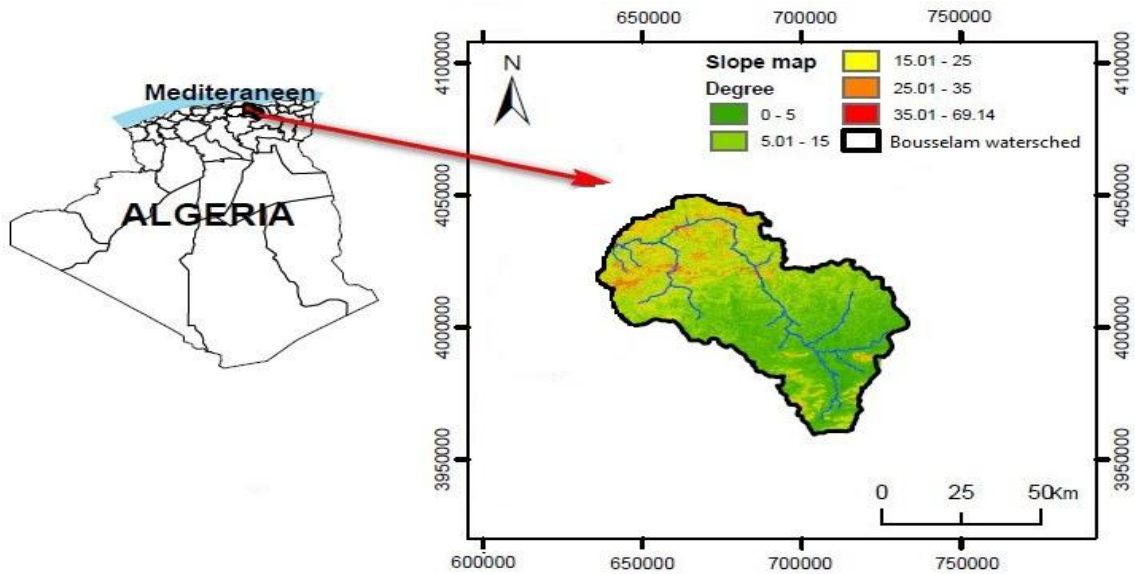


Figure II.1. Localisation géographique de la zone d'étude(Mokhtari, 2018)

II.2.2. Relief et hydrographie du bassin versant

La vallée de Boussellam recueille toute l'eau qui provient de la chaîne de montagnes Biban, qui appartient à la chaîne des collines de l'Atlas, qui est une ressource majeure pour la vallée. Elle est également en face du côté sud de la chaîne de montagnes Boutaleb, qui appartient à l'Atlas saharien. Chaîne de montagnes, qui est un séparateur entre le bassin d'Al-Huda et le bassin de Bou Salam, où il acquiert des plaines des plateaux. Et le haut aussi, avec une hauteur de (900-1000 m), est pris en sandwich entre les deux chaînes de montagnes vallonnées Et le désert est plus important Ses avantages sont des régressions très faibles. Un des phénomènes qui caractérise le bassin de la vallée du Boussellam est la présence de petits marais dans l'extrême sud.

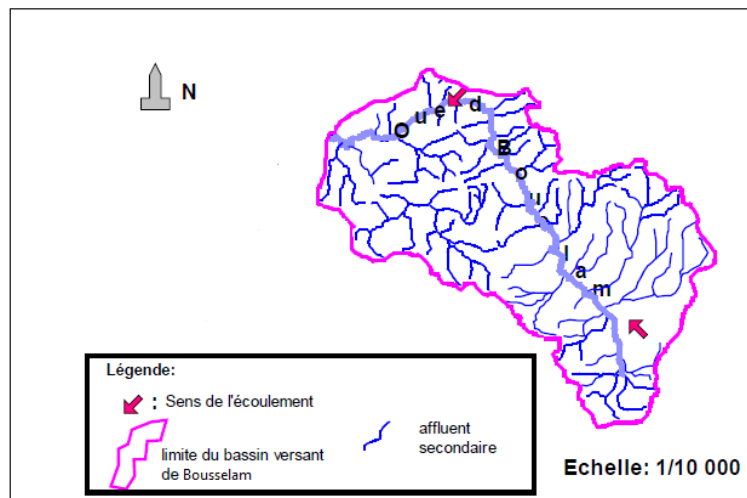


Figure II.2. Réseau hydrographique du bassin versant de la Boussellam

II.2.3. Situation climatique du bassin versant de Boussellam

Le climat peut être défini comme étant l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état de l'atmosphère et de son évolution en un lieu donné. Les principales composantes du climat sont : les précipitations, la température, le vent, et l'humidité relative.

II.2.3.1 Les précipitations

La pluviométrie dans le bassin de la Boussellam est déterminée grâce à l'existence de 12 stations pluviométriques représentatives prises en compte par l'ANRH dans le cadre du projet PNUD/ALG/88/021, pour l'étude de la pluviométrie de l'Algérie du Nord.

Le régime de la pluviométrie moyenne annuelle est connu grâce à l'interprétation de la carte pluviométrique à l'échelle 1/500 000 éditée par l'ANRH en 1993 dans le cadre du projet suscité.

II.2.3.2 Les températures

Le bassin de Boussellam est caractérisé généralement par deux saisons :

- ✚ Une saison chaude allant du mois de Juin au mois de Septembre.
- ✚ Une saison froide nettement plus longue, allant du mois d'Octobre au mois de mai.

Les valeurs de la température moyenne mensuelle enregistrées aux niveaux de 03 stations climatiques représentatives dans le bassin sont mentionnées dans le tableau II.1. La période d'observation est de 1993 à 2003.

Tableau II.1.Températures moyennes mensuelles

Station	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Béjaia	23.30	20.10	16.00	13.20	11.40	11.50	12.90	15.20	18.90	29.40	33.90	36.30
B.B.A	22.10	16.60	16.60	7.00	6.30	7.20	10.40	12.80	17.90	27.00	36.60	37.20
Sétif	20.30	15.70	9.80	6.40	5.40	6.20	9.40	11.60	17.70	29.80	35.40	36.10
Moy Mensuelle	21.90	17.47	14.13	8.87	7.70	8.30	10.90	13.20	18.17	28.73	35.30	36.53

D'après le tableau II.1, on peut constater que les mois les plus froids sont Décembre, Janvier et Février tandis que les mois les plus chauds sont Juillet et Août.

II.2.3.3L'humidité relative

D'une manière générale, le bassin de la Boussellam est caractérisé par une humidité élevée sur l'ensemble de son territoire à l'exception de la partie Est du bassin (Bordj Bou Arréridj-Sétif). Le tableau II .2 présente l'humidité relative des 3 stations.

Tableau II.2. Humidité relative (en %) enregistrée en 2003 Source : ONM[6]

Station	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fèv	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Béjaia	78	77	79	82	82	72	73	70	79	81	77	76
B.B.A	78	78	70	68	59	43	32	40	56	73	72	79
Sétif	83	82	73	71	65	49	38	43	64	73	78	86

L'examen du tableau ci-dessous montre que les moyennes mensuelles de l'humidité relatives sont plus élevées en hiver qu'en été; cela est certainement dû à la température plus élevée en été qu'en hiver. Les valeurs relativement grandes de l'humidité indiquent une grande possibilité de condensation de la vapeur, ce qui pourrait contribuer à l'amélioration du bilan hydrique en hiver par rapport à l'été.

II.2.3.4 Le vent

Le phénomène est habituellement accompagné d'une part d'une évaporation accentuée de la surface du sol et de la végétation et d'autre part du dessèchement du sol et de la couverture végétale. Des vents chauds et secs brûlent les champs de blé par suite d'une réduction d'humidité dans les plantes et de l'évaporation de la couche superficielle du sol.

Dans le bassin versant de la Bousselam est canalisé par les massifs montagneux voisins sa direction prédominante est nord-est et sud-ouest. (ONM)

Les moyennes mensuelles des vitesses du vent moyen sur dix ans sont données par le Tableau suivant :

Tableau II.3. Vitesse mensuelle moyenne du vent (1994-2003) [6]

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
V(m/s)	4,7	4,28	3,92	3,52	3,58	3,47	3,63	3,38	3,54	4,13	4,4	4,91

La vitesse du vent la plus faible a été enregistrée le mois d'aout de l'ordre de 3,38 m/s contrairement à la période hivernale où les vents sont froids et violents surtout dans le mois de décembre et janvier dont la vitesse du vent varie entre 4,91 et 4,7 m/s.

II.2.3.5 Pluviométrie

Le bassin de Bou Salam recueille une douzaine de stations pluviométriques ce qui nous permet de mesurer facilement le niveau d'eau dans la vallée de Bou Salam. Les précipitations minimales, de 300 à 400 mm par an en moyenne

Tableau II.4. Valeurs des précipitations mensuelles et annuelles des 26 stations du bassin versant de la Soummam

N°	Code station	Sept	oct	Nov	déc	janv	fév	mars	avril	mai	juin	Juil	aout	annu
1	150611	31,7	42,7	40,8	55,5	54,1	42,4	42,9	44,3	35,5	15,7	7,0	6,9	419
2	150613	38,9	36,6	53,8	76,8	72,6	53,8	54,3	48,7	42,2	20,0	4,5	15,3	517
3	150627	35,3	35,4	32,1	38,9	40,5	32,7	37,7	33,7	31,3	13,1	3,4	6,4	331
4	150702	27,6	29,1	39,6	70,7	58,9	53,8	50,2	46,4	36,7	15,6	5,7	8,2	442
5	150703	33,7	37,5	51,6	84,3	77,1	71,4	59,7	54,4	40,6	11,8	3,6	6,7	532
6	150707	30,6	25,1	34,1	43,2	36,5	34,7	38,3	43,9	41,5	19,5	7,9	13,3	368
7	150724	31,8	25,7	31,7	45,2	41,5	34,9	41,3	41,9	36,1	18,4	7,8	11,0	367
8	150801	29,8	25,4	32,6	34,0	37,3	26,9	34,4	38,6	35,2	17,9	4,0	10,6	326
9	150802	28,6	35,5	43,8	85,7	73,0	67,6	64,6	49,2	41,0	11,1	7,5	4,8	512
10	150807	28,2	35,4	42,7	58,2	57,7	47,6	50,7	48,8	45,2	14,0	4,6	7,6	440
11	150902	26,5	31,8	35,8	52,0	49,0	39,3	42,0	40,1	38,9	10,6	3,8	6,8	376
12	150904	24,7	27,9	38,6	58,0	52,8	44,9	37,4	35,9	31,5	9,2	5,0	8,1	373

II.2.4. Caractéristique morpho-métriques

II.2.4.1. Les caractéristiques de la disposition dans le plan

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. La surface du bassin versant peut-être mesurée par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre ou par des techniques de digitalisation (logiciel ArcGis ...). [6]

Dans notre cas, la surface du bassin versant de la Bouselam est égale à **4100 km²**.

II.2.4.1.1 Le périmètre (P)

Le périmètre du bassin versant est la longueur de la ligne de partage des eaux, il représente le contour limitant la surface du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré par un curvimètre ou par des techniques de digitalisation (logiciel Arc Gis ...).

Le périmètre du bassin versant de la Bouselam est égal à **325 km**.

II.2.4.1.2 La forme (KG)

L'indice de compacité de Gravelius (1914) KG, défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \dots \dots \dots (1)$$

Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle ayant la même surface du bassin **KG =1.42**(le bassin de la Bouselam est de forme allongée).

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydro-gramme à l'exutoire du bassin versant.

- ✚ 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.

II.2.4.1.3 Le rectangle équivalent

C'est une notion qui a été introduite par Roche (en 1963) qui permet de comparer facilement des bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. On suppose que l'écoulement sur un bassin donné est approximativement le même, à conditions climatologiques égales, que sur un rectangle de même superficie, ayant même coefficient de Gravelius et même répartition hypsométrique, étant entendu que la distribution des sols et de la végétation et la densité de drainage sont respectées dans les différentes aires comprises entre les courbes de niveaux. Il s'agit donc d'une transformation purement géométrique dans laquelle le contour du bassin devient un rectangle de même périmètre, les courbes de niveaux des droites parallèles aux petits côtés du rectangle et l'exutoire un des petits côtés du rectangle que nous avons appelé rectangle équivalent.

Soit l et L la largeur et la longueur du rectangle. P et A le périmètre et la surface du bassin versant. On a, d'après les définitions ci-dessus :

$P = 2 \cdot (L_{rec} + l_{rec})$, $A = L_{rec} \cdot l_{rec}$ et $K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$. En combinant ces 3 relations, on obtient respectivement L_{rec} et l_{rec} la longueur et la largeur du rectangle équivalent.

$$L_{rec} = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \dots \dots \dots (2)$$

$$L_{rec}=131.09 \text{ km}$$

$$l_{rec} = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \dots\dots\dots(3)$$

$$l_{rec} =31.28 \text{ km}$$

II.2.5. Caractéristiques Hypsométriques (Altitudes)

tableau hysométrique du bassin versant

Altitude	Si (Km2)	S cum(Km2)	S cum%	Dénivelée di	Ai	√ai*di	Hi (Km)	S*hi
1737-1600	6	6	0.146	137	0.001	0.448	1669	10011
1600-1400	30	36	0.878	200	0.009	1.325	1500	45000
1400-1200	228	264	6.439	200	0.064	3.589	1300	296400
1200-1000	1060	1324	32.293	200	0.323	8.037	1100	1166000
1000-800	1950	3274	79.854	200	0.799	12.638	900	1755000
800-600	458	3732	91.024	200	0.910	13.493	700	320600
600-400	284	4016	97.951	200	0.980	13.997	500	142000
400-210	84	4100	100	190	1.000	13.784	305	25620
	4100					67.31	Σ	3760631
							H5%	1320
							H95%	600
							H _{MOY}	917.3

La courbe hypsométrique

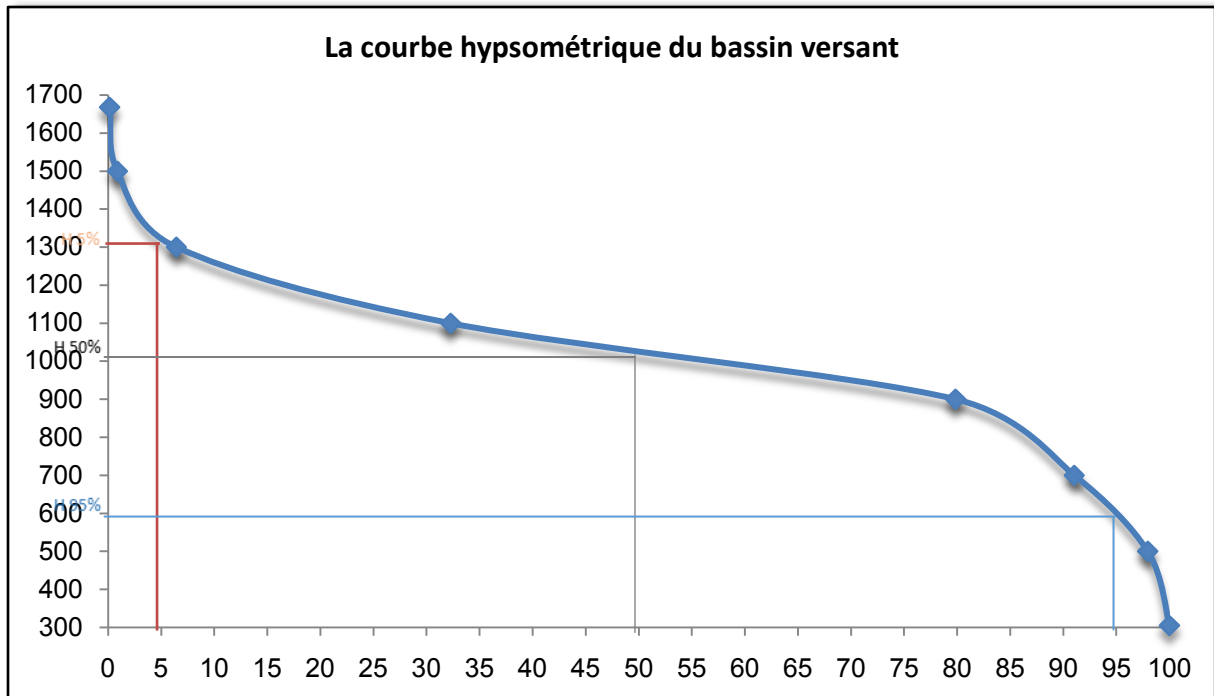


Figure II.4. La courbe hypsométrique du bassin de Boussellam

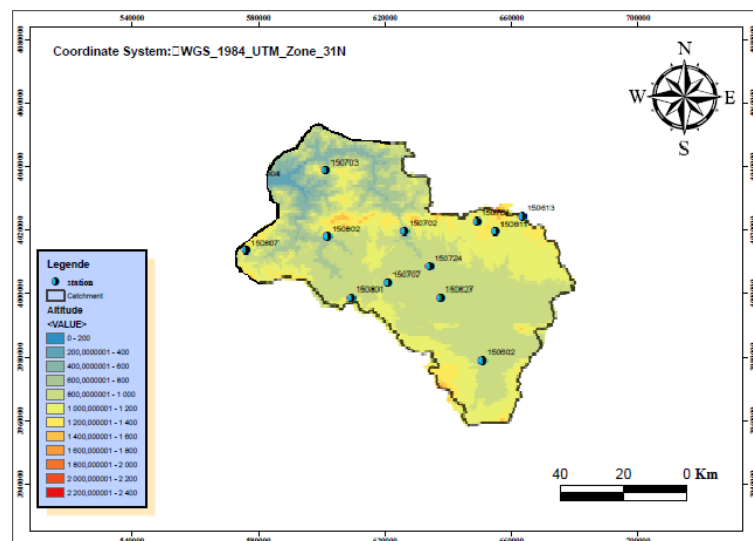


Figure II.5. Carte Hypsométrique BV de Boussellam

II.2.5.1 Les altitudes maximale et minimale (H_{max} et H_{min})

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire.

- ✚ L'altitude maximale=1737m.
- ✚ L'altitude minimale=210 m.

II.2.5.2 L'altitude moyenne (H_{moy})

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

$$H_{moy} = \sum_1^i \frac{A_i \cdot h_i}{A} \dots\dots\dots(4)$$

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].

H_{moy} du bassin versant de Bouselam égal à 917.3 m.

II.2.5.2 L'altitude médiane (H_{50%})

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

L'altitude médiane dans le bassin de Bouselam est égale à 1012 m.

II.2.5.3 La dénivelée simple (D)

On définit la "dénivelée D" comme étant la différence de côte entre H_{5%} et H_{95%} :

Celles –ci sont lues sur la courbe hypsométrique.

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \dots\dots\dots(5)$$

D=720 m

II.2.5.4 Les indices de pentes

L'objectif de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de permettre des comparaisons et des classifications.

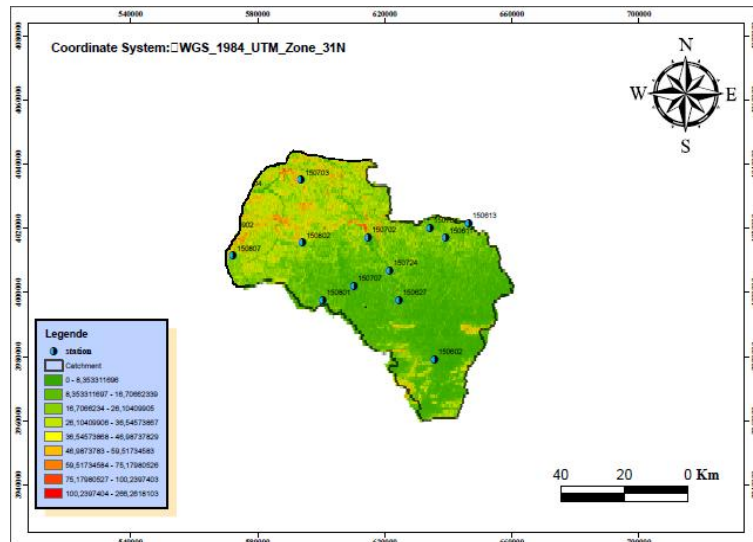


Figure II.6. Carte de pentes du BV de la boussellam

II.2.5.4.1 La pente moyenne du bassin versant (I_m)

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct - donc sur le temps de concentration t_c et influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne d'un bassin. Toutes se basent sur une lecture d'une carte topographique réelle ou approximative. La méthode proposée par Carlier et Leclerc (1964) consiste à calculer la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires comprises entre deux altitudes données. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$I_m = \frac{D.L}{A} \dots \dots \dots (6)$$

- ✚ **L** : longueur totale de courbes de niveau [km],
- ✚ **D** : équidistance entre deux courbes de niveau [m],
- ✚ **A** : surface du bassin versant [km²].

II.2.5.4.2 L'indice de pente Roche (I_p)

Cet indice se calcule à partir du rectangle équivalent. Il est égal à la somme des racines carrées des pentes moyennes de chacun des éléments pondérés par la surface intéressée, soit :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L_{rec}}} \sum_{i=1}^n \left(X_i \sqrt{\frac{d}{X_i}} \right) \dots \dots \dots (7)$$

Où :

- ✚ I_p : indice de pente [%],
 - ✚ L_{rec} : longueur du rectangle [m],
 - ✚ x_i : distance qui sépare deux courbes sur le rectangle [m] (la largeur du rectangle étant constante, cette distance est égale au facteur de pondération),
 - ✚ d : distance entre 2 courbes de niveau successives (peut être variable) [m],
- d/x_i : pente moyenne d'un élément [%].

II.2.5.4.3 Indice de pente globale (I_g)

L'indice de Roche étant cependant trop long à évaluer pour des études rapides, il a été proposé, par Laborde, un indice encore plus simple : la pente globale

$$I_g = \frac{D}{L_{rec}} \dots \dots \dots (8)$$

$$I_g = 4.88\%$$

Relief assez fort

Où :

- ✚ D : étant la dénivelée H5% - H95%, définie sur la courbe hypsométrique ou même directement à l'œil sur la carte topographique ;
- ✚ L : étant la longueur du rectangle équivalent.

Cet indice, très facile à calculer, est des plus utilisés. Il sert de base à une des classifications (O.R.S.T.O.M. actuellement IRD) pour des bassins versants dont la surface est dès l'ordre de 25 km² :

Tableau II.5. L'indice global de pente.

R1	Relief très faible	$I_g < 0,002$
R2	Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
R3	Relief assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
R4	Relief modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
R5	Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
R6	Relief fort	$0,05 < I_g < 0,1$
R7	Relief très fort	$0,1 < I_g$

II.2.5.5 Dénivelée spécifique (Ds)

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

L'indice I_g décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes.

La dénivelée spécifique D_s ne présente pas cet inconvénient : elle dérive de la pente globale I_g en la corrigeant de l'effet de surface admis étant inversement proportionnel à A :

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} = \frac{D}{L} \sqrt{L \cdot l} = D \sqrt{\frac{l}{L}} \dots \dots \dots (9)$$

$$D_s = 312.2 \text{ m}$$

Relief fort

La dénivelée spécifique ne dépend donc que de l'hypsométrie ($D = H5\% - H95\%$) et de la forme du bassin (l/L). Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins.

Tableau II.6. Deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M

R1	Relief très faible	$D_s < 10 \text{ m}$
R2	Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$
R3	Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$
R4	Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$
R5	Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$
R6	Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$
R7	Relief très fort	$D_s > 500 \text{ m}$

II.2.6 Caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué de l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant. La définition d'un cours d'eau est difficile à donner avec précision, en particulier pour les cours d'eau temporaires. Selon le support cartographique utilisé, on étudiera le réseau avec plus ou moins de détails : en photographie aérienne, on pourra déceler des thalwegs de très faibles extensions, tandis qu'on ne verra que les cours d'eau pérennes et importants sur une carte au 1/100 000ème.

L'étude du chevelu hydrographique servant surtout à comparer des bassins entre eux, il suffit, dans la plupart des cas, de se fixer une définition du thalweg élémentaire et de l'appliquer pour l'étude de tous les bassins (par exemple : thalwegs = traits bleus temporaires ou pérennes sur carte I.G.N. au 1/50 000ème).

Le réseau hydrographique peut se caractériser par trois éléments : sa hiérarchisation, son développement (nombres et longueurs des cours d'eau) et son profil en long.

II.2.6.1 Hiérarchisation du réseau (Ordre du bassin versant)

Pour chiffrer la ramification du réseau, chaque cours d'eau reçoit un numéro fonction de son importance. Cette numérotation, appelée ordre du cours d'eau, diffère selon les auteurs. Parmi toutes ces classifications, nous adopterons celle de Strehler :

- ✚ Tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1,
- ✚ Au confluent de deux cours d'eau de même ordre n , le cours d'eau résultant est d'ordre $n+1$,
- ✚ Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre, ce qui se résume par : $n + n = n + 1$ et $n + m = \max (n.m)$.

A l'aide de logiciel Arc Gis, le bassin de Boussellam est d'ordre 7.

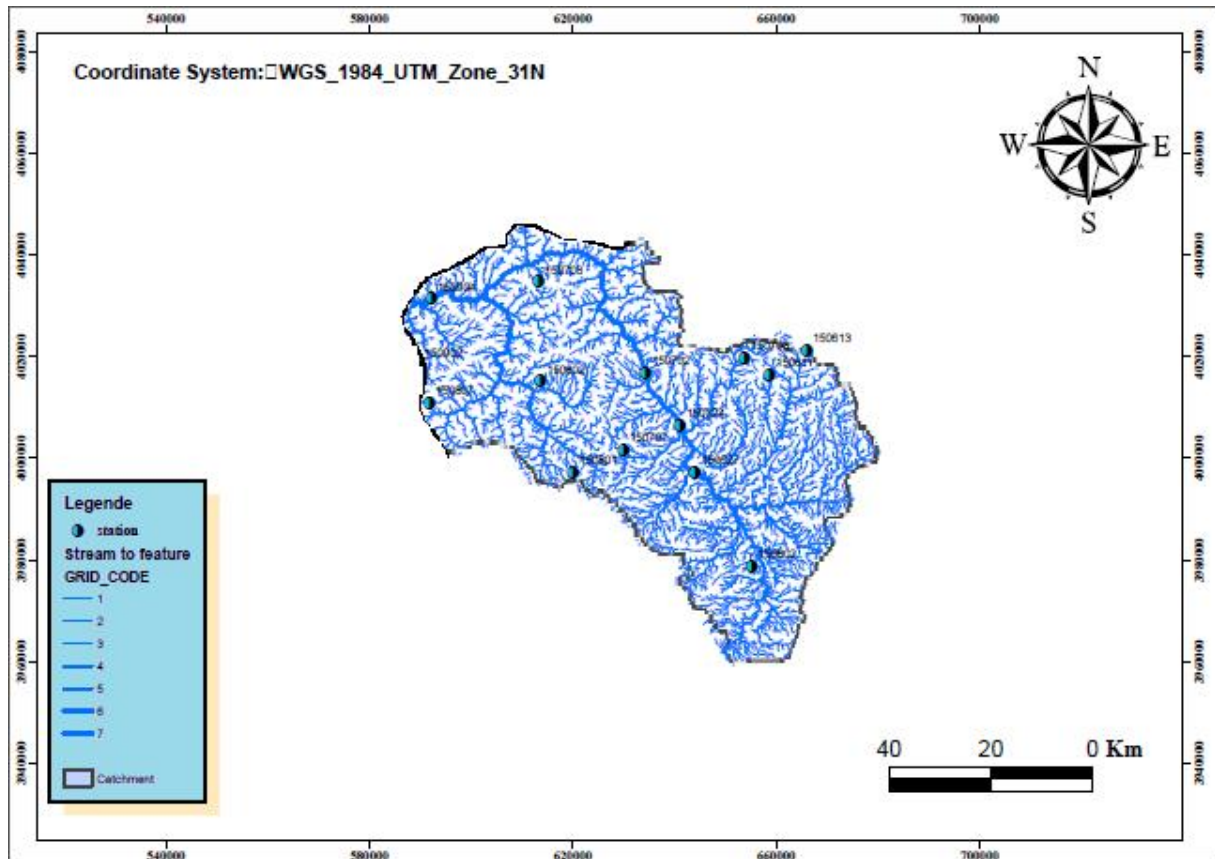


Figure II.7. Réseau hydrographique et ses ordres du BV de Boussellam

II.2.6.2 Pente moyenne Brute du cours d'eau principale

La pente moyenne d'un cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Le calcul des pentes moyennes et partielles du 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 pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L} \dots \dots \dots (10)$$

- ✚ P_{moy} : Pente moyenne du cours d'eau (m /km).
- ✚ ΔH_{max} : Dénivellation maximale de la rivière (m) (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire).
- ✚ L : longueur du cours d'eau principal (km).

II.2.6.3 Longueur du cours d'eau principal

La longueur du cours d'eau principal (L) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant.

$$L=152 \text{ km}$$

II.2.6.3.1 Densité de drainage

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

$$Dd = \frac{\sum L_i}{A} \dots \dots \dots (11)$$

$$Dd=1.40 \text{ Km/Km}^2$$

- ✚ **Dd** : Densité de drainage (km/km²).
- ✚ **Li** : Longueur des cours d'eau (km).
- ✚ **A** : Surface du bassin versant (km²).

La densité de drainage au niveau de Boussem est égale à **1.40 Km/Km²**

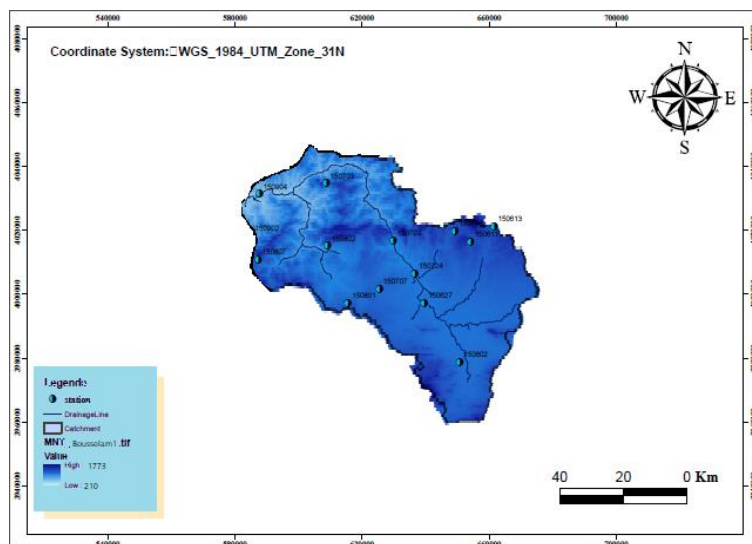


Figure II.8. La ligne de drainage du bassin versant de la Boussem

II.2.6.3.2 Constante de stabilité du cours d'eau

Selon SHUMM, la valeur inverse de la densité de drainage est constante de stabilité du cours d'eau.

$$C = \frac{1}{Dd} \dots \dots \dots (12)$$

$$C=0,714 \text{ Km}$$

II.2.6.3.3 Densité hydrographique

Représente le nombre des cours d'eau par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N_i}{A} \dots \dots \dots (13)$$

$$F=1.32 \text{ Km}^{-2}$$

Ou :

- **F** : densité hydrographique (km⁻²).
- **N_i** : nombre des cours d'eau.
- **A** : Surface du bassin (km²)

II.2.6.3.4 Rapport de confluence

C'est le rapport du nombre de thalwegs d'ordre x et de celui des thalwegs d'ordre immédiatement supérieur (x₊₁). Il est donné par la relation suivante :

$$R_c = \frac{N_x}{N_{x+1}} \dots \dots \dots (14)$$

✚ **R_c** : Rapport de confluence des cours d'eau.

✚ **N_i** : Nombre des cours d'eau d'ordre i.

II.2.6.3.5 Coefficient de Torrentialité

C'est le rapport entre la fréquence des cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage.

$$C_t = Dd * F \dots \dots \dots (15)$$

$$C_t = 1.848 \text{ km}^{-3}$$

Cette valeur traduit que le bassin ne représente pas des caractéristiques morphométriques adapté à l'écoulement, ainsi qu'il est constitué par des formations perméables dont l'infiltration est importante.

II.2.6.4 Temps de concentration

An cas des bassins versant non jaugés, le temps de concentration représente la durée que met une goutte d'eau de ruissellement du point le plus élevé au point représentant l'exutoire du bassin versant.

Le temps de concentration est déterminé par Les formules morpo-métriques suivantes :

✚ **Formule de GIANDOTTI :**

$$T_c = \frac{4\sqrt{A}+1.5L_{cp}}{0.8\sqrt{H_{moy}-H_{min}}}\dots\dots\dots(16)$$

Tc=22.75 h

II.2.6.5 Vitesse d'écoulement de l'eau :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_e = \frac{L}{T_c}\dots\dots\dots(17)$$

- ✚ **Ve:** Vitesse d'écoulement de l'eau (Km /h).
- ✚ **L :** Longueur des cours d'eau principale en (km).
- ✚ **Tc :** temps de concentration en(h).

Ve=6.68km /h

II.2.7.Géologie

Le bassin versant de la Bousselam est un bassin structurel et stratégique complexe formé pendant l'ère mésozoïque et au début du tertiaire.

Les formations dans la vallée comporte une épaisse de roches sédimentaire, pendant la période jurassique, quelque argilites ont été déposées. Le bassin repose sur les formations qui sont à découvert dans les parties les plus élevées de la vallée.

Ces régions ont subies une forte érosion pendant la fin du tertiaire et l'époque quartenaire.

II.2.8. Le couvert végétal

Dans une optique hydrologique, le couvert végétal d'un bassin versant agit sur trois processus : le ruissellement, l'infiltration et l'érosion. Si le rôle de la végétation vis-à-vis du ruissellement et de l'infiltration est souvent opposé, il demeure décisif vis-à-vis de l'érosion hydrique. En particulier, sur les terrains des versants mal protégés ou nus, source principale d'alimentation de la charge solide des cours d'eau.

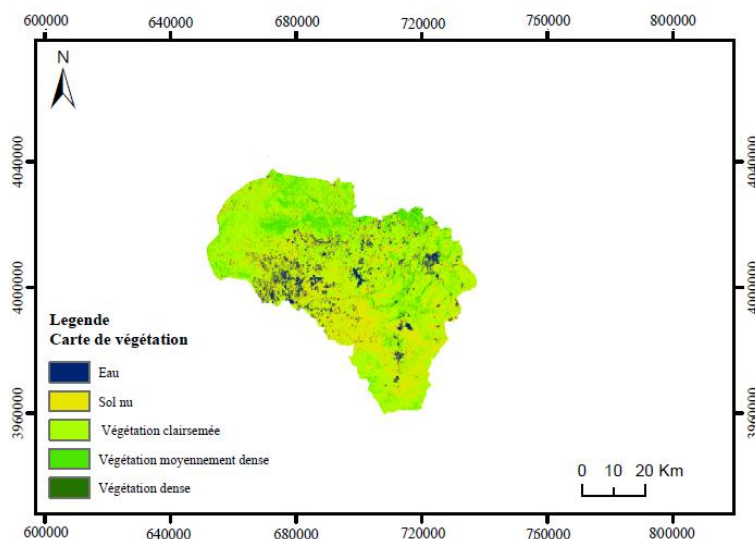


Figure II.9. Carte de végétation du bassin versant Boussellam (Mokhtari et Berghout, 2019)

Tableau II.7. Caractéristiques morpho-métriques et hydrographiques de BV de la Boussellam

Paramètres		Symboles	Unités	Résultats
Caractéristiques morpho-métriques	La Surface	A	(Km ²)	4100
	Le Périmètre	P	(Km)	325
	L'indice de compacité de Gravelius	K _G	(-)	1.42
	La longueur du rectangle équivalent	L _{rec}	(Km)	131.09
	La largeur du rectangle équivalent	l _{rec}	(Km)	31.28
	Le rapport de confluence	R _C	(-)	-
Caractéristiques du relief	L'altitude maximale	H _{max}	(m)	1737
	L'altitude minimale	H _{min}	(m)	210
	L'altitude moyenne	H _{moy}	(m)	917.3
	L'altitude à 5%	H _{5%}	(m)	1320
	L'altitude à 95%	H _{95%}	(m)	600
	L'altitude à 50%	H _{50%}	(m)	1012

	La dénivelée simple	D	(m)	720
	La dénivelée spécifique	D_s	(m)	312.2
	L'indice de pente globale	I_g	(%)	4.88
	L'indice de pente roche	I_p	(%)	-
	Pente moyenne Brute du cours d'eau principale	P_{moy}	(%)	23,96
Caractéristiques hydrographiques	Longueurs du cours d'eau	ΣL_i	(Km)	5393
	La densité de drainage	D_d	Km/Km ²	1.4
	Densité Hydro-graphique	F	(Km ²)	1.32
	Coefficient de Torrentialité	C_t	(Km/Km ⁴)	1.848
	Longueur du cours d'eau principale	L_{cp}	(Km)	152
	Temps de concentration	T_c	(h)	22.75
	Vitesse d'écoulement de l'eau	V_e	(Km/h)	6.68

III. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons été amenés à extraire le bassin versant en question, et à déduire sa caractéristique géomorphologique et hydrométrique, à partir d'un modèle numérique de terrain. L'évaluation de ces paramètres qui intervenant dans le comportement hydrologiques du bassin versant de la Boussellam nous permis d'obtenir les résultats suivants :

La surface de la Boussellam est égale à **4100 Km²** et un périmètre de **325Km** .Sa forme allongé avec un relief assez fort, pour une altitude moyenne de **917.3 m**, le réseau hydrographique du bassin est caractérisé par un cours d'eau principale long de **152 Km** correspondant à un ordre **7**, un temps de concentration égale à **22.75 h** et une vitesse de ruissèlement de **6.68 Km /h**.

Chapitre III.

Etude hydrologique du bassin versant

Chapitre III. Etude hydrologique du bassin versant

III.1.Introduction

L'objectif de toute étude hydrologique est de déterminer pour un bassin versant donné 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, l'utilisation d'un modèle de calcul des débits et d'estimation des eaux à l'échelle d'un bassin versant devient nécessaire.

III.2.Données disponibles des débits

Les données ANRH de les stations de bassin versant bousselam ont été utilisées. La série de débit maximale annuelle étudiée s'étend de 1953 à 1973, soit 39 années hydrologiques ce qui permet une plus adéquate analyse statistique des débits maximaux annuelle génératrices de crues. La figure (III.2) montre la chronologie annuelle des Q_{jmax} .

III.2.1station de FERMATOU

Tableau III.2.1 Débits max annuelles de station de FERMATOU

Station	FERMATOU		
Code	150601		
Année	Q max (m ³ /s)	Année	Q max (m ³ /s)
1969 – 1970	12.10	1983 - 1984	63.96
1970 – 1971	5.91	1984 - 1985	71.52
1971 – 1972	19.70	1985 - 1986	19.70
1972 – 1973	63.96	1986 - 1987	66.12
1973 – 1974	84.00	1987 - 1988	0.95
1974 – 1975	14.80	1988 - 1989	65.16
1975 – 1976	86.48	1989 - 1990	2.76
1976 – 1977	20.70	1990 - 1991	236.20
1977 – 1978	13.90	1991 - 1992	29.80
1978 – 1979	33.46	1992 – 1993	5.30
1979 – 1980	50.92	1993 - 1994	3.25
1980 – 1981	4.85	1994 - 1995	0.59
1981 – 1982	68.28	1995 - 1996	0.50
1982 – 1983	35.98	1996 - 1997	0.059

L'histogramme à la figure (III.2.1) montre la variation annuelle des débits maximales. On note une augmentation de débit del'année 1990.

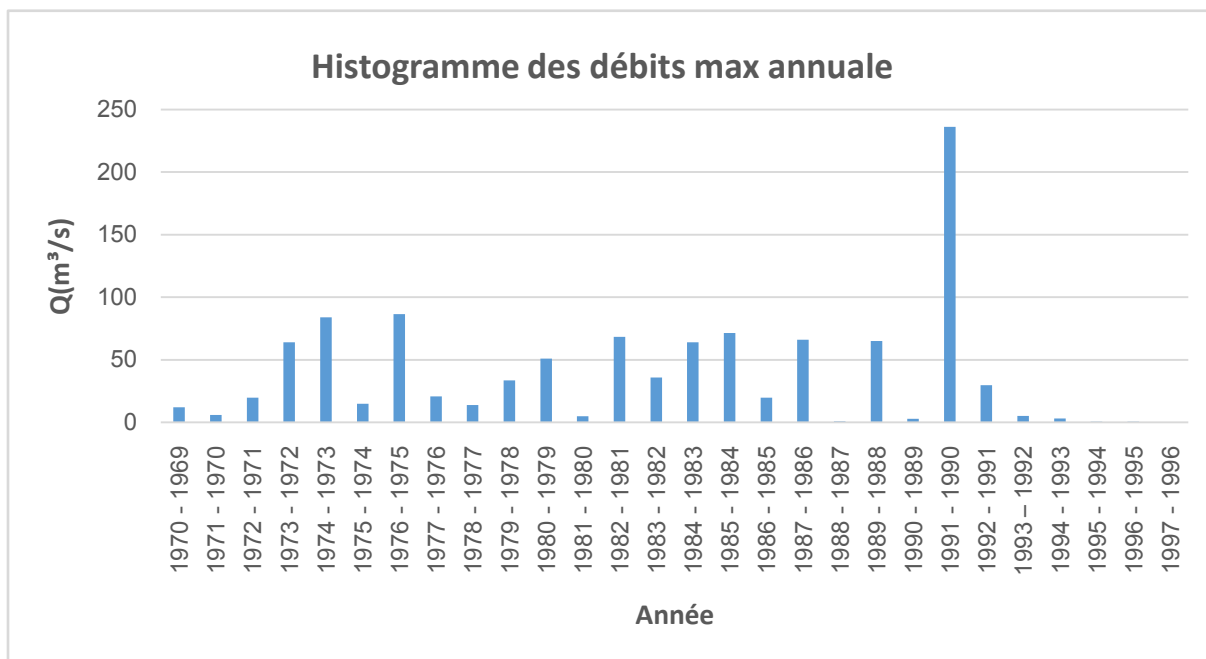


Figure III.2.1 La répartition max annuelle des débitsde station de FERMATOU

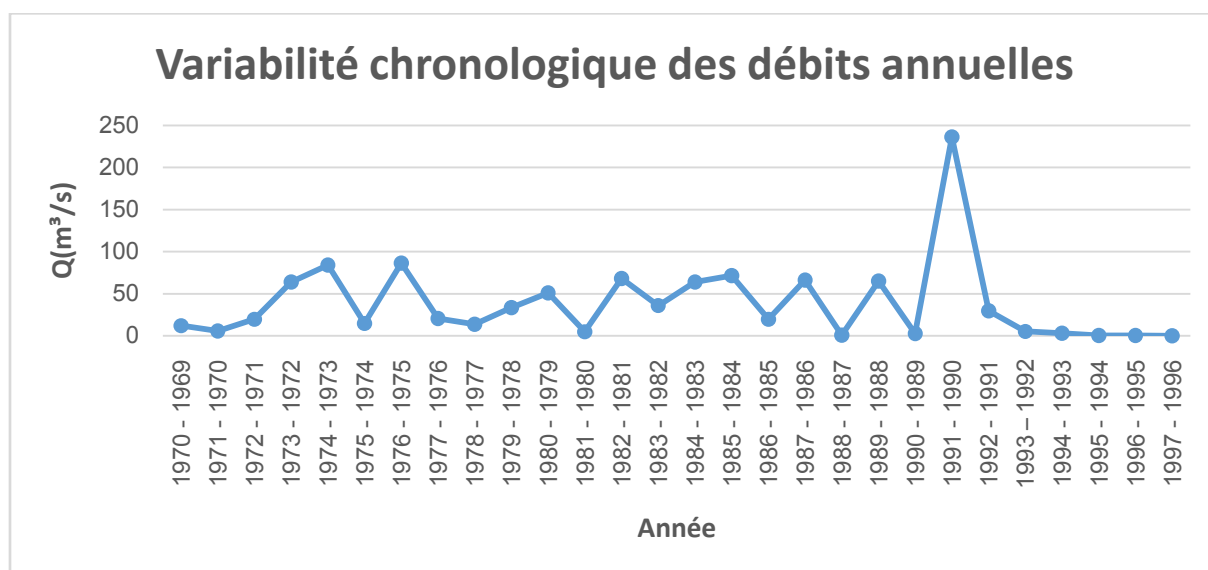


Figure III.2.2Variabilité chronologique des débits annuelsde station de FERMATOU

III.2.2 station de BOUBIREK

Tableau III.2.2 Débits max annuelles de station de BOUBIREK

Station	BOUBIREK		
Code	150703		
Année	Q max (m ³ /s)	Année	Q max (m ³ /s)
1969 - 1970	586.00	1987 - 1988	32.44
1970 - 1971	145.20	1988 - 1989	280.80
1971 - 1972	185.60	1989 - 1990	28.98
1972 - 1973	208.00	1990 - 1991	34.36
1973 - 1974	652.00	1991 - 1992	28.98
1974 - 1975	120.85	1992 - 1993	25.69
1975 - 1976	368.00	1993 - 1994	13.60
1976 - 1977	155.17	1994 - 1995	62.80
1977 - 1978	114.40	1995 - 1996	70.00
1978 - 1979	52.50	1996 - 1997	7.60
1979 - 1980	168.00	1997 - 1998	94.00
1980 - 1981	168.00	1998 - 1999	70.00
1981 - 1982	196.80	1999 - 2000	37.00
1982 - 1983	346.00	2000 - 2001	79.60
1983 - 1984	298.70	2001 - 2002	10.80
1984 - 1985	195.20	2002 - 2003	388.80
1985 - 1986	192.00	2003 - 2004	134.50
1986 - 1987	86.68	2004 - 2005	131.80

L'histogramme à la figure (III.2.3) montre la variation annuelle des débits maximaux. On note une augmentation des débits de l'année 1969 et 1973.

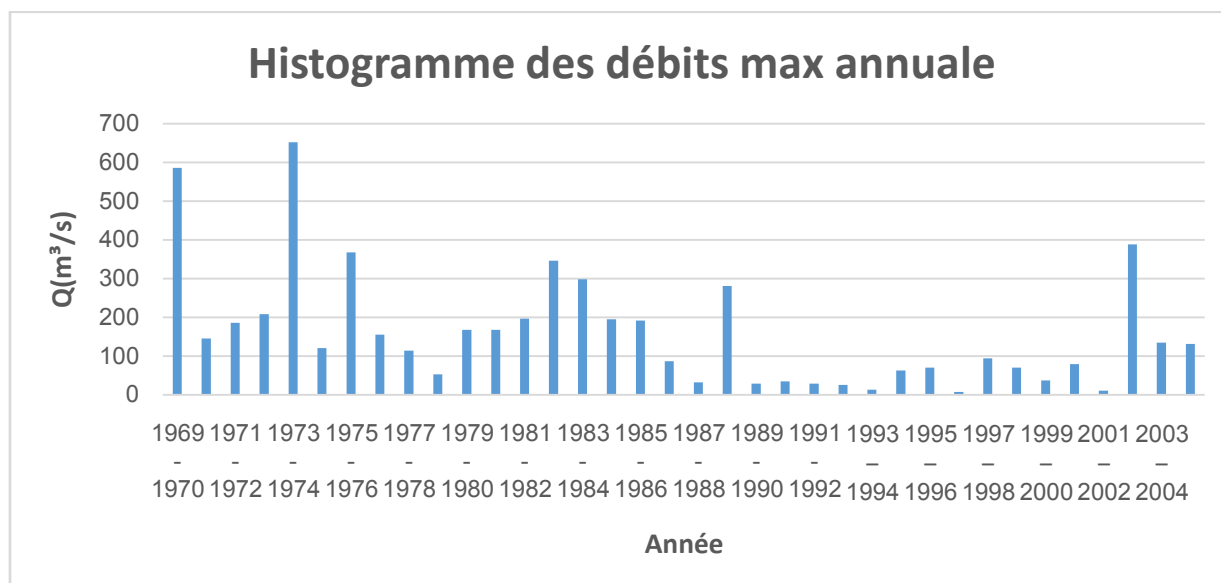


Figure III.2.3 La répartition max annuelle des débits de station de BOUBIREK

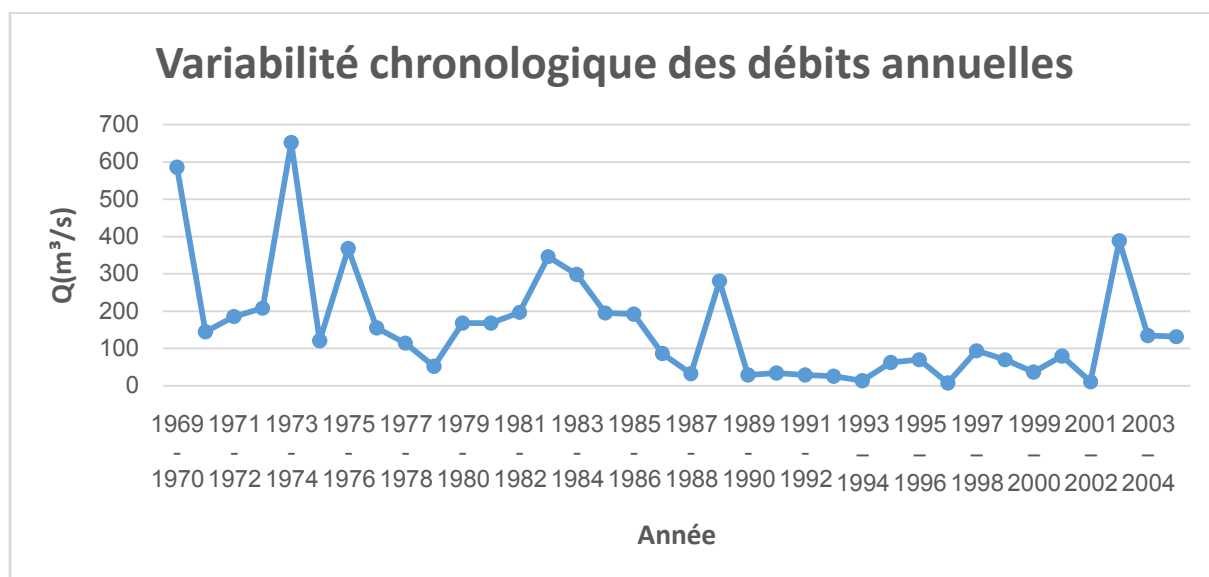


Figure III.2.4 Variabilité chronologique des débits annuels de station de BOUBIREK

III.2.3 station de SIDI YAHIA

Tableau III.2.3. Débits max annuelles de station de SIDI YAHIA

Station	SIDI YAHIA		
Code	150901		
Année	Q max (m ³ /s)	Année	Q max (m ³ /s)
1971 - 1972	318.5	1984 - 1985	243.0
1972 - 1973	902.0	1985 - 1986	397.2
1973 - 1974	862.0	1986 - 1987	69.80
1974 - 1975	140.0	1987 - 1988	17.72
1975 - 1976	370.6	1988 - 1989	162.1
1976 - 1977	89.40	1989 - 1990	204.0
1977 - 1978	131.2	1990 - 1991	73.12
1978 - 1979	78.00	1991 - 1992	168.9
1979 - 1980	192.6	1992 - 1993	56.88
1980 - 1981	307.0	1993 - 1994	81.01
1981 - 1982	260.1	1994 - 1995	330.0
1982 - 1983	525.2	1995 - 1996	142.0
1983 - 1984	445.8	1996 - 1997	13.56

L'histogramme à la figure (III.2.5) montre la variation annuelle des débits maximaux. On note une augmentation des débits de l'année 1972 et 1973.

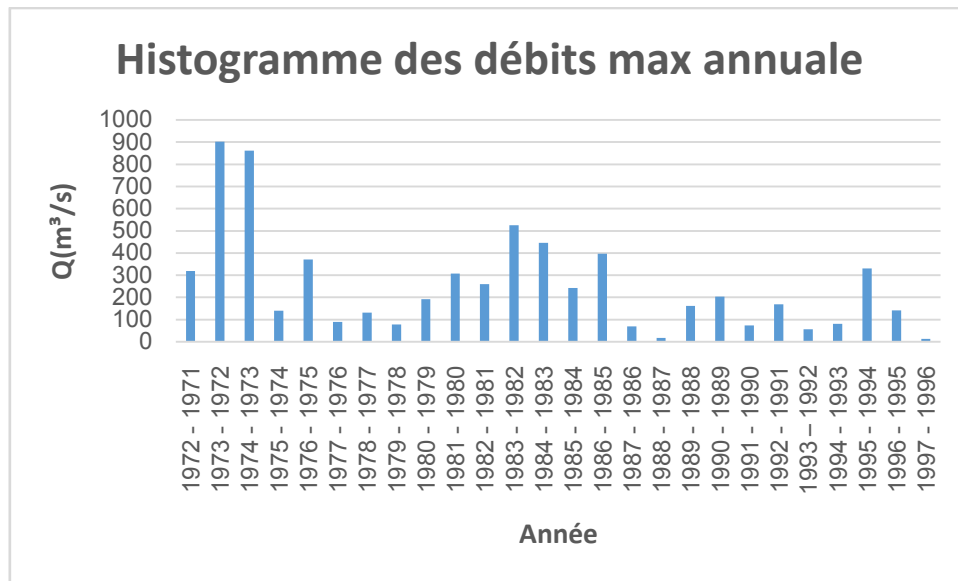


Figure III.2.5 La répartition max annuelle des débitsde station de SIDI YAHIA

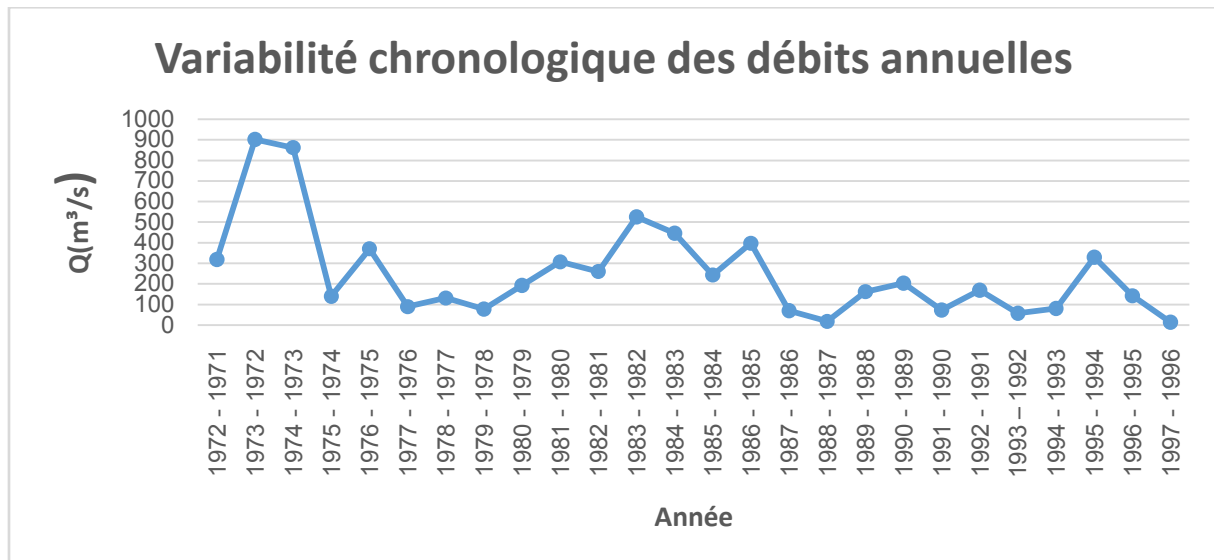


Figure III.2.6Variabilité chronologique des débits annuelsde station de SIDI YAHIA

III.3 Ajustement de la série des débits de pointe enregistrée à les stations de bouselam suivant les lois de distribution

III.3.1. Ajustement suivant la loi de GUMBEL

III.3.1.1. Description théorique :

La loi de GUMBEL est un modèle fréquentiel très souvent utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes. La fonction de répartition $F(Q_p)$ s'exprime de la manière suivante :

$$F(Q_p) = e^{-e^{-\alpha(Q_p u)}} \dots \dots \dots (III.1)$$

Les paramètres α et u peuvent être estimés à partir de la moyenne et de l'écart type de l'échantillon par les relations suivantes :

$$\alpha = \frac{1.2825}{\delta_{Q_p}} \dots \dots \dots (III.2)$$

$$u = \bar{Q}_p + 0.45\delta_{Q_p} \dots \dots \dots (III.3)$$

Pour une période de retour donnée, le débit extrême maximal correspondant peut être estimé à partir de la relation :

$$Q_{p_i} = \bar{Q}_p + K\delta_{Q_p} \dots \dots \dots (III.4)$$

Avec K est la variable réduite de Gumbel :

$$K = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[0.5772 + \ln \left(\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right) \right] \dots \dots \dots (III.5)$$

$$Et T = \frac{1}{1-F} \dots \dots \dots (III.6)$$

La démarche suivie est organisée comme suite :

- Utiliser les statistiques descriptives pour estimer les paramètres de la loi (moyenne, Ecart Type ...).
- Trier les valeurs dans l'ordre décroissant et attribuer un rang à chaque valeur.
- Calculer la probabilité expérimentale de dépassement pour chaque rang (d'après
- L'équation de Wei bull : $P(Q > Q_i) = (R / (N+1))$).
- Calculer la probabilité expérimentale de non dépassement pour chaque rang ($P(Q < Q_i) = 1 - P(Q > Q_i)$).
- Calculer la période de retour expérimentale ($T = 1 / P(Q > Q_i)$).
- Calculer la variable réduite expérimentale de Gumbel pour chaque rang ; équation (III.5).
- Calculer la probabilité théorique de non dépassement pour chaque rang ; équations(1), (2) et (3).
- Calculer la probabilité théorique de dépassement pour chaque rang ($P(Q > Q_i) = 1 - P(Q < Q_i)$).
- Calculer la période de retour théorique ($T = 1 / P(Q > Q_i)$).
- Calculer la variable réduite théorique de Gumbel pour chaque rang ; équation (5).
- Comme un test graphique d'adéquation, tracer les deux courbes des débits de pointes observés en fonction de la variable réduite théorique et expérimentale de Gumbel et voir est ce que la série suit la droite théorique d'Henry.
- Confirmer l'adéquation de la loi par le test de χ^2 .

III.3.1.2. Résultats pratiques

Les paramètres qu'on peut les tirer à partir des séries lorsqu'on applique la loi de GUMBEL, sont représentés dans les tableaux suivants

Tableau III.3.1: Ajustement de la loi GUMBEL et GALTON de la station FERMATOU (150601)

Statistique de base	Données
Nombre d'observations	28
Minimum	0.059
Maximum	236
Moyenne	38.6
Ecart-type	48.3
Médiane	20.2
Coefficient de variation (Cv)	1.25
Coefficient d'asymétrie (Cs)	2.68
Coefficient d'aplatissement (Ck)	10.2

Tests d'adéquation de la loi de GUMBEL de la station FERMATOU (150601)

a. Test graphique :

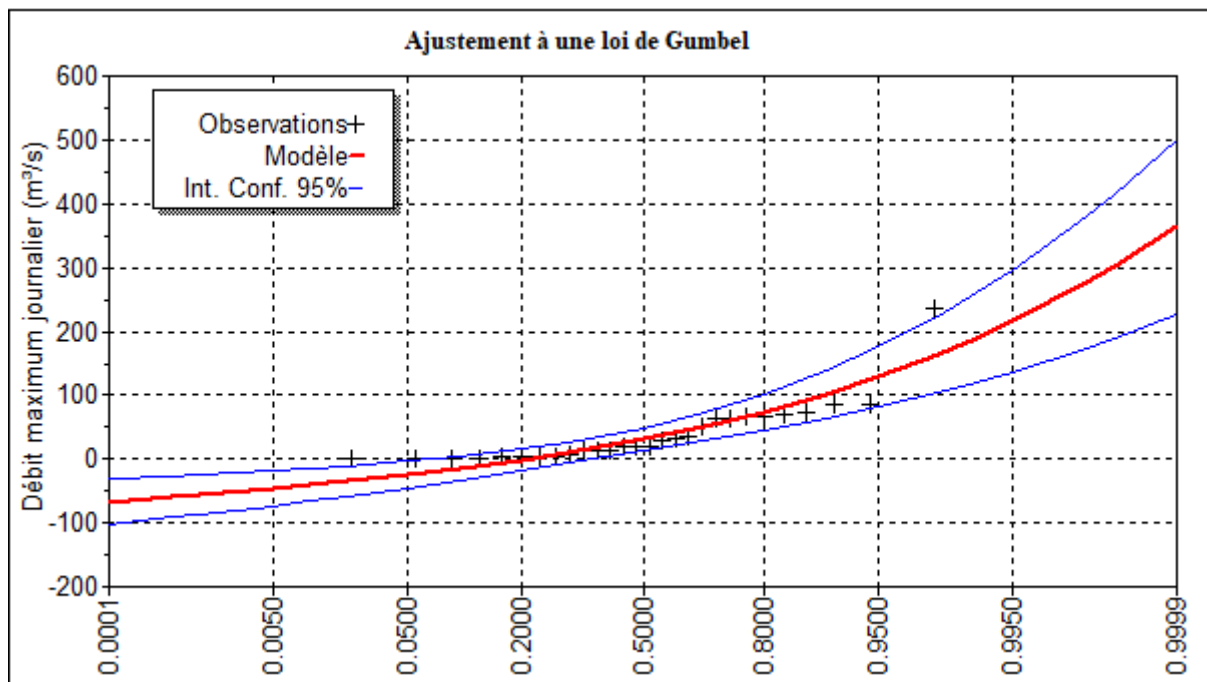


Figure III.3.1 Ajustement à une loi de GUMBEL de station FERMATOU

b. Test du Khi carré (χ^2) :

Hypothèses :

H_0 : L'échantillon provient d'une loi GUMBEL

H_1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi GUMBEL

Résultats :

Tableau III.3.2 Résultats du test Khi carré

Valeur de la statistique	$X^2 = 20$
P-value	$P = 0.0005$
Degrés de liberté	4
Nombre de classes	7

Nous pouvons accepter H_0 au niveau de signification de 1%.

Tableau III.3.3: Ajustement de la loi Gumbel GALTON de la station BOUBIREK (150703)

Statistique de base	Données
Nombre d'observations	36
Minimum	76.0
Maximum	652.00
Moyenne	158
Ecart-type	150
Médiane	126
Coefficient de variation (Cv)	0.953
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.73
Coefficient d'aplatissement (Ck)	5.29

Tests d'adéquation de la loi de GUMBEL de la station BOUBIREK (150703)

a. Test graphique :

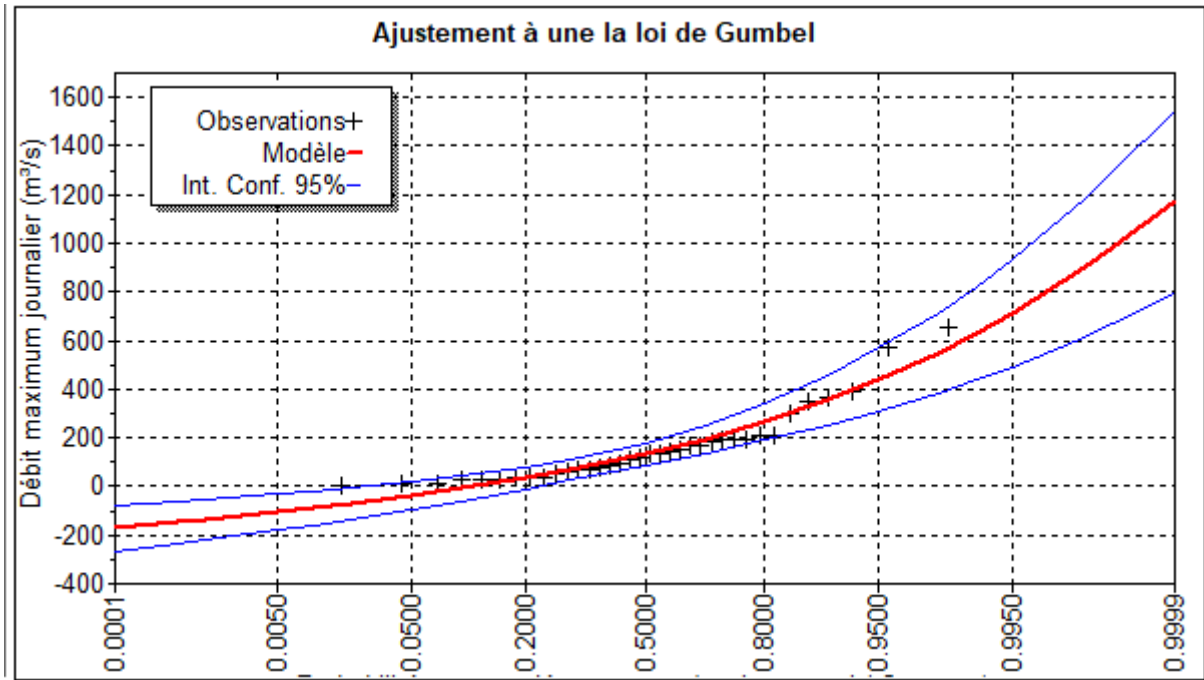


Figure III.3.2 Ajustement à une loi de GUMBEL de station BOUBIREK

c. Test du Khi carré (χ^2) :

Hypothèses :

H_0 : L'échantillon provient d'une loi GUMBEL

H_1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi GUMBEL

Résultats :

Tableau III.3.4. Résultats du test Khi carré

Valeur de la statistique	$X^2 = 12.89$
P-value	$P = 0.0244$
Degrés de liberté	5
Nombre de classes	8

Nous pouvons accepter H_0 au niveau de signification de 1%.

Tableau III.3.5: Ajustement de la loi Gumbel de GALTON de la station SIDI YAHIA (150901)

Statistique de base	Données
Nombre d'observations	26
Minimum	13.6
Maximum	902.00
Moyenne	253
Ecart-type	229
Médiane	181
Coefficient de variation (Cv)	0.907
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.66
Coefficient d'aplatissement (Ck)	4.65

Tests d'adéquation de la loi de GUMBEL de la station SIDI YAHIA (150901)

a. Test graphique :

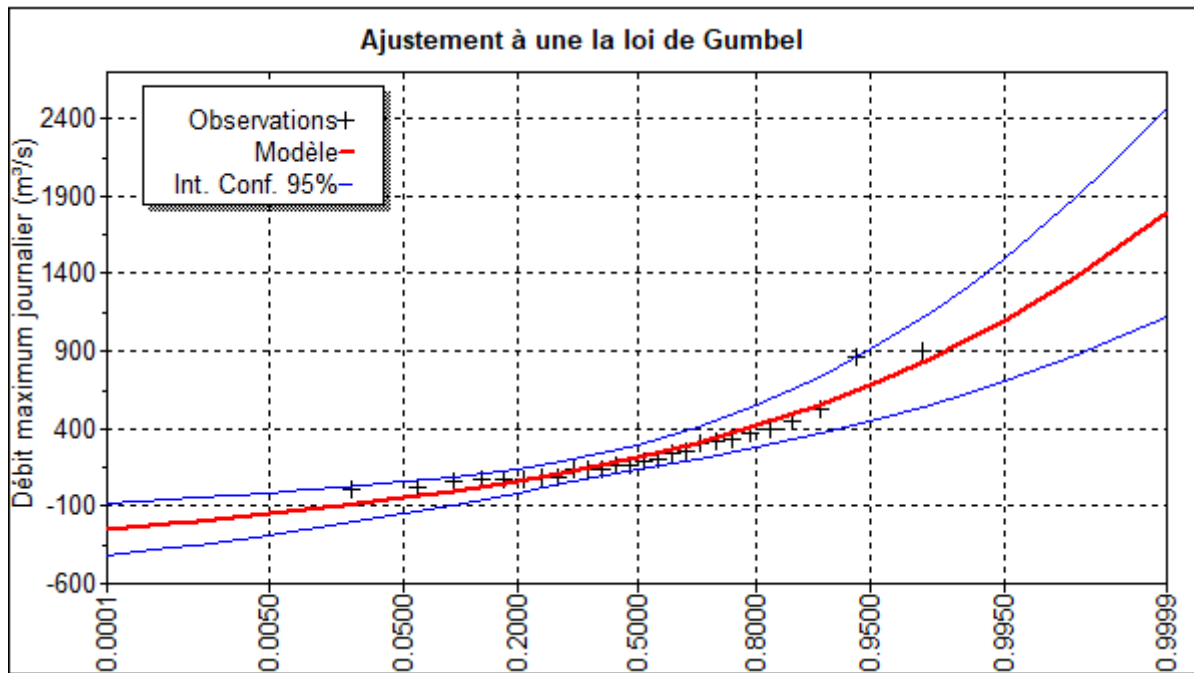


Figure III.3.3 Ajustement à une loi de GUMBEL de station SIDI YAHIA

d. Test du Khi carré (χ^2) :

Hypothèses :

H_0 : L'échantillon provient d'une loi GUMBEL

H_1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi GUMBEL

Résultats :

Tableau III.3.6 Résultats du test Khi carré

Valeur de la statistique	$X^2 = 3.08$
P-value	$P = 0.545$
Degrés de liberté	4
Nombre de classes	7

Nous pouvons accepter H_0 au niveau de signification de 1%.

III.3.2. Ajustement suivant la loi de GALTON (Log Normale)

III.3.2.1. Description théorique

Cette loi a une expression presque identique à celle de la loi normale sauf qu'il y a une transformation logarithmique près. En effet, on peut lui donner la représentation suivante

:

$$F(Q_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad \text{Avec : } U = \left(\frac{\log(Q_p) - M}{\delta_{Q_p}} \right)$$

Où ; M : la moyenne des logarithmes de la variable Q_p , $M = \frac{\sum_{i=1}^N \log(Q_{p_i})}{N}$

δ_{Q_p} : l'écart-type des logarithmes de la variable Q_p .

La procédure d'utilisation est identique à celle de la loi normale, mis à part qu'on doit procéder avant toute chose à une transformation logarithmique des données (logarithme népérien ou à base 10).

III.3.2.2. Résultats pratiques

III.3.2.2.1 Tests d'adéquation de la loi Log -Normal de la station FERMATOU (150601)

Les paramètres qu'on peut les tirer à partir de cette série lorsqu'on applique la loi de GALTON, sont représentés dans le tableau III.2.

a. Test graphique :

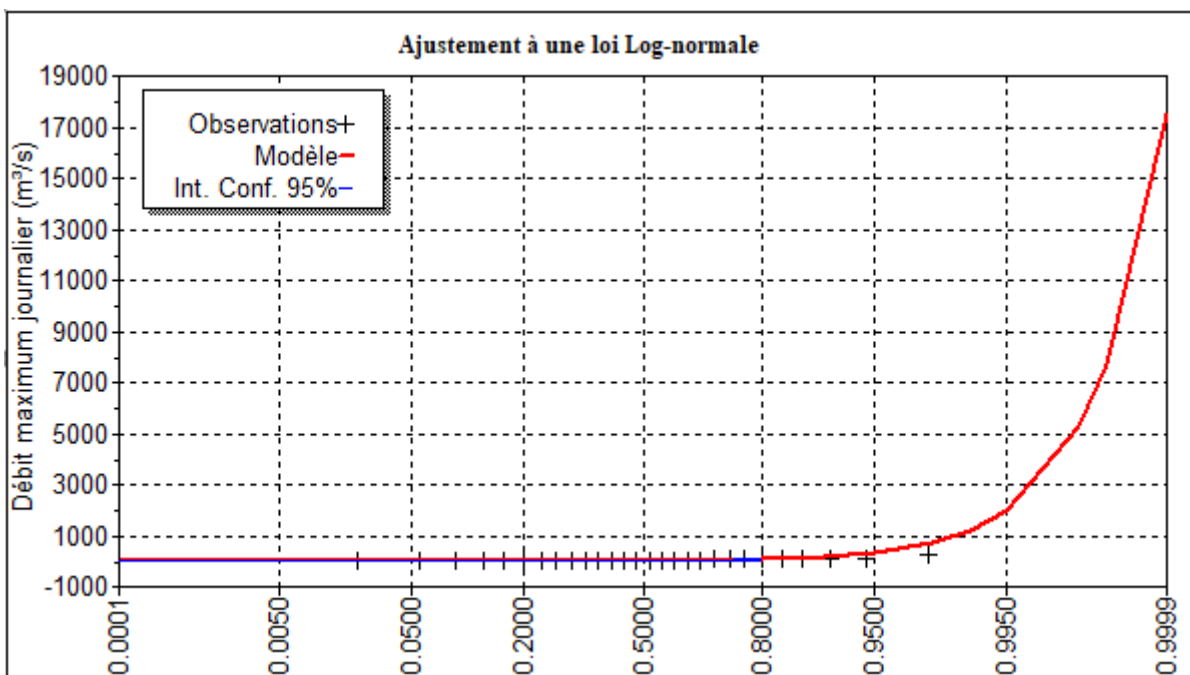


Figure III.3.4 Ajustement à une loi de GALTON de station FERMATOU

a. Test du Khi carré (χ^2)

Hypothèses :

H_0 : L'échantillon provient d'une loi Log-Normale

H_1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Log-Normale

Résultats :

Tableau III.3.7 Résultats du test Khi carré

Valeur de la statistique	$X^2 = 20$
P-value	$P = 0.0005$
Degrés de liberté	4
Nombre de classes	7

Nous pouvons accepter H_0 au niveau de signification de 1%.

III.3.2.2.2 Tests d'adéquation de la loi Log -Normal de la station boubirek (150703)

Les paramètres qu'on peut les tirer à partir de cette série lorsqu'on applique la loi de GALTON, sont représentés dans le tableau III.2.

b. Test graphique :

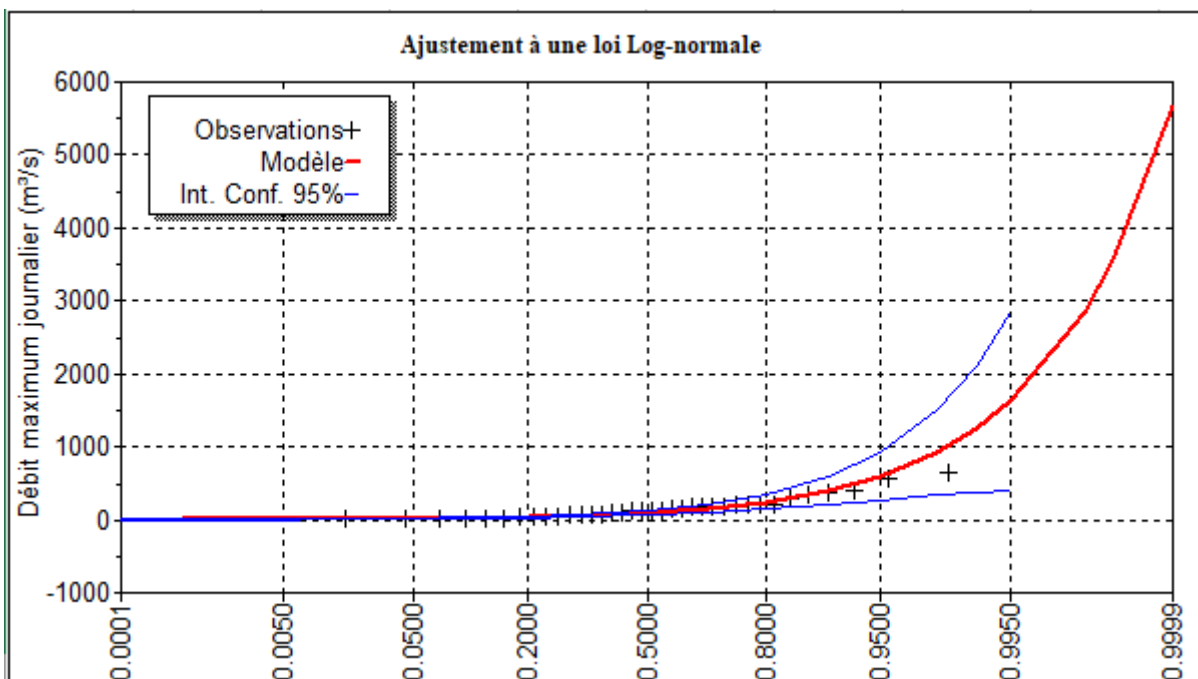


Figure III.3.5 Ajustement à une loi de GALTON de station BOUBIREK

b. Test du Khi carré (χ^2)

Hypothèses :

H_0 : L'échantillon provient d'une loi Log-Normale

H_1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Log-Normale

Résultats :

Tableau III.3.8 Résultats du test Khi carré

Valeur de la statistique	$X^2 = 12.89$
P-value	$P = 0.0244$
Degrés de liberté	5
Nombre de classes	8

Nous pouvons accepter H_0 au niveau de signification de 1%.

III.3.2.3. Tests d'adéquation de la loi Log -Normal de la station SIDI YAHIA (150901)

Les paramètres qu'on peut les tirer à partir de cette série lorsqu'on applique la loi de GALTON, sont représentés dans le tableau III.2.

c. Test graphique :

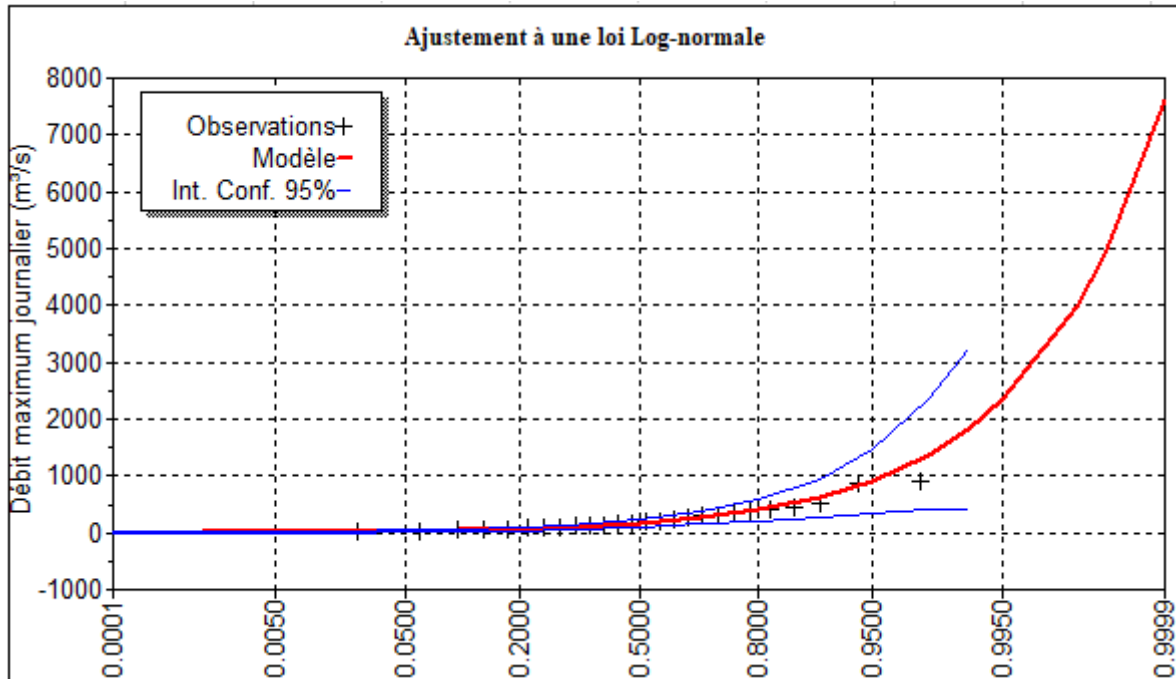


Figure III.3.6 Ajustement à une loi de GALTON de station SIDI YAHIA

c. Test du Khi carré (χ^2)

Hypothèses :

H_0 : L'échantillon provient d'une loi Log-Normale

H_1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Log-Normale

Résultats :

Tableau III.3.9. Résultats du test Khi carré

Valeur de la statistique	$X^2 = 3.08$
P-value	$P = 0.545$
Degrés de liberté	4
Nombre de classes	7

Nous pouvons accepter H_0 au niveau de signification de 1%.

III.4 Choix du modèle statistique adéquat pour les deux stations et sélection de la station représentative

Les résultats issus des tests d'adéquation de l'ajustement d'une série des débits de pointe enregistrées au station hydrométrique de Sidi Aich par les deux lois de distribution GUMBEL et Log-Normale, montrent que la loi la plus adéquate pour la série est celle Log-Normale. D'où les débits de pointes correspondants aux différentes périodes de retour, sont tirés de ce modèle pour la station et représentés dans le tableau suivant :

III.4.1. la station FERMATOU (150601) :

Tableau III.4.1 Estimation des débits de pointe correspondants aux différentes périodes de retour d'après la station de formatou suivant la loi de GUMBEL et de GALTON.

la station FERMATOU (150601)					
Période de Retour (ans)	F (ans ⁻¹)	GUMBEL		GALTON	
		U. GUMBEL	Q (m3/s)	U de GAUSS	Q (m3/s)
10	0.9	2.250	102	0,001	163
50	0.98	3.902	164	0,002	718
100	0.99	4.600	190	0,002	1210

III. 4.2 la station de BOUBIREK (150703)

Tableau III.4.2 Estimation des débits de pointe correspondants aux différentes périodes de retour d'après la station de boubirek suivant la loi de GUMBEL et de GALTON.

station de BOUBIREK (150703)					
Période de Retour (ans)	F (ans ⁻¹)	GUMBEL		GALTON	
		U. GUMBEL	Q (m3/s)	U de GAUSS	Q (m3/s)
10	0.9	2.250	354	0,001	397
50	0.98	3.902	548	0,002	922
100	0.99	4.600	630	0,002	1240

III.4.3la station de SIDI YAHIA (150901)

Tableau III.4.3 Estimation des débits de pointe correspondants aux différentes périodes de retour d’après la station de sidi Yahia suivant la loi de GUMBEL et de GALTON.

station de SIDI YAHIA (150901)					
Période de Retour (ans)	F (ans ⁻¹)	GUMBEL		GALTON	
		U. GUMBEL	Q (m3/s)	U de GAUSS	Q (m3/s)
10	0.9	2.250	553	0,001	623
50	0.98	3.902	848	0,002	1380
100	0.99	4.600	973	0,002	1820

III.4.4. 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.5.Hydrogramme de crue

C’est une courbe représentant l’évolution des débits en fonction du temps pendant la crue, il permet d’estimer quelques caractéristiques relatives à la crue telle que, la forme, le volume, temps de montée et temps de base, pour le tracé de l’hydrogramme, on utilise la méthode de SKOLOVOSKY. [16]

Cette méthode qui consiste à tracer la courbe à partir de deux équations paraboliques l’une pour la montée de la crue et l’autre pour la décrue.

➤ Branche de crue (Montée) :

$$Q(t) = Q_{max} \left[\frac{t}{T_m} \right]^n \dots\dots\dots(III.5.1)$$

➤ Branche de crue (Descente) :

$$Q(t) = Q_{max} \left[\frac{(T_d + T_c - t)}{T_d} \right]^m \dots\dots\dots(III.5.2)$$

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

Q_t: débit instantané au moment (t).

t_m, t_d : temps de montée et de décrue. ‘

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

Temps de base : $t_b = t_m + t_d$.

On considère généralement que : $t_d = 4 t_m$, et $t_m = t_c$.

III.5.1 BV FERMATOU (150601) :

Tableau III.5.1 Estimation des débits de pointe correspondants Hydrogrammes de crues fréquentielles du sous BV FERMATOU

Branche de crue (Montée)	Temps (h)	Q (10) ans	Q (50) ans	Q (100) ans
	0	0	0	0
	1	0.314938	1.387272	2.337882
	3	2.83444	12.48545	21.04094
	5	7.873445	34.6818	58.44705
	7	15.43195	67.97633	114.5562
	9	25.50996	112.369	189.3684
	11	38.10747	167.8599	282.8837
	13	53.22449	234.449	395.102
	15	70.86101	312.1362	526.0234
	17	91.01703	400.9216	675.6479
	19	113.6925	500.8052	843.9754
	21	138.8876	611.787	1031.006
	22.75	163	718	1210

Branche de crue (Descente)	Temps (h)	Q (10) ans	Q (50) ans	Q (100) ans	Branche de crue (Descente)	Temps (h)	Q (10) ans	Q (50) ans	Q (100) ans
	23	161.660	712.099	1200.055		71	16.899	74.440	125.450
	25	151.206	666.048	1122.448		73	14.637	64.474	108.654
	27	141.212	622.026	1048.262		75	12.586	55.439	93.428
	29	131.669	579.989	977.418		77	10.736	47.290	79.695
	31	122.565	539.889	909.840		79	9.077	39.982	67.379
	33	113.891	501.681	845.452		81	7.598	33.468	56.402
	35	105.637	465.320	784.175		83	6.289	27.704	46.687
	37	97.791	430.760	725.933		85	5.140	22.642	38.157
	39	90.344	397.955	670.648		87	4.140	18.238	30.735
	41	83.284	366.859	618.244		89	3.279	14.445	24.344
	43	76.602	337.427	568.644		91	2.547	11.219	18.906
	45	70.288	309.612	521.770		93	1.932	8.512	14.345
	47	64.331	283.370	477.546		95	1.426	6.281	10.584
	49	58.720	258.654	435.894		97	1.017	4.478	7.546
	51	53.445	235.419	396.737		99	0.694	3.058	5.153
	53	48.496	213.619	359.998		101	0.448	1.975	3.328
55	43.862	193.207	325.600	103	0.269	1.184	1.995		

	57	39.533	174.140	293.467		105	0.145	0.638	1.076
	59	35.499	156.370	263.520		107	0.067	0.293	0.494
	61	31.749	139.852	235.683		109	0.023	0.102	0.172
	63	28.273	124.540	209.879		111	0.004	0.020	0.033
	65	25.060	110.389	186.031		113	0.000	0.000	0.001
	67	22.101	97.352	164.061					
	69	19.384	85.385	143.893		113.75	0.000	0.000	0.000

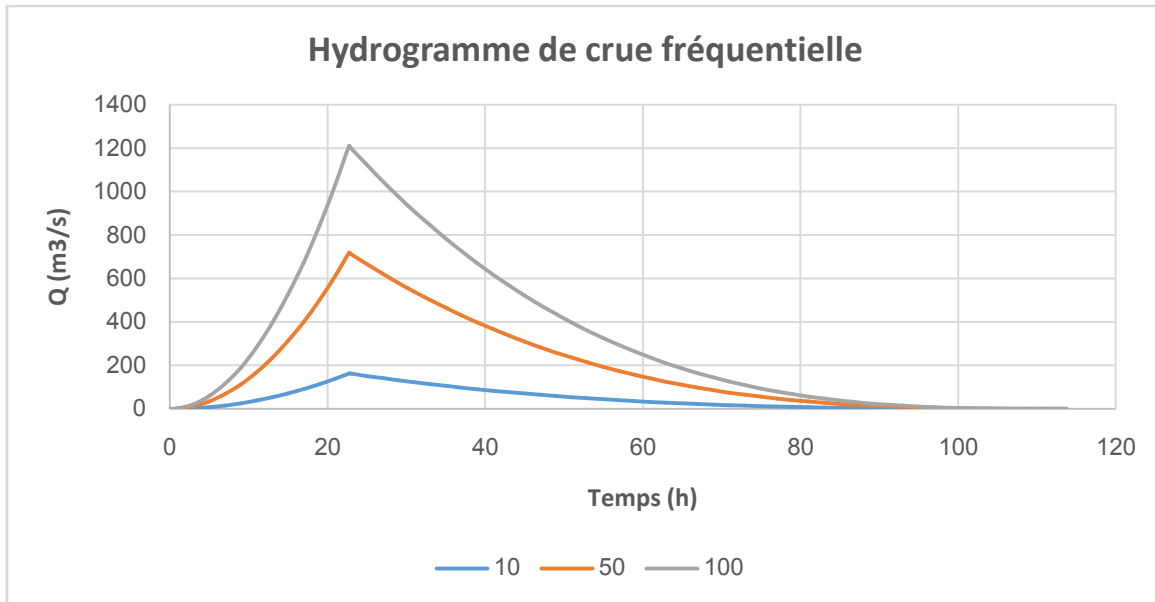


Figure III.5.1 Hydrogramme de crue fréquentielle du sous BV FERMATOU

III.5.2 BV BOUBIREK (150703) :

Tableau III.5.2 Estimation des débits de pointe correspondants Hydrogrammes de crues fréquentielles du sous BV BOUBIREK

Branche de crue (Montée)	Temps (h)	Q (10) ans	Q (50) ans	Q (100) ans
	0	0	0	0
	1	0.7670571	1.78142736	2.39584591
	3	6.9035141	16.0328463	21.5626132
	5	19.176428	44.5356841	59.8961478
	7	37.585799	87.2899408	117.39645
	9	62.131627	144.295616	194.063519
	11	92.813911	215.552711	289.897355
	13	129.63265	301.061224	404.897959
	15	172.58785	400.821157	539.06533
	17	221.67951	514.832508	692.399469
	19	276.90762	643.095278	864.900374
21	338.27219	785.609467	1056.56805	

	22.75	397	922	1240
--	-------	-----	-----	------

	Temps (h)	Q (10) ans	Q (50) ans	Q (100) ans		Temps (h)	Q (10) ans	Q (50) ans	Q (100) ans
Branche de crue (Descente)	23	393.737	914.422	1229.808	Branche de crue (Descente)	71	41.160	95.591	128.560
	25	368.274	855.287	1150.277		73	35.649	82.792	111.347
	27	343.934	798.758	1074.251		75	30.654	71.190	95.744
	29	320.690	744.776	1001.651		77	26.148	60.727	81.671
	31	298.518	693.283	932.398		79	22.107	51.342	69.050
	33	277.392	644.220	866.413		81	18.505	42.977	57.800
	35	257.287	597.528	803.617		83	15.318	35.575	47.845
	37	238.178	553.149	743.931		85	12.519	29.075	39.103
	39	220.039	511.023	687.276		87	10.084	23.420	31.497
	41	202.845	471.092	633.573		89	7.987	18.550	24.947
	43	186.572	433.297	582.743		91	6.203	14.406	19.375
	45	171.192	397.580	534.707		93	4.707	10.931	14.701
	47	156.682	363.882	489.386		95	3.473	8.065	10.847
	49	143.016	332.144	446.701		97	2.476	5.750	7.733
	51	130.169	302.307	406.573		99	1.691	3.926	5.280
	53	118.115	274.312	368.924		101	1.092	2.536	3.411
	55	106.829	248.102	333.673		103	0.654	1.520	2.044
	57	96.286	223.617	300.743		105	0.353	0.820	1.102
	59	86.461	200.798	270.054		107	0.162	0.376	0.506
	61	77.327	179.587	241.527		109	0.056	0.131	0.176
63	68.861	159.924	215.083	111	0.011	0.025	0.034		
65	61.037	141.752	190.643	113	0.000	0.001	0.001		
67	53.828	125.012	168.129						
69	47.211	109.644	147.461						
					113.75	0.000	0.000	0.000	

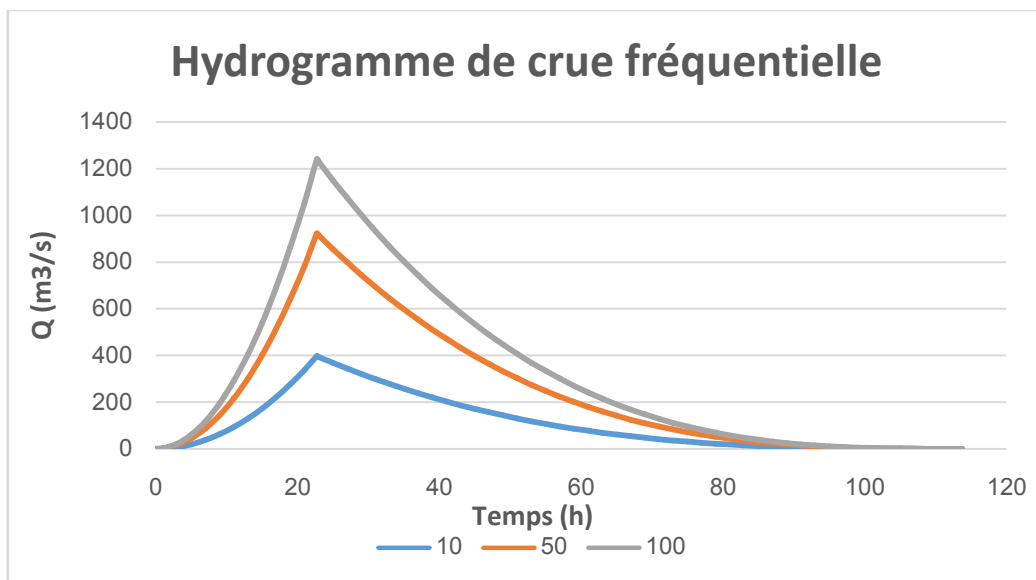


Figure III.5.2 Hydrogramme de crue fréquentielle du sous BV BOUBIREK

III.5.3BV SIDI YAHIA (150901) :

Tableau III.5.3 Estimation des débits de pointe correspondants Hydrogrammes de crues fréquentielles du sous BV SIDI YAHIA

Branche de crue (Montée)	Temps (h)	Q (10) ans	Q (50) ans	Q (100) ans
	0	0	0	0
	1	1.203719	2.666345	3.516484
	3	10.83347	23.9971	31.64835
	5	30.09298	66.65862	87.91209
	7	58.98225	130.6509	172.3077
	9	97.50127	215.9739	284.8352
	11	145.65	322.6277	425.4945
	13	203.4286	450.6122	594.2857
	15	270.8369	599.9275	791.2088
	17	347.8749	770.5736	1016.264
	19	434.5427	962.5504	1269.451
	21	530.8402	1175.858	1550.769
22.75	623	1380	1820	

	Temps (h)	Q (10) ans	Q (50) ans	Q (100) ans		Temps (h)	Q (10) ans	Q (50) ans	Q (100) ans
		23	617.879	1368.658		1805.041		71	64.591
Branche de crue (Descente)	25	577.922	1280.147	1688.310	Branche de crue (Descente)	73	55.943	123.919	163.429
	27	539.725	1195.538	1576.724		75	48.104	106.554	140.528
	29	503.249	1114.741	1470.166		77	41.033	90.892	119.872
	31	468.455	1037.669	1368.520		79	34.692	76.846	101.347
	33	435.303	964.234	1271.671		81	29.040	64.326	84.836
	35	403.753	894.348	1179.503		83	24.038	53.246	70.224
	37	373.765	827.923	1091.899		85	19.646	43.518	57.393
	39	345.301	764.872	1008.744		87	15.825	35.053	46.229
	41	318.319	705.105	929.921		89	12.534	27.764	36.616
	43	292.781	648.536	855.316		91	9.734	21.563	28.438
	45	268.647	595.077	784.811		93	7.386	16.361	21.578
	47	245.877	544.639	718.292		95	5.450	12.071	15.920
	49	224.431	497.135	655.642		97	3.885	8.606	11.350
	51	204.270	452.477	596.744		99	2.653	5.877	7.750
	53	185.354	410.576	541.485		101	1.714	3.796	5.006
	55	167.644	371.346	489.746		103	1.027	2.275	3.000
	57	151.099	334.698	441.413		105	0.554	1.227	1.618
	59	135.680	300.543	396.369		107	0.254	0.563	0.743
	61	121.348	268.796	354.499		109	0.089	0.196	0.259
63	108.062	239.366	315.686	111	0.017	0.038	0.050		
65	95.783	212.167	279.815	113	0.000	0.001	0.001		
67	84.471	187.111	246.770	113.75	0.000	0.000	0.000		
69	74.087	164.110	216.434						

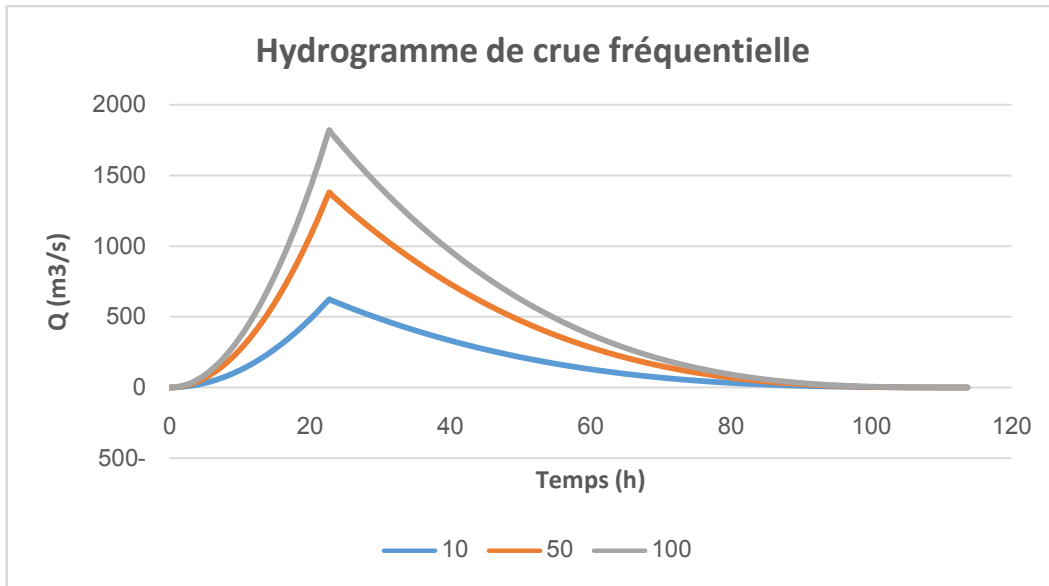


Figure III.5.3 Hydrogramme de crue fréquentielle du sous BV SIDI YAHIA

III.6 Détermination du volume de la crue

Le volume de crue donnée par la relation suivante :

$$W_1 = \frac{(Q_{\max} t_m)}{m+1} \dots \dots \dots (III.7.1.1)$$

$$W_2 = \frac{(Q_{\max} t_d)}{n+1} \dots \dots \dots (III.7.1.2)$$

$$W_t = W_1 + W_2 \dots \dots \dots (III.7.1.3)$$

Avec :

W_1 : apport pendant la crue (H_m)

W_2 : apport pendant la décrue

W_t : apport total (H_m)

Tableau III.6.1 Estimation du volume de crue de l'Oued FERMATOU

Période de Retour	10 ans	50 ans	100 ans
Q_{\max} (m ³ /s)	163	718	1240
$W_1 = [t_m / (m+1)] \cdot Q_{\max}$ (m ³ /s)	3.337E+06	1.470E+07	2.477E+07
$W_2 = [t_d / (n+1)] \cdot Q_{\max}$ (m ³ /s)	1.780E+07	7.841E+07	1.321E+08
$W_t = W_1 + W_2$ (m ³) (m ³ /s)	2.114E+07	9.311E+07	1.569E+08
$W_t = W_1 + W_2$ (hm ³)	2.114E+01	9.311E+01	1.569E+02

Tableau III.6.2 Estimation du volume de crue de l'Oued BOUBIREK

Période de Retour	10 ans	50 ans	100 ans
Q_{\max} (m ³ /s)	397	922	1240
$W_1 = [t_m / (m+1)] \cdot Q_{\max}$ (m ³ /s)	8.129E+06	1.888E+07	2.539E+07
$W_2 = [t_d / (n+1)] \cdot Q_{\max}$ (m ³ /s)	4.335E+07	1.007E+08	1.354E+08
$W_t = W_1 + W_2$ (m ³) (m ³ /s)	5.148E+07	1.196E+08	1.608E+08
$W_t = W_1 + W_2$ (hm ³)	5.148E+01	1.196E+02	1.608E+02

Tableau III.6.3 Estimation du volume de crue de l'Oued SIDI YAHIA

Période de Retour	10 ans	50 ans	100 ans
Q_{\max} (m ³ /s)	623	1380	1820
$W_1 = [t_m / (m+1)] \cdot Q_{\max}$ (m ³ /s)	1.276E+07	2.826E+07	3.726E+07
$W_2 = [t_d / (n+1)] \cdot Q_{\max}$ (m ³ /s)	6.803E+07	1.507E+08	1.987E+08
$W_t = W_1 + W_2$ (m ³) (m ³ /s)	8.079E+07	1.790E+08	2.360E+08
$W_t = W_1 + W_2$ (hm ³)	8.079E+01	1.790E+02	2.360E+02

III.7. Conclusion

L'analyse statistique des données (crues) a pour but l'estimation des quantiles de débits et de volumes des crues. Dans ce chapitre, une présentation de la théorie de l'analyse statistiques des données est nécessaire, puisque son utilisation avec différentes lois de probabilité théoriques dans l'ajustement des débits maxima instantanés fréquentielle dans le but de déterminer le débit caractéristique de la crue du bassin versant de l'oued Boussellam. Aussi, le calcul des différents quantiles de débits est nécessaire dans l'établissement des hydrogrammes synthétiques mono-fréquence.

Chapitre IV.

Cartographier des zones inondables par HEC RAS

Chapitre IV. Cartographie des zones inondables par HEC RAS

IV.1. Introduction

Un modèle est une représentation d'un phénomène physique, afin d'en avoir une meilleure compréhension ou d'analyser l'influence qu'il exerce. La représentation peut être physique, analogique ou mathématique. Dans le premier cas, le modèle est une maquette qui reproduit d'une manière adéquate la réalité. Les modèles analogiques utilisent les similitudes qui existent entre le phénomène à étudier et un autre phénomène physique. La méthode la plus utilisée est l'analogie entre le courant électrique et le flux d'eau. Dans ce cas, le modèle est le résultat de l'expression analytique de la complexité observée ou supposée et se présente généralement sous la forme d'un ensemble d'équations. La modélisation mathématique est un outil essentiel pour la connaissance des phénomènes naturels en élaborant un lien entre les variables d'entrée et de sortie par des relations mathématiques.[7]

IV.2. Dispositif et outils informatiques utilisées

Il faut tout d'abord signalé que nous avons choisi de se servir d'un code informatique unidimensionnel qui a prouvé son efficacité dans ce genre de calcul hydraulique. Il s'agit bien du code HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center, River Analysis System ou système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique) élaboré par l'US Army Corps of Engineers, et publié en freeware depuis 1995. Ce logiciel s'est déjà montré très performant pour ce type d'étude, et bon nombre d'entreprises et de laboratoires le considèrent comme l'outil idéal de première approche (K. DEBIANE 2000 et R. CHAMPREDONDE 2006). Ce système permet d'analyser les débits et le niveau d'eau dans le lit des rivières et de déterminer les zones inondables. Il intègre de nombreux moyens de saisie de données, de composants d'analyse hydraulique, de stockage de données, de restitution sous forme de tableaux et de graphiques.

Nous disposons de la version (HEC-RAS 5.0.3) disponible gratuitement sur le site officiel HECRAS.

En plus du code HEC-RAS, nous nous sommes servis du fameux logiciel ARCGIS, le leader en matière des systèmes d'information géographique.

Les échanges entre les deux programmes étant assurées par une extension développée aussi par

HEC, le corps des ingénieurs de l'armée américaine : HEC-GEORAS, dédiée à fonctionner sous

ARCGIS.

Le tout forme donc un dispositif informatique cohérent qui permet dans un premier temps de préparer les données géométriques requises (preprocessing), de faire ensuite les calculs nécessaires (simulation), et d'exploiter enfin les résultats (postprocessing).

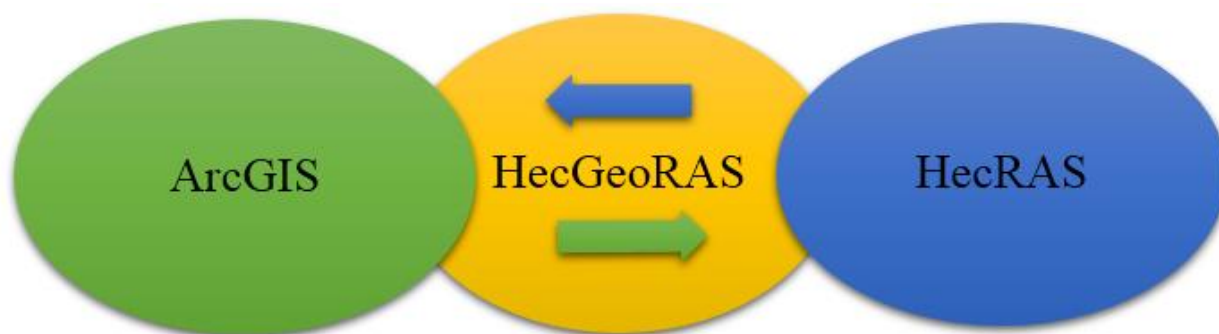


Figure IV.1. Représentation schématique du dispositif informatique utilisé

IV.2.1. Arc GIS

Arc GIS est un logiciel permettant d'exploiter un Système d'Information Géographique (SIG). Un logiciel SIG permet l'acquisition, le stockage, la mise à jour, la manipulation, et le traitement de données géographiques. De plus, il permet de faire de la cartographie et de l'analyse spatiale de façon précise en fonction de l'échelle désirée.

Le principe directeur d'un SIG est le suivant : nous avons d'un côté les données géométriques et de l'autre les données attributaires. Ces données sont stockées sous format numérique et organisées par couches (appelées aussi « shapefiles » dans Arc GIS).

Petit point de détail : Arc GIS est en réalité une suite, qui se décline en trois versions (Arc View, Arc Editor et Arc Info). La différence entre ces versions est le nombre d'options supplémentaires disponibles, ArcView en possédant le moins. Ceci est indépendant des extensions (Spatial Analyst, 3D Analyst... que l'on peut acheter en supplément de chaque série).

Chacune de ces trois versions de la suite Arc Gis est constituée d'une interface Arc Map et d'une interface Arc Catalog. La version 10.3 apporte la possibilité de gérer Arc Catalog et ArcToolBox directement depuis l'interface d'Arc Map.

IV.2.1.1. Présentation de l'interface ArcMap

Arc Map montre, questionne, édite, crée ou analyse des données, sous forme de tables ou de cartes. ArcMap facilite la disposition des cartes lors de la mise en page pour l'impression, l'intégration dans d'autres documents et l'édition de documents électroniques. L'interface du logiciel est présentée ci-dessous : [8]

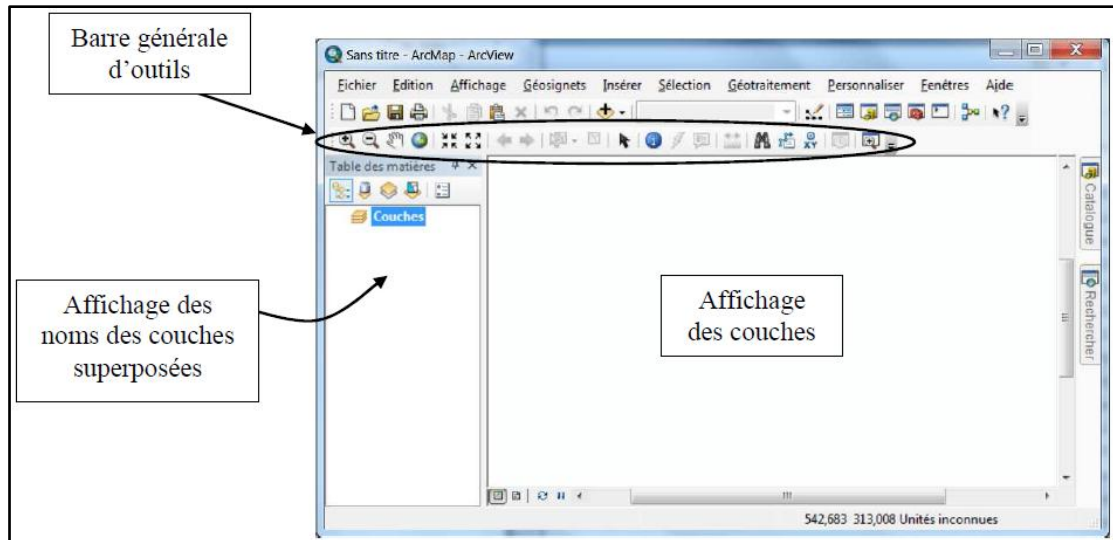


Figure IV.2. Interface de ArcMap

La barre générale d'outils se décline comme suit :

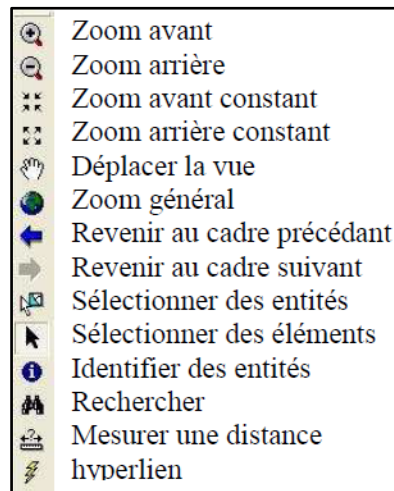


Figure IV.3.La barre générale d'outils

La barre d'outils renferme les outils de navigation sur les données graphiques des couches, ainsi que les outils d'affichage rapide de données sémantiques (attributaires) liées aux entités graphiques.

IV.2.12.Présentation de l'interface ArcCatalog :

ArcCatalog vous permet de passer en revue, organiser, distribuer et modifier les éléments de propriétés des données géographiques. L'interface permet d'employer des méthodes graphiques ou textuelles pour passer en revue, contrôler ou modifier l'ensemble des données.

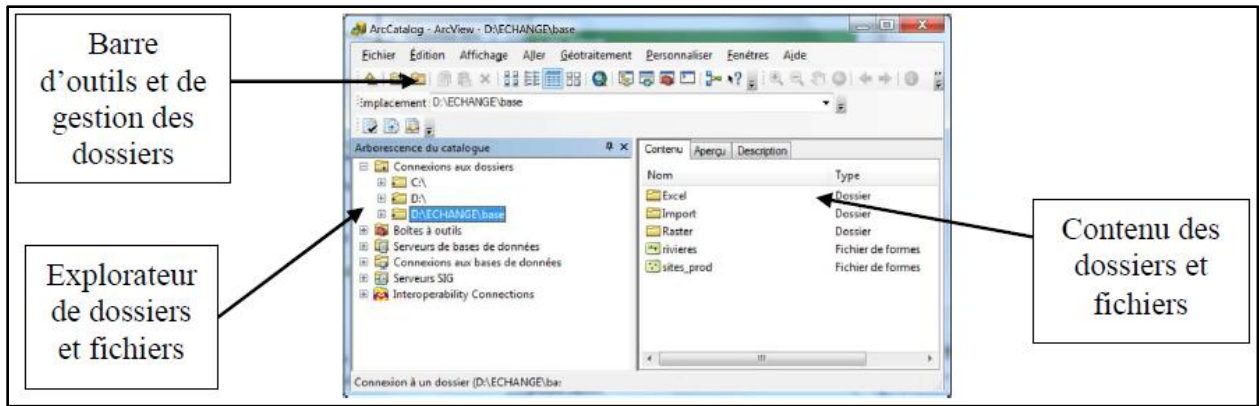


Figure IV.4. Interface de ArcCatalog

C'est idéalement dans cette interface que l'on exécutera les actions les plus courantes listées ci-dessous :

- Créer des nouvelles données (couches ou shapefiles, géodatabases...) ou supprimer une couche (soit l'ensemble des fichiers correspondants au shapefile),
- Attribuer un système de coordonnées lorsqu'il n'est pas reconnu par le logiciel, ou non renseigné,
- Avoir un aperçu géographique ou attributaire d'une couche donnée.

Désormais, l'interface ArcCatalog est disponible au travers d'ArcMap, ce qui facilite grandement la gestion des fichiers. Cet onglet se charge soit à partir de l'icône dans la barre standard d'ArcMap, soit à l'aide de l'onglet Catalogue situé à droite de la fenêtre

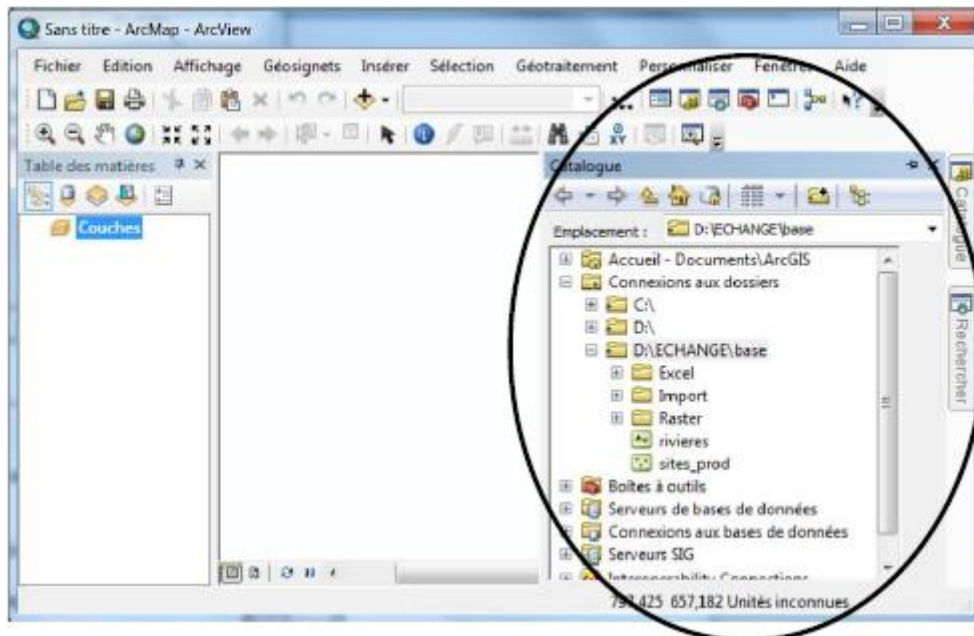


Figure IV.5. Interface de l'Arc Catalogue travers d'ArcMap

IV.2.1.3. Présentation de l'interface ArcToolBox

ArcToolbox est le module dans ArcGis 10.3 qui permet d'accéder à toutes les fonctionnalités puissantes de traitement et d'analyse. La boîte à outils fournit un ensemble très riche de fonctions de géotraitement. Il convertit aussi les formats de données pour l'importation ou l'exportation de fichiers, ainsi que les changements de projection.

L'ensemble des outils présents dans chaque boîte à outil n'est pas obligatoirement accessible. Certains nécessitent l'achat d'extensions supplémentaires. Généralement, en cliquant sur un outil, une fenêtre correspondant à l'outil s'ouvre, permettant de paramétrer ce dernier. Il est possible de créer ses propres scripts, que ce soit au travers de python (livré avec le logiciel) ou en transformant un ModelBuilder. Attention : avant d'utiliser un outil, consultez l'aide, qui est très bien conçue et qui explique clairement le paramétrage des outils !

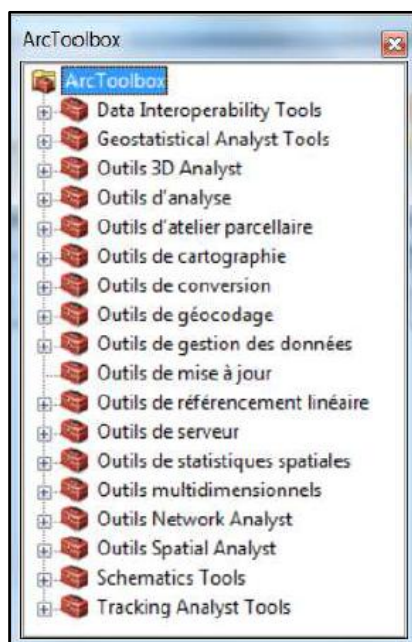


Figure IV.6. Interface de ArcToolbox

IV.2.2 HecGeoRAS

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 cet extension qui s'intègre après installation avec Arc GIS. 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 3DAnalyst.

HecGeoRAS est un ensemble de procédures, d'outils et d'utilitaires pour le traitement des données géospatiales dans ArcGIS en utilisant une interface utilisateur graphique. Il

permet d'une part, la préparation des données géométriques à exporter vers HecRAS, 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 qui doit être de préférence sous forme de TIN. Les données résultantes de la simulation par HecRAS, peuvent être exploitées par HecGeoRAS sous ArcGIS pour analyser et cartographier les zones inondables, en plus d'autres possibilités.

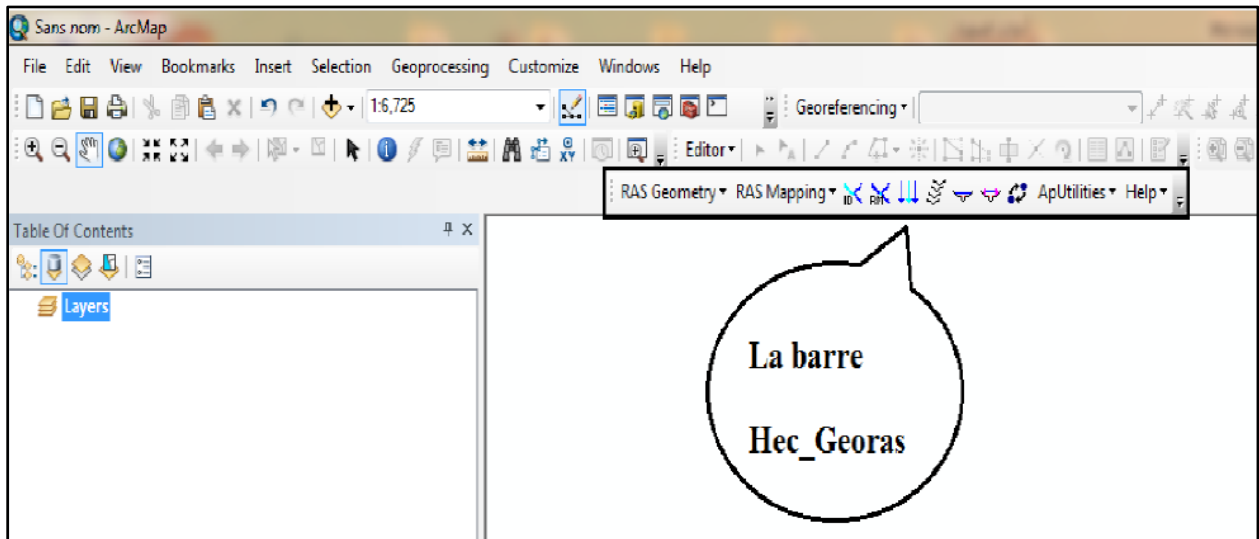


Figure IV.7.L'extension HecGeoRas sur l'interface ArcMap

Pour assurer toutes ces fonctionnalités, la barre de HecGeoRAS est dotée de deux menus déroulants essentiels, le premier s'appelle RAS Geometry : il permet de faire toutes les opérations nécessaires à l'établissement du fichier de la géométrie (preprocessing) ; le deuxième s'appelle RAS Mapping : chargée d'effectuer les opérations en relation avec l'exploitation des résultats de la simulation par HEC-RAS.

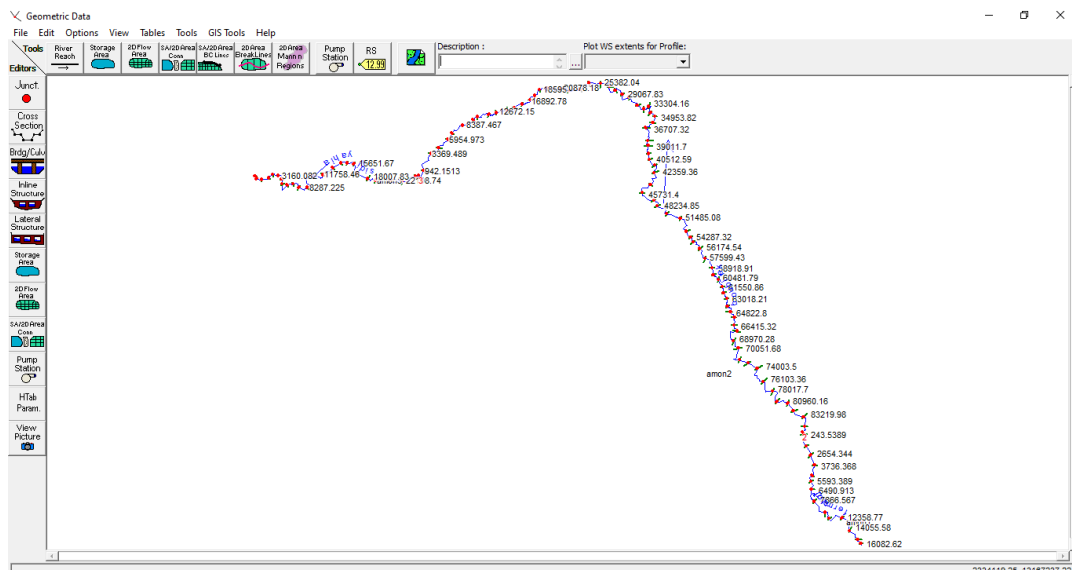


Figure IV.8. Entités géométriques numérisées sur ArcMap à l'aide de l'extension Hec-GeoRAS

IV.2.3HEC-RAS

Le logiciel HEC-RAS est un logiciel de simulation de l'hydraulique dans les rivières et canaux développé par le corps des ingénieurs de l'armée américaine. Il permet d'évaluer les débits et hauteurs d'eau sur l'ensemble des sections d'une rivière. Il utilise des équations d'hydraulique à surface libre (Saint-Venant 1D, Manning-Strickler...) et des modèles pour les seuils, le frottement etc.

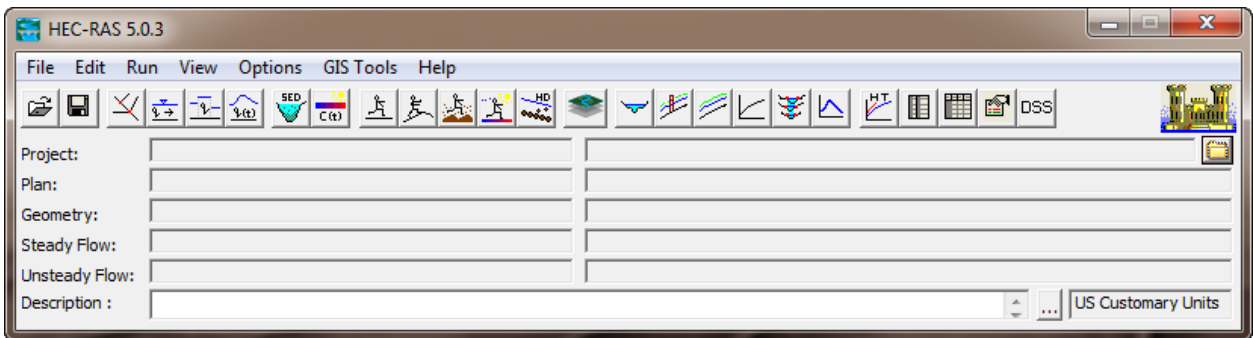


Figure IV.9. Interface de HEC-RAS 5.0.3

IV.2.3.1.Description du modèle

Dans le cadre du modèle hydraulique nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS. Ce logiciel permet de modéliser les débits et les hauteurs d'eau dans une rivière. La première étape consiste à modéliser la rivière. Le modèle de la rivière nous a été fourni par les enseignants. Ce modèle se constitue d'une succession de sections dans lesquelles on calcule le débit et la hauteur d'eau : elles correspondent au maillage de la rivière. Ces sections ont été mesurées et sont donc assez fidèles à la réalité. On peut y observer le lit majeur et le lit mineur ainsi que l'érosion due aux lacets de la rivière. Le Lez comporte de nombreux seuils sur la partie que nous étudions et ces seuils sont également modélisés.

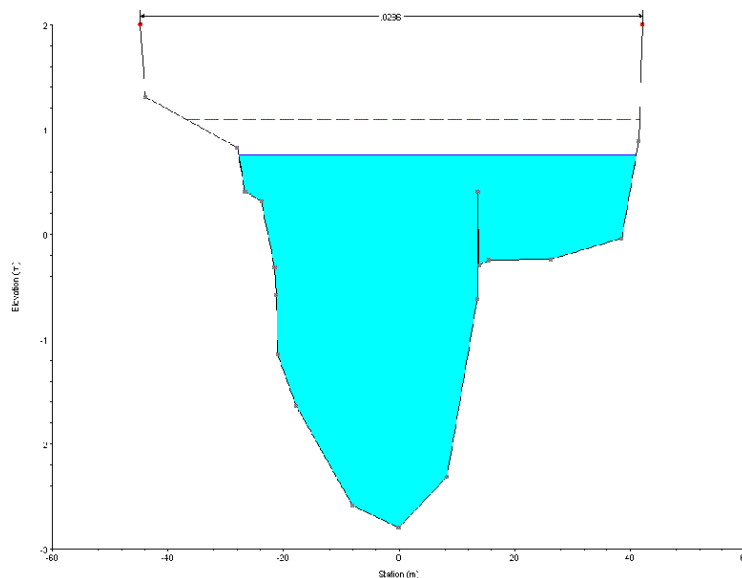


Figure IV.10.Exemple de section avec une hauteur d'eau

Le logiciel HEC-RAS permet de modifier énormément d'options pour pouvoir obtenir un modèle correct. On peut notamment modifier le coefficient de Strickler de chaque section, créer des ouvrages hydrauliques (seuils...), choisir diverses conditions limites aval ou conditions initiales, simuler à partir d'un hydrogramme de crue, ajouter des déversoirs, simuler des écoulements permanents ou non-permanents etc. Nous verrons plus en détails ces options lorsque nous expliqueront ce que nous avons fait dans chaque partie.:**[9,10,11,12]**

Cela nous mène donc à la seconde étape, une fois que la rivière est modélisée, on modélise un type d'écoulement : il peut être stationnaire ou non-stationnaire. La simulation d'un écoulement stationnaire permet de se donner une première idée des hauteurs d'eau et des débits dans la rivière pour un certain débit amont. La simulation d'un écoulement instationnaire est celle que nous avons le plus utilisé puisque nous avons simulé des crues qui sont par définition des phénomènes instationnaires. La méthode que nous avons principalement utilisée est l'utilisation d'un hydrogramme de crue à l'amont. Ensuite pour caler le modèle nous avons étudié les hauteurs d'eau sur deux sections : Lavalette à l'amont car il y a une station de mesure des hauteurs d'eau et Garigliano à l'aval pour la même raison ce qui permet de comparer les résultats. Voyons à présent les équations utilisées par HEC-RAS.:**[9,10,11,12]**

IV.232. Les équations de Saint-Venant 1D :

Le logiciel HEC-RAS utilise les équations de Saint-Venant 1D ("shallow water equations" en anglais) pour relier les hauteurs d'eau et les débits. Ces équations se déduisent des équations de Navier-Stokes grâce à des simplifications liées au modèle de la rivière.

A. Le cas stationnaire :

Comme nous l'avons dit dans la partie précédente, le maillage consiste en une succession de sections. Le logiciel calcul la hauteur d'une section à partir de la hauteur d'eau de la section précédente à l'aide de l'équation de conservation de l'énergie (conservation de la charge).

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

Où :

Z_1 et Z_2 : côte du canal principal,

Y_1 et Y_2 : Profondeur de l'eau au niveau des sections,

V_1 et V_2 : vitesses moyennes (débit total / surface totale d'écoulement),

a_1 et a_2 : coefficients de pondération de vitesse égale à 1,

g : L'accélération de la gravité,

h_e : perte totale d'énergie.

Le coefficient de pertes de charge h_e se calcule à l'aide de la formule suivante :

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

Avec : L la distance entre les deux profils, S_f la pente de la ligne d'énergie (pente de frottement) et C le coefficient d'expansion ou de contraction.

Pour calculer le débit on utilise l'équation de Manning $Q = K S_f^{1/2}$ avec $K = \frac{1.486}{n} A R_h^{2/3}$

Ou :

n : Coefficient de frottement de Manning,

A : Section mouillée,

R_h : Rayon hydraulique,

S_f : Pertes de charges entre les deux section.

On voit donc que le débit sur chaque section est calculé à partir de la hauteur d'eau puisque le rayon hydraulique, la section mouillée ainsi que les pertes de charge dépendent de la hauteur d'eau. On peut visualiser cette conservation de la charge à l'aide de l'image suivante: [9,10,11,12]

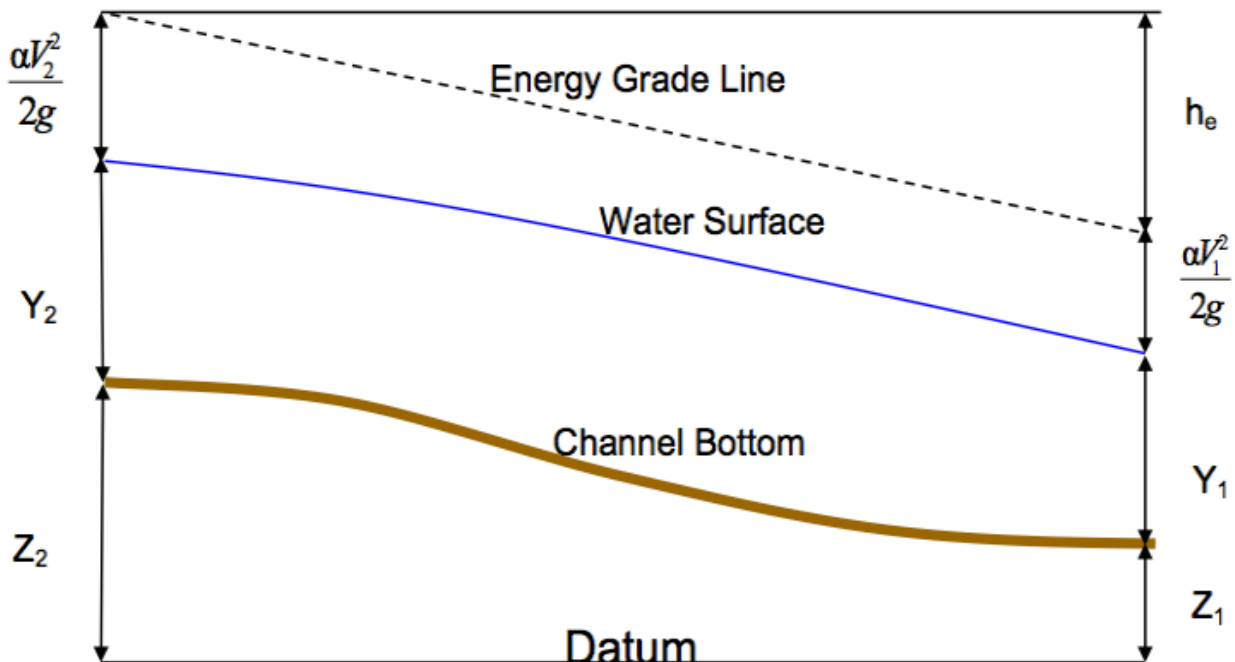


Figure IV.11. Conservation de la charge entre deux sections (source : HEC-RAS)

Pour obtenir des résultats satisfaisants il est nécessaire d'évaluer correctement les pertes de charges, et donc le frottement. Pour cela HEC-RAS découpe chaque section en

plusieurs domaines verticaux et évalue le frottement sur chacun de ces domaines. En effet le frottement dépend de la vitesse et on se doute bien que la vitesse n'est pas là même sur les bords, dans le lit majeur ou dans le lit mineur. Le découpage se fait comme sur l'image qui suit :

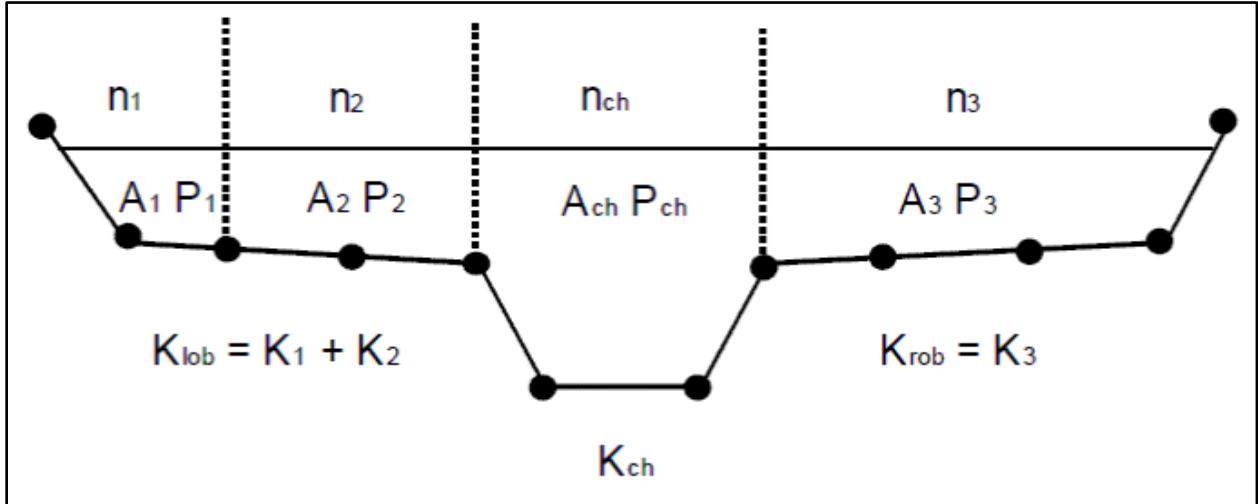


Figure IV.12. Découpage de la section pour le calcul du frottement (source : HEC-RAS)

B. Le cas instationnaire

Dans notre cas les études que nous avons faites étaient pour la quasi-totalité des études instationnaires puisque l'on modélisait des crues. La résolution sous HEC se fait alors différemment. Les équations utilisées cette fois-ci sont la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement. Ces équations correspondent en fait aux équations de Saint-Venant 1D. Pour obtenir ces équations on fait un bilan sur un petit volume de contrôle, comme sur l'image suivante :

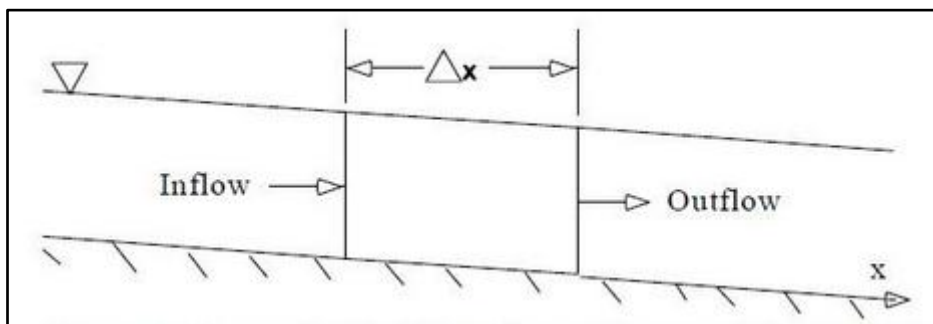


Figure IV.13. Petit volume de contrôle (source : HEC-RAS)

On obtient l'équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \dots \dots \dots (IV.3)$$

Avec : A_T la section, Q le débit et q_l le débit entrant latéral par unité de longueur.


L'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \dots \dots \dots (IV.4)$$

Avec : $\frac{\partial z}{\partial x}$ la pente de la hauteur d'eau, S_f la pente de la ligne d'énergie (pente de frottement), A la section et V la vitesse moyenne.

Pour résoudre ces équations, le logiciel utilise la théorie des différences finies qui est à la fois pratique et simple pour ce cas 1D. Il utilise un schéma implicite qui permet d'utiliser un pas de temps beaucoup plus important que dans le cas du schéma explicite.:[9,10,11,12]

IV.3. Application du logiciel HEC-RAS Cas non régime permanent 2D :

D'abord, créez un nouveau projet HEC-RAS. Ensuite, cliquez sur l'icône RAS Mapper . Dans le RAS Mapper, mettez en surbrillance l'option Terrains et cliquez avec le bouton droit de la souris. Ensuite, sélectionnez l'option Créer un nouveau terrain. Cela créera une fenêtre pour créer un système de référence spatiale comme Suit Sélectionner.

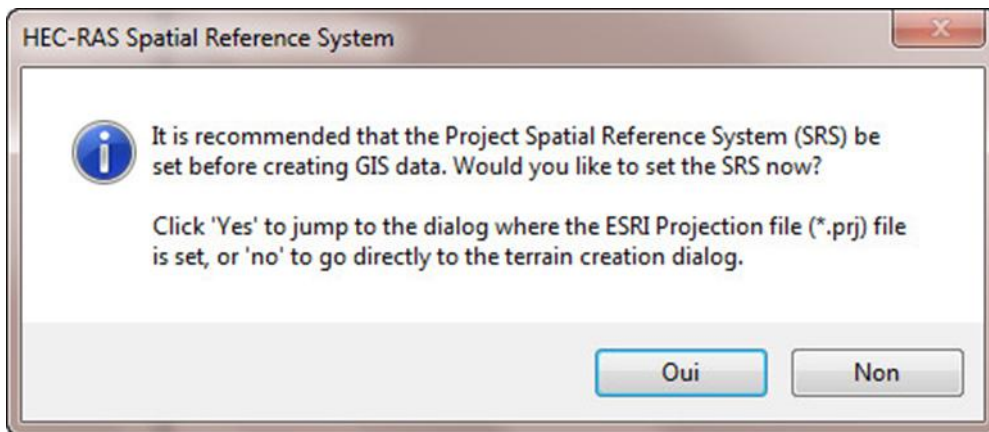


Figure IV.14. Système de référence spatiale

Sélectionnez l'option Non car les données Raster de la rivière Baxter que nous avons utilisées dans notre précédente Le didacticiel a déjà une projection. Cela se traduira par la fenêtre suivante pour un nouveau terrain Couche.

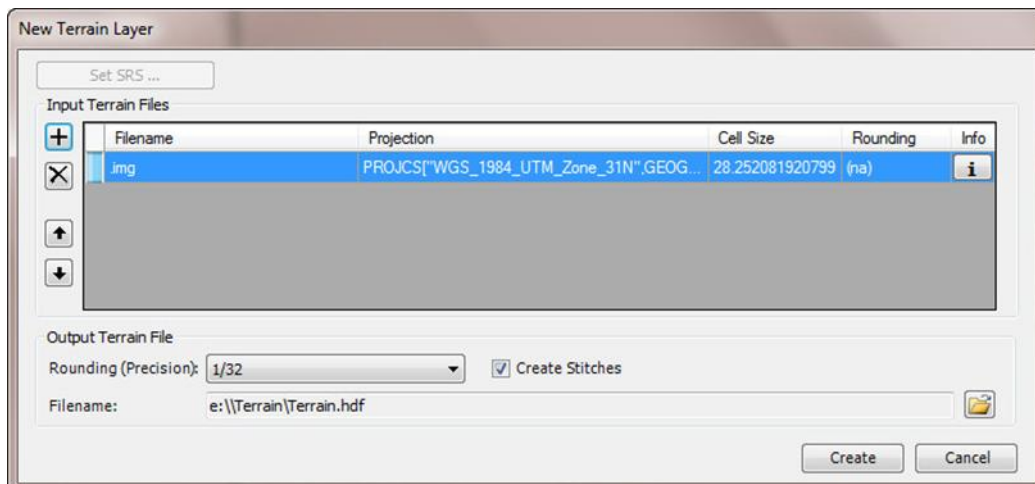


Figure IV.15.Nouveau terrain Couche

Dans la fenêtre ci-dessus, cliquez sur l'icône plus (+) et ouvrez les données raster dans l'annuaire Terrain / grille20 / grille 20 pieds. Le nom du fichier est w001001.adf. Cela va encore apporter une fenêtre.

Pour créer un système de référence spatiale. Maintenant, sélectionnez Oui. Notez dans la fenêtre que ce raster le fichier a une projection qui lui est associée. Maintenant, cliquez sur le bouton Créer comme suit.

Cela créera le terrain. Fermez la fenêtre résultante et n'oubliez pas d'enregistrer votre HECRAS projet. Maintenant, ouvrez le Mappeur RAS à nouveau et vérifiez la zone de terrain pour visualiser le terrain. Si là Le terrain n'est pas montré en surbrillance et vérifiez l'option du terrain et cliquez avec le bouton droit dessus. Sélectionnez le Option Zoom sur Layer et cela devrait afficher le terrain comme suit :

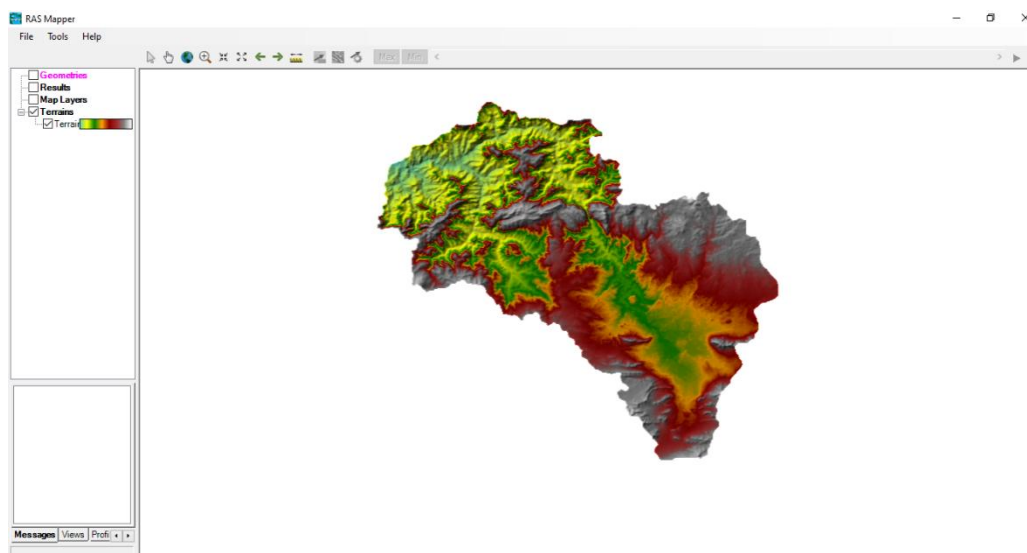



Figure IV.16.Mappeur RAS

Enregistrez votre projet HEC-RAS et ouvrez l'onglet Géométrie  et vous devriez pouvoir voir le terrain comme suit:

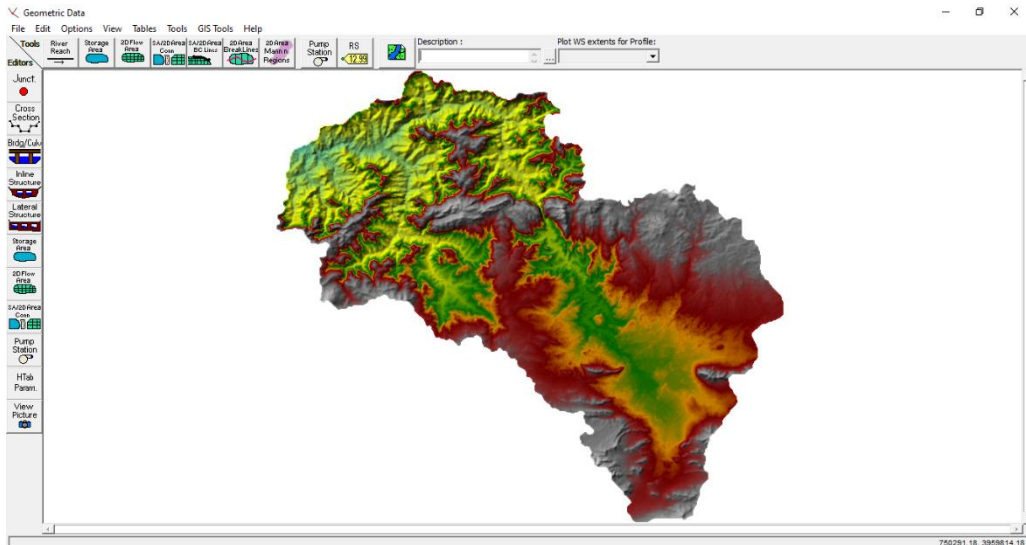


Figure IV.17. Données géométriques

Maintenant, vous pouvez commencer à ajouter des sections transversales et d'autres paramètres que vous avez appris dans le prétraitement de HEC-RAS. Parce que cette section est axée sur la modélisation 2D, nous utiliserons là l'icône 2DFlow Area, située en haut de la fenêtre Geometry. Sélectionnez maintenant La zone de votre domaine et lui donner un nom. Cliquez sur OK et maintenant vous avez le 2D Flow zone qui sera le domaine de la simulation 2D. Ensuite, sélectionnez la zone 2D que vous avez créée et faites un clic droit dessus et sélectionnez Modifier 2DFlow Area. Ensuite, cliquez sur "Générer le calcul points en intervalle régulier ... " Ensuite, utilisez un Dx et Dy égal à 20 ou 50. Cliquez sur Générer Les points dans la zone de flux 2D et le maillage seront créés.

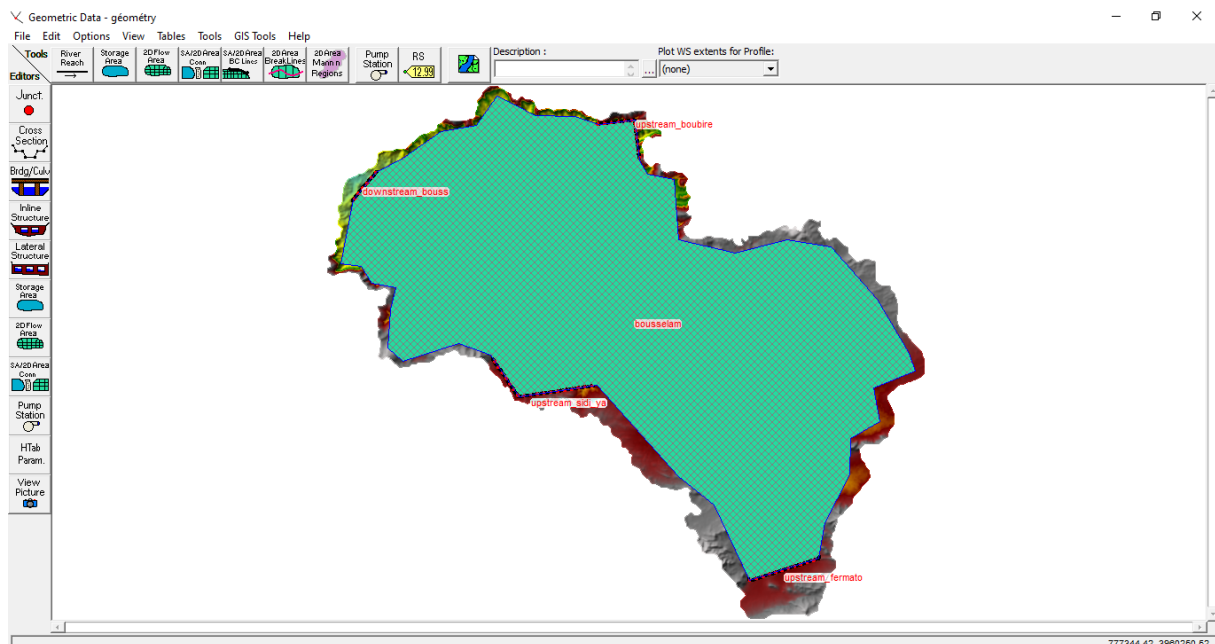




Figure IV.18. La zone de flux 2D et le maillage

Affectez un nom à l'image et enregistrez-le en tant que .jpg. Assurez-vous que la résolution de l'image n'est pas beaucoup plus élevée que la résolution de votre écran car cela donnera une erreur. Après vous ont exporté l'image dont vous avez besoin pour l'ajouter en tant que couche de carte. Pour ce faire, dans RAS Mapper mettez en surbrillance et vérifiez l'option Couches de carte et cliquez avec le bouton droit dessus. Ensuite, sélectionnez Ajouter des données cartographiques couches et recherchez l'image que vous avez exportée. Vous pouvez également ajouter diverses cartes existantes calques dans le mappeur RAS. Par exemple, Google Map peut être exporté sous forme de TIF et JPEG. À Sélectionnez l'image de fond à afficher dans la fenêtre  géométrique, utilisez l'icône . Par exemple, deux figures avec différentes images d'arrière-plan sont présentées ci-dessous

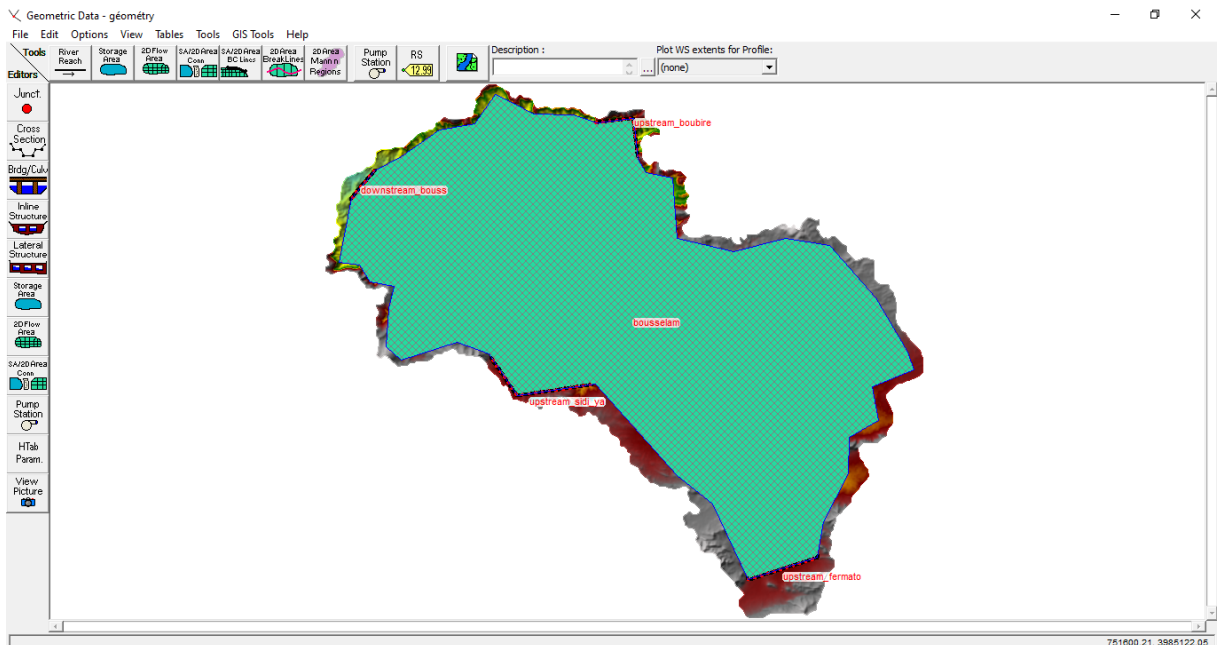




Figure IV.19. Importation de l'image à partir la fenêtre géométrique

Avant de créer les limites, il est préférable de modifier votre zone de flux 2D, en particulier des limites. Pour ce faire, dans l'onglet Géométrie.  Utilisez l'option modifiée pour ajouter des points, déplacer des points et supprimer des points. Maintenant, vous pouvez créer les lignes de délimitation à  l'aide de l'icône. Pour la rivière Upstream Baxter, le ruisseau tulle en amont et la rivière Downstream Baxter. La figure ci-dessous est pour la rivière Upstream Baxter. Assurez-vous que les lignes frontières en amont sont pas en dehors du canal principal de la rivière car cela donnera une zone d'inondation irréaliste. Assurez-vous également que les lignes de délimitation sont perpendiculaires au sens d'écoulement.

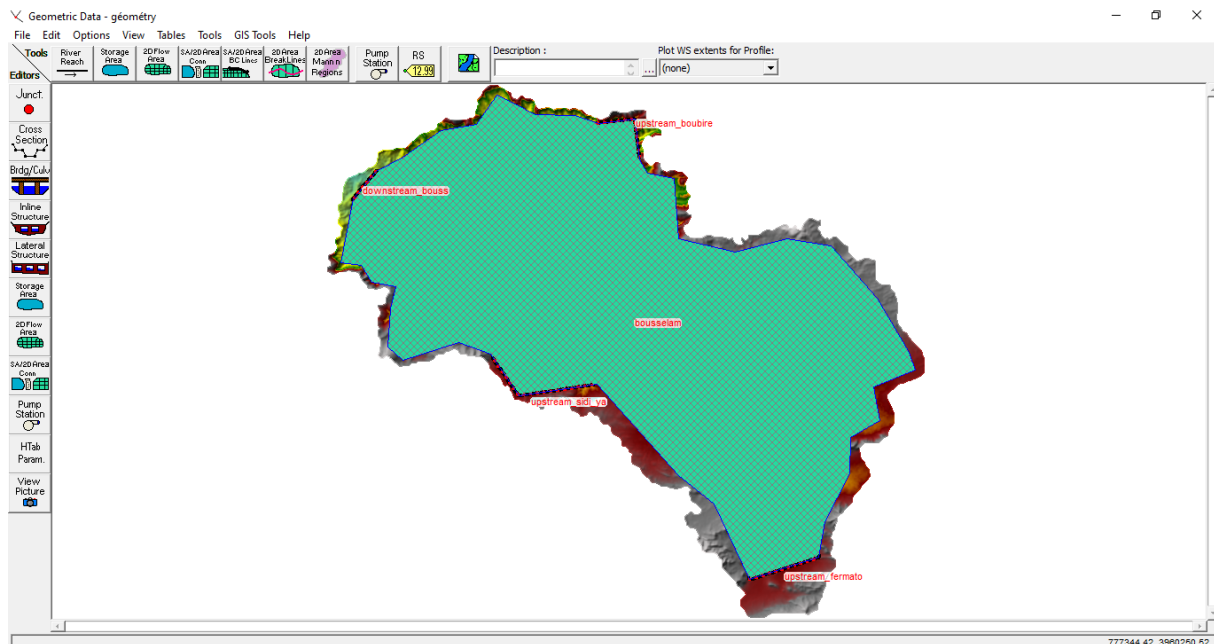


Figure IV.20. La ligne de délimitation en aval

Une fois que vous avez modifié les limites, vous voudrez peut-être reconstruire votre maillage. Une fois que c'est complet enregistrez vos données de géométrie et commencez à ajouter les conditions aux limites comme d'habitude (Édition / données de flux non stables). Vous pouvez utiliser les mêmes conditions de contribution que le 1D Unsteady Flux de données. Pour copier ces données, vous pouvez ouvrir une autre instance de HEC-RAS et copier les données directement (utilisez Ctrl "C" et Ctrl "V"). Maintenant, vous pouvez créer le plan avec les dates et paramètres de la simulation. Maintenant, vous devriez pouvoir exécuter le modèle.

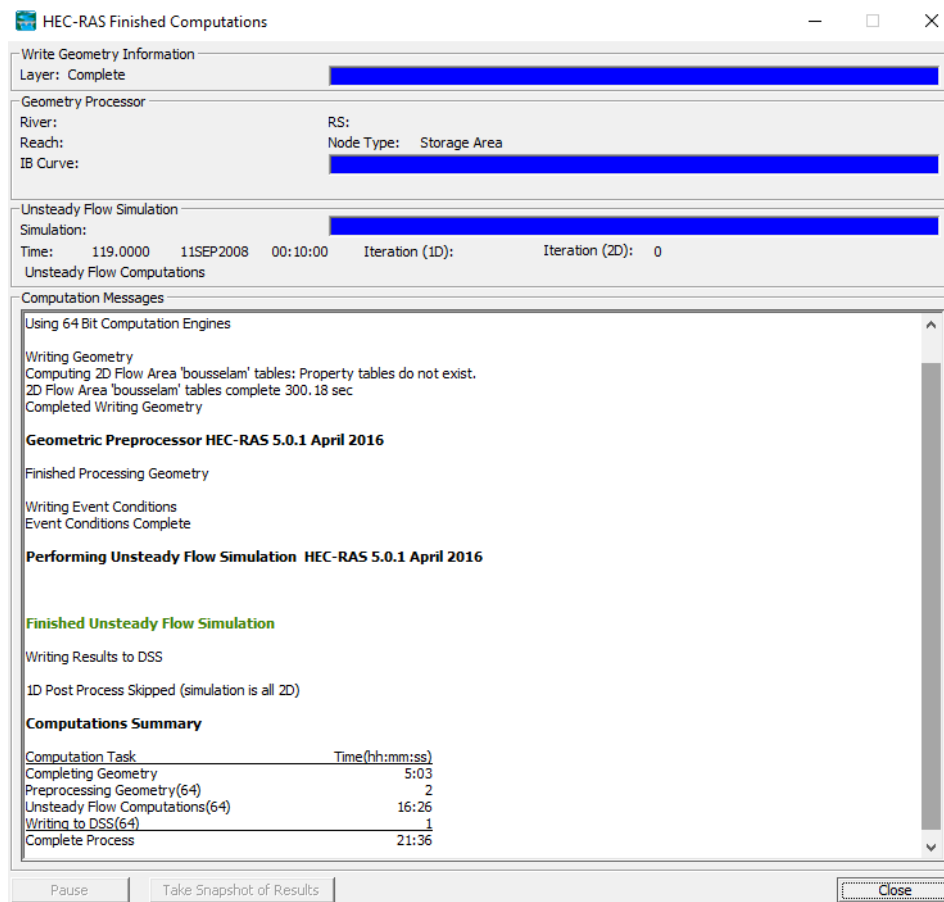
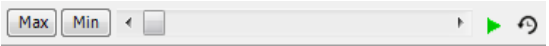


Figure IV.21.Fenêtre de la simulation

Une fois le modèle exécuté, la visualisation est effectuée dans RAS Mapper en cochant la case Résultats. Ici, vous souhaitez animer la profondeur de l'eau, la vitesse ou l'élévation de la surface de l'eau. Les résultats à différents moments peuvent être visualisés en faisant défiler l'onglet suivant vers la gauche ou  vers la droite.

L'onglet ci-dessus se trouve dans le coin supérieur droit de la fenêtre du Mappeur RAS. Les deux figures ci-dessous montrent des instantanés de profondeur d'eau et de vitesse, respectivement.

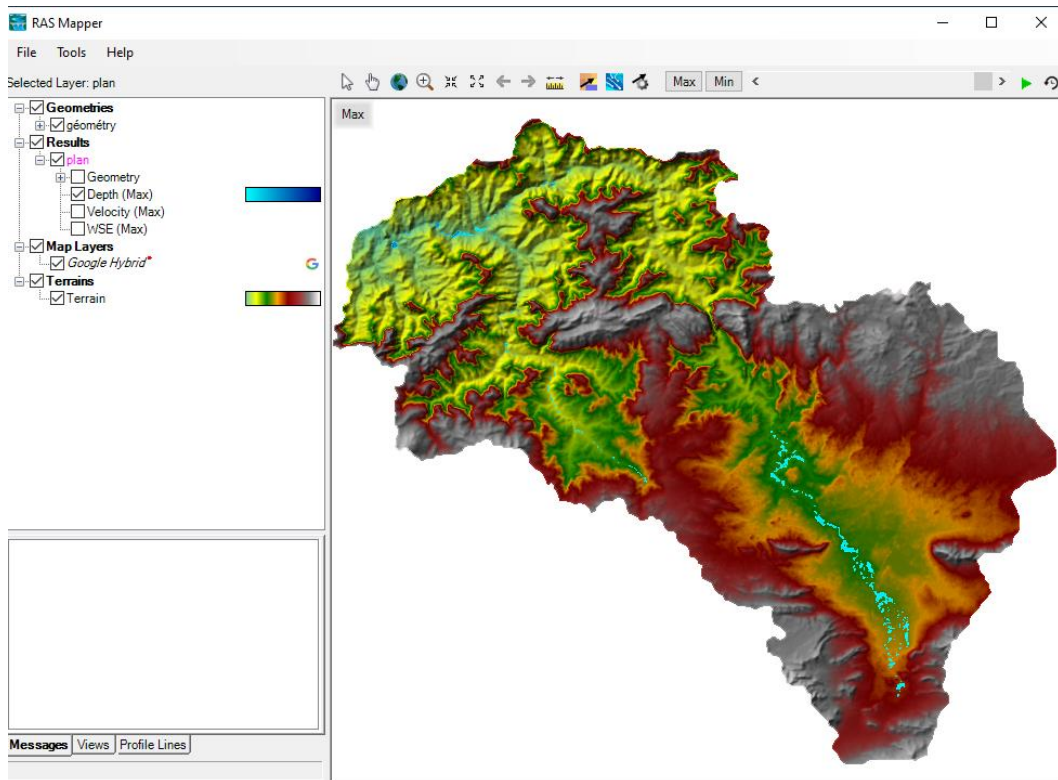


Figure IV.22. L'élévation du plan d'eau $T = 10$ ans

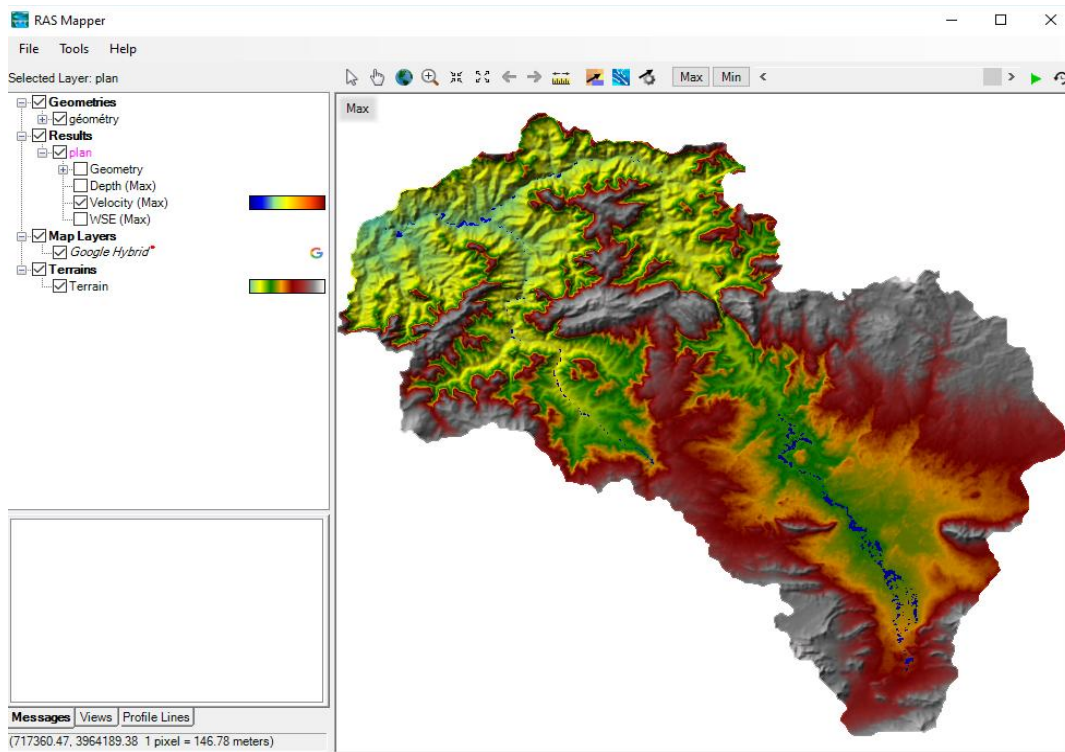




Figure IV.23. Vitesse de l'écoulement $T = 10$ ans

Si vous souhaitez visualiser le traçage des particules, vous pouvez utiliser l'icône . Puis cliquez sur l'icône  Pour sélectionner les paramètres du traçage. Voici un instantané du traçage des particules.

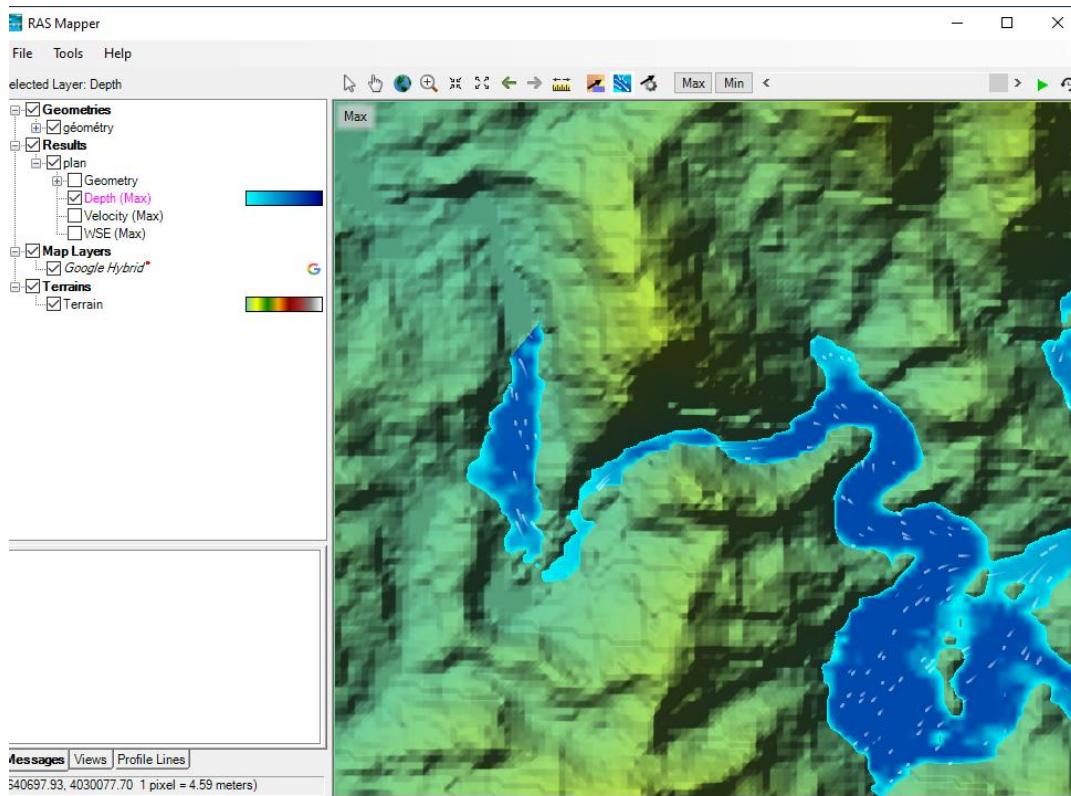


Figure IV.24. Les lignes de courant T = 10 ans

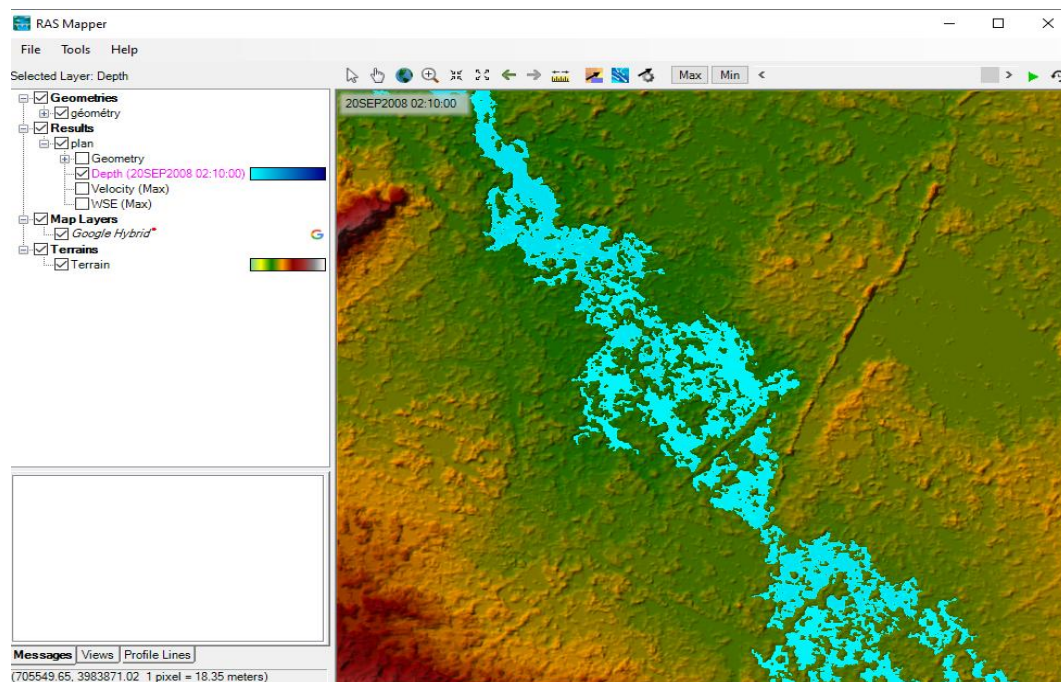


Figure IV.25. La zone inondable de la ville Draa El Miaad T = 10 ans

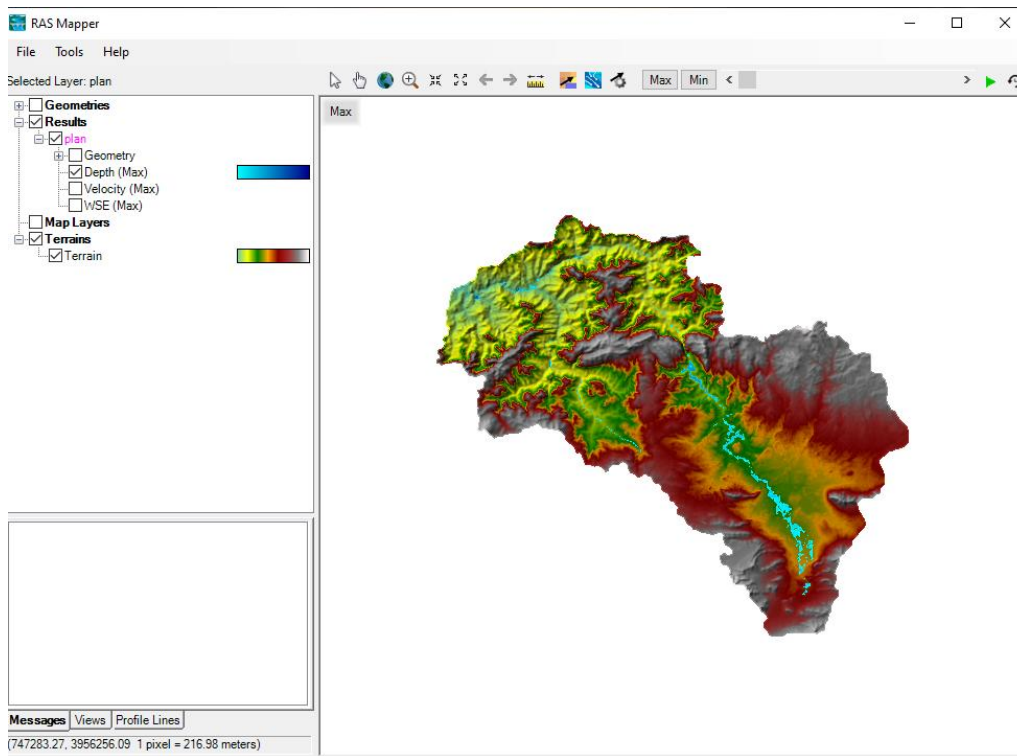


Figure IV.26. L'élévation du plan d'eau T = 50 ans

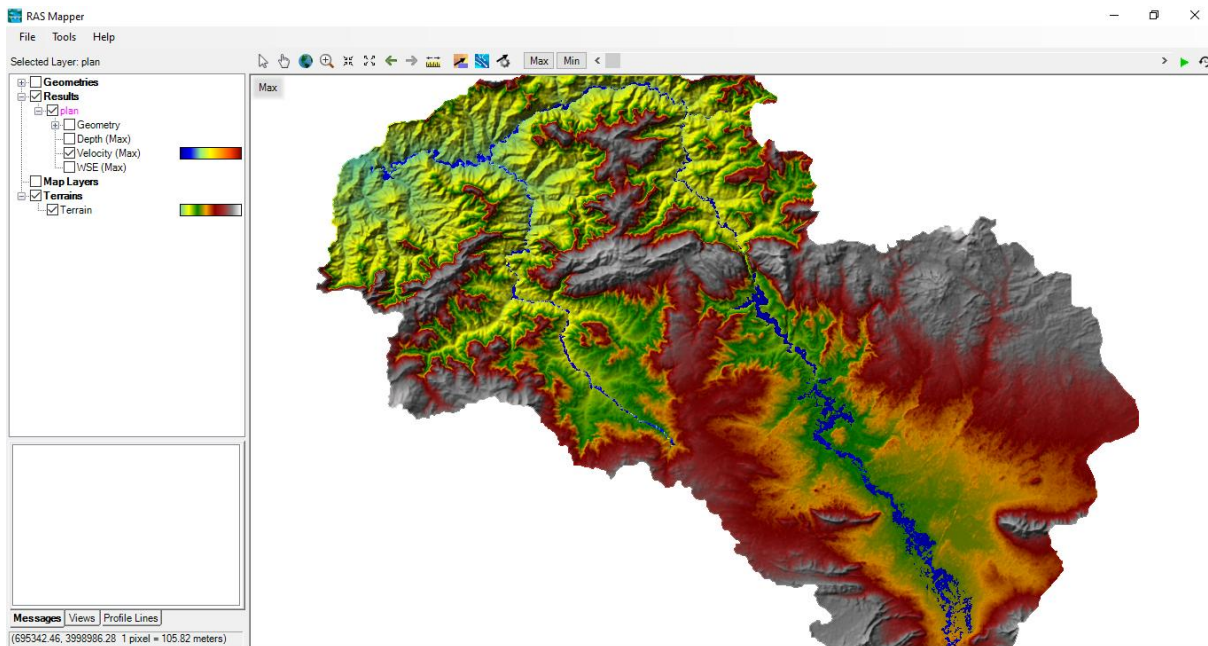


Figure IV.27. Vitesse de l'écoulement T = 50 ans

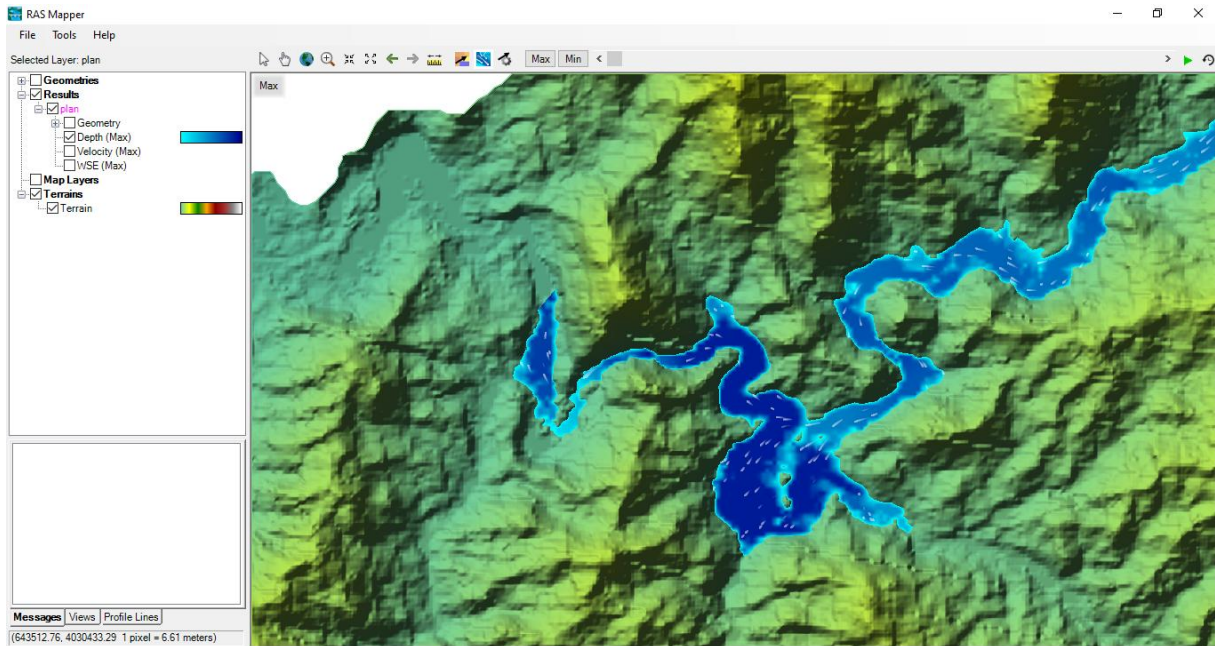


Figure IV.28. Les lignes de courant T = 50 ans

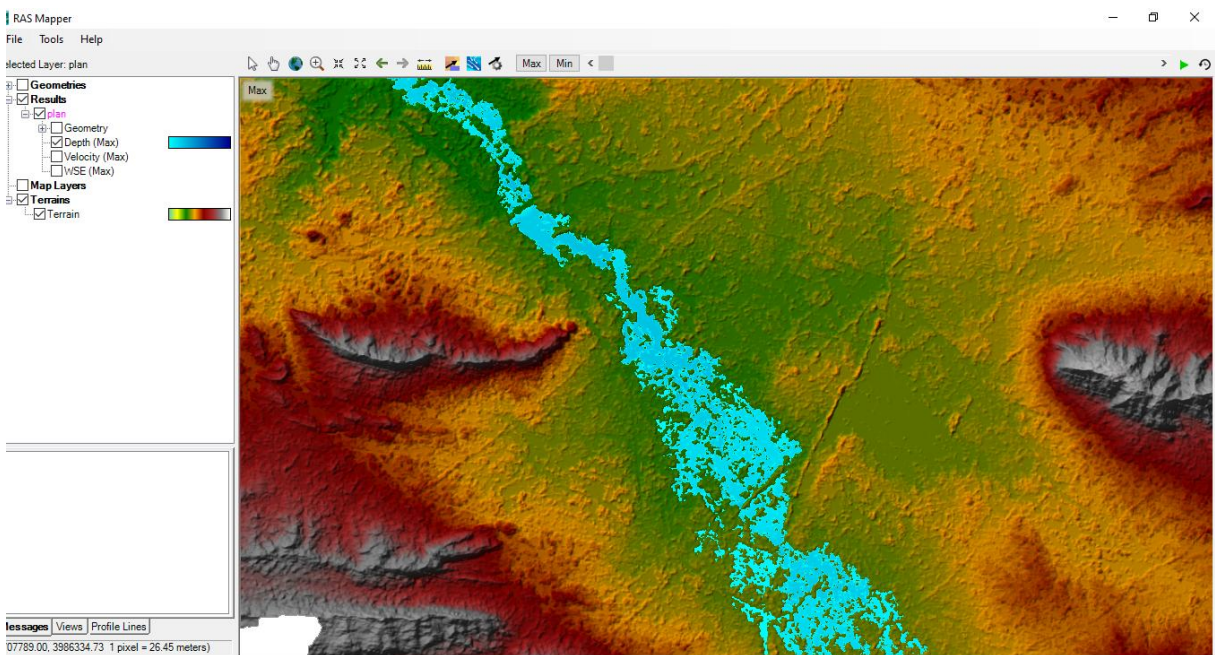


Figure IV.29. La zone inondable de la ville Draa El Miaad T = 50 ans

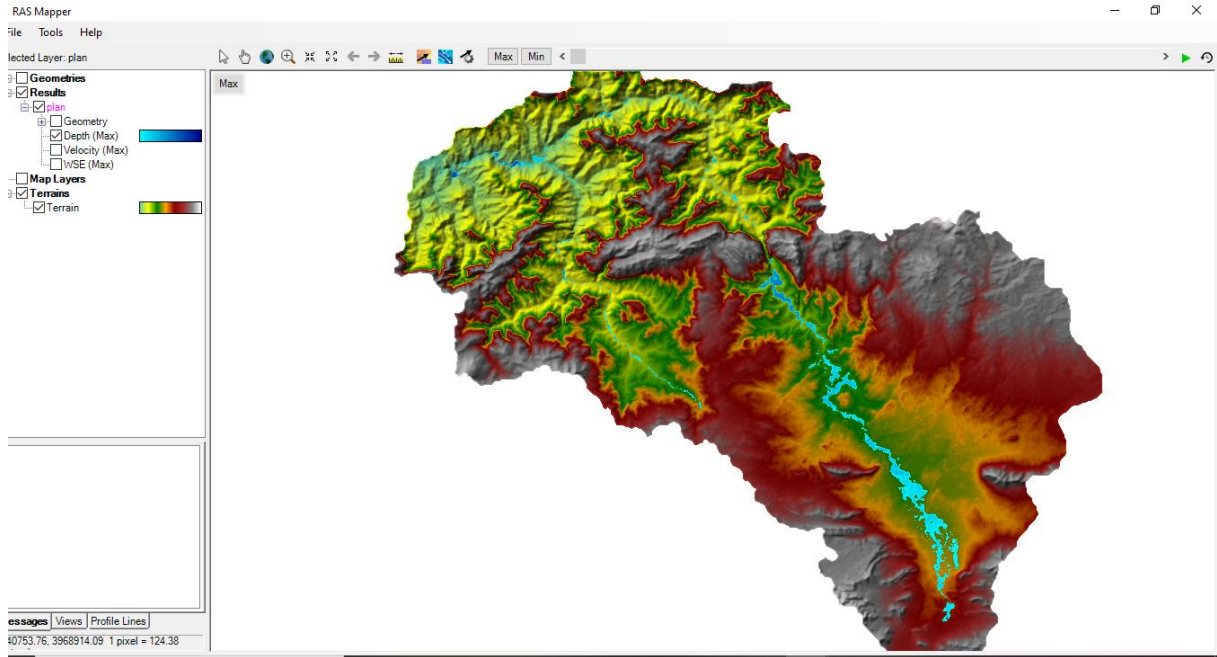


Figure IV.30. L'élévation du plan d'eau $T = 100$ ans

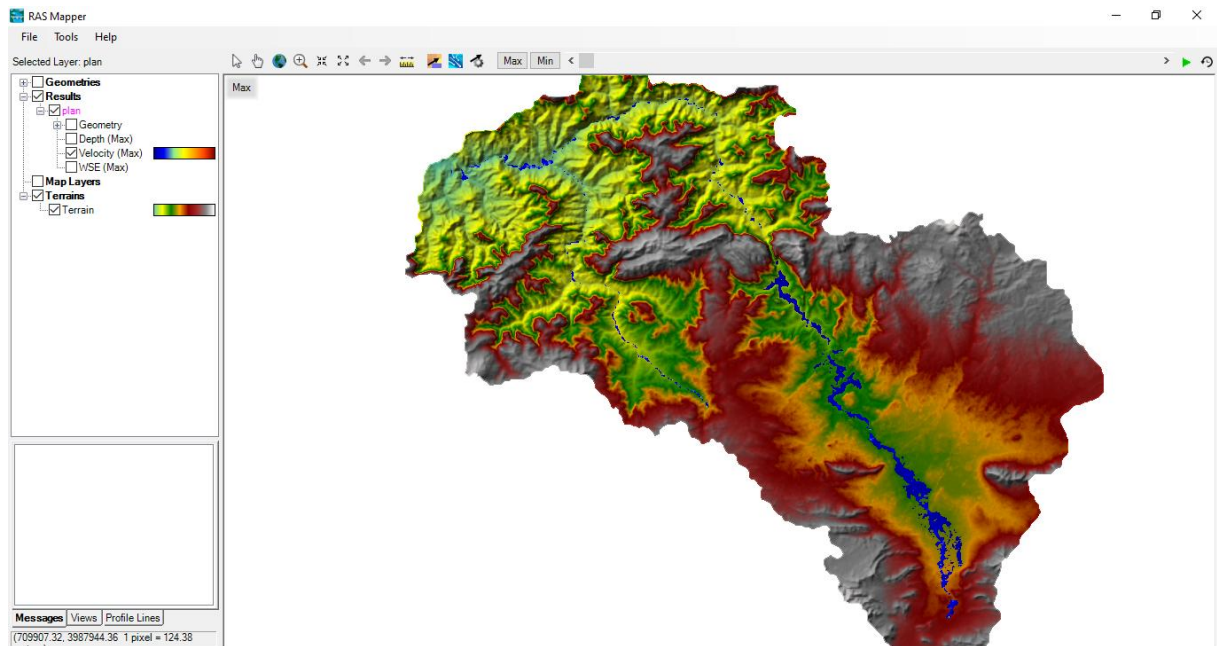


Figure IV.31. Vitesse de l'écoulement $T = 100$ ans

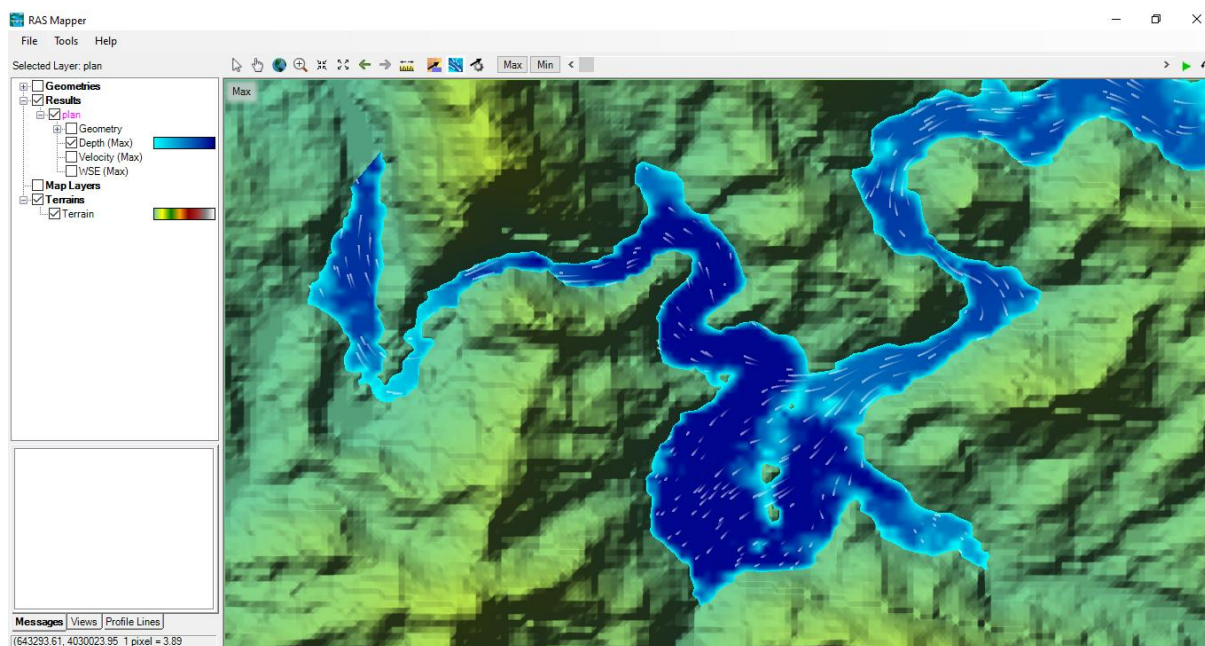


Figure IV.32. Les lignes de courant $T = 100$ ans

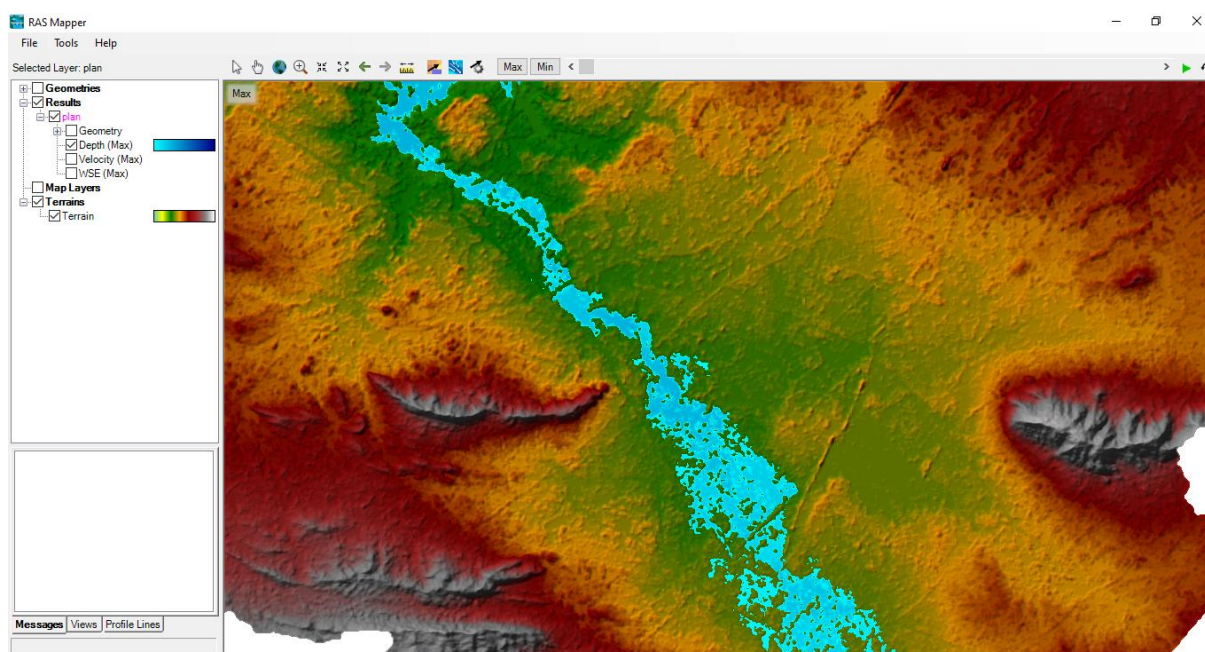


Figure IV.33. La zone inondable de la ville Draa El Miaad $T = 100$ ans

IV.4. Les aménagements de protection contre les inondations

Les ouvrages de génie civil constituent un patrimoine qu'il est nécessaire de maintenir, ce qui permet d'assurer la sécurité des biens et des personnes aussi garantir le fonctionnement et la pérennité des ouvrages sur le long terme sont les priorités. Il est donc essentiel de s'intéresser à la performance de ces ouvrages. Les ouvrages de protection peuvent être répartis en deux groupes : directes et indirectes.:[9,10,11,12]

IV.4.1. Protection directe (Rapprochées) :

La protection directe consiste à intervenir directement sur le site menacé par la mise en œuvre des actions suivantes :[9,10,11,12]

- **Curage** : qui permet une nette amélioration des conditions d'écoulement suite à l'élimination de tous les obstacles et les dépôts entravant l'écoulement des eaux dans le cours d'eau. Le débroussaillage est également nécessaire à la traversée des agglomérations pour des raisons sanitaires et en sections courantes pour diminuer la rugosité et accroître la débitante.
- **Recalibrage** : qui permet d'élargir et d'approfondir les sections des cours d'eau pour augmenter leur capacité d'évacuation des eaux et assurer une section mouillée répondant aux critères de protections désirées.
- **Renforcement des ouvrages** : de franchissements des Oueds et modification de leurs caractéristiques et des systèmes existants en cas de leur insuffisance (ponts, dalots, buses...).
- **Réalisation des canaux** : permettant de régénérer le couloir initial de l'oued. Cette solution est indispensable dans le cas où le lit de l'oued et son domaine hydraulique ont été complètement occupé par des bâtiments ou par la voirie.
- **Protection des berges** : qui comprend tout ouvrage visant à maintenir la stabilité des terres en dépit de l'action de l'eau. Les berges sont en effet attaquées par des courants perturbateurs générés par les crues. De même, les terres glissent par suite de l'infiltration de l'eau après le retrait de la crue. La protection des berges est également nécessaire au voisinage de certains ouvrages tels que les ponts.
- **Endiguement des oueds** : par la réalisation de digues qui longent le cours d'eau sur ses deux berges. Cette opération est aisément réalisable par les ressources locales en main-d'œuvre et en matériaux. Par ailleurs, ce type de protection permet en outre de réaliser une protection sélective. Il peut en effet être établi graduellement en commençant par mettre à l'abri, de la plupart des crues, la partie la plus riche et la plus peuplée des zones exposées. En contrepartie on notera que ce procédé de protection présente l'inconvénient de provoquer une surélévation souvent notable du niveau des eaux et rend en outre plus difficile le drainage des terrains bas.[10,11,12]

IV.4.2. Protection indirecte (Eloignées)

La protection indirecte par contre, consiste à intervenir plus loin des sites menacés, à l'extérieur du périmètre d'aménagement, en réalisant des ouvrages sur les oueds responsables des inondations :

- **Création des canaux périphériques** : de dérivation des eaux vers les oueds permettant de les restituer vers des zones situées en dehors des aires à protéger. Cette déviation pourrait concerner une partie ou la totalité des eaux d'un oued vers un autre.
- **Réalisation des barrages** : ou seuils pour stockage et laminage des crues à l'amont des zones menacées. Le volume et la capacité de laminage du barrage devront être optimisés de manière à répondre au-mieux à la protection envisagée.
- **Aménagement des bassins versants** : contre l'érosion par des méthodes biologiques et/ou par la construction de seuils en gabions qui permettent la réduction des vitesses d'écoulement et le dépôt des sédiments en amont.

L'ouvrage d'aménagement qui doit être mis en étude pour protéger la ville de Draa El Miaad contre le débordement de l'Oued Bouselam est l'endiguement de ce dernier par la réalisation d'une digue. Donne une section transversale d'une digue type :

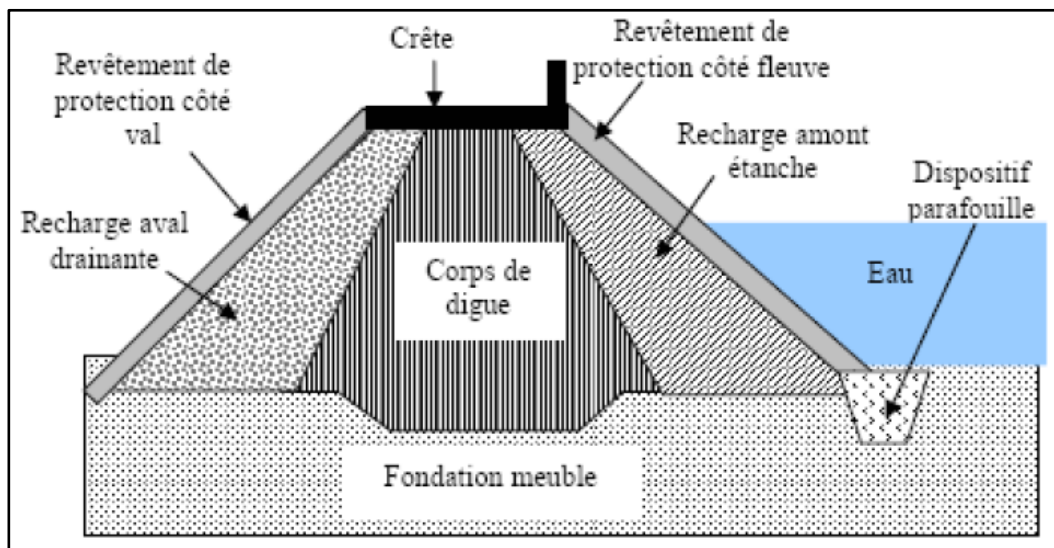


Figure IV.34. Coupe type de digue[13]

IV.5. Conclusion

La réalisation et l'étude de la modélisation hydraulique d'Oued Bouselam qui coule de la wilaya de Béjaia permet de faire le diagnostic de cette zone d'étude pour tout événement hydraulique. Cette simulation consiste à calculer les hauteurs d'eau et déterminer les zones de débordement en utilisant le Système d'Information géographique « SIG » et le logiciel de modélisation de rivières HEC-RAS qui permettent de reproduire l'état de la zone naturelle à l'état numérique.

Conclusion générale

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 synthétiques mono-fréquence 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 fournir les courbes de tarages locales nécessaires au calcul de la vulnérabilité. Cette simulation unidimensionnelle ou l'écoulement à surface libre non permanent est décomposée en écoulement dans le canal principal et écoulement dans les plaines d'inondation actives.

Le choix du logiciel HEC-RAS pour effectuer cette simulation hydraulique est conditionné par la nature des données topographiques qui existent, car cette composante sert en entrée du modèle hydraulique comme condition à la limite, et comme une composante cartographique nécessaire à la représentation spatiale de l'aléa.

La cartographie sert à représenter les résultats de l'hydraulique, c'est-à-dire la variable caractérisant l'aléa et de la socio-économie, c'est-à-dire la variable caractérisant la vulnérabilité. La cartographie de ces deux variables aboutit à une carte de répartition spatiale du risque le long du cours d'eau.

La carte du risque d'inondation devrait pouvoir servir de base de connaissance nécessaire à la mise en place d'un système d'aide à la gestion pour que les aménagements préconisés puissent être testés et analysés dans le contexte global du bassin versant. En matière d'aménagement, le ralentissement dynamique consiste à utiliser autant des solutions qui visent à ralentir l'eau mais uniquement aux périodes les plus critiques, c'est-à-dire pendant les événements de crues eux-mêmes soit limités à quelques heures ou quelques jours.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : BRAVARD J.P. et F. PETIT, (1997) Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial , Armand Colin, Paris, 213 p.
- [2] : CRED. (2007), Bilan des catastrophes naturelles dans le monde de 1975 à 2004, The OFDA/CRED International DisasterDatabase", Université Catholique de Louvain, Bruxelles, Belgique.
- [3] : (Office Fédéral des Eaux et de la Géologie- OFEG, 2001).
- [4] : Direction de la Prévention des pollutions et des risques - Sous-direction de la Prévention des risques majeurs - Cellule Retour d'expérience 20, avenue de Ségur, 75302 Paris 07 SP.
- [5] : (DGPC) Direction Générale du Protection Civil, Algérie, 2007.
- [6] BOUDOUKHA A., et All, (2003-2005)- étude des paramètres naturels (évaporation et débits solide) et artificiels (pollution urbain et artificielle) influents sur la qualité des eaux de surface du grand constantinois, Univ-Batna, 16 p.
- [7] : Henine, H. « Interfaçage entre un modèle hydrologique / modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG. Magister ». ENP. Alger, 2004.
- [8] : www.sigea.educagri.fr.
- [9] ABDELKEBIR, R. (2018). Contribution à la méthodologie des études de protection contre les inondations par l'utilisation d'ARC GIS, HEC GEO RAS et HEC RAS. Cas de la ville de Mouilha. W. M'sila (Master en Hydraulique, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).
- [10] Mohammed Ali, Abdelkebir, B (2017). Protection contre les inondations par l'utilisation d'ARC GIS, HEC GEO RAS et HEC RAS. Cas de la ville d'El-Kseur W. Bejaia (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [11] Mokhtari E, Berghot A, 2019.Estimation of C-Factor for soil erosion modeling using NDVI in Boussellam watershed ALGERIA.The First International Conférence on Water and Climate 08th -09th October 2019.
- [12] Abdelkebir Brahim, Mokhtari Elhadj Maoui A, 2018.Flood protection by the use of ARC GIS, HEC GEO RAS and HEC RAS. Case of the city of El-Kseur W. Bejaia. International Water Forum Conference IWFC 2018 Hammamet, 181-184

[13] : Serre, D. « Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations .Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique ». Thèse de Doctorat des Sciences de l'Information Géographique. Univ. Marne-La-Vallée, 2005.

[14] Mokhtari E2018. Évaluation de l'érosion des sols par le modèle RUSLE à l'aide de la télédétection et du SIG - Étude de cas du bassin de Boussallam Algérie. Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement ...