

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÉRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
Département d'Hydraulique

Filière : Hydraulique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour Obtenir le Diplôme de Master

Spécialité : Ouvrages Hydrauliques

Thème

Evaluation comparative des débits de crue à l'exutoire de bassins versants à l'aide du modèle HEC-HMS et la méthode empirique de Turraza.

Réalisé par :

Mlle HABI Ouardia

Mlle MESSAOUDENE Dassiné

Soutenu devant le jury composé de :

<i>NOM et Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Lieu d'exercice</i>	<i>Qualité</i>
<i>M. KHATTAOUI Mohammed</i>	<i>Professeur</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Promoteur</i>
<i>M. ZAMOUM Saïd</i>	<i>MCB</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Président</i>
<i>Mme LEBDIRI Fatiha</i>	<i>MCB</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Examinatrice</i>

Date de soutenance : le 23/06/2025

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la santé, la patience, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

*Nous exprimons notre sincère gratitude à **Monsieur KHATTAOUI Mohammed**, directeur de mémoire, pour son encadrement attentif, sa disponibilité et ses conseils précieux qui ont grandement contribué à la réussite de ce projet.*

*Nous remercions également **Monsieur ZAMOUM Said**, pour son soutien dans la collecte des données et l'initiation à divers logiciels, qui ont largement contribué à l'avancement du travail et à l'enrichissement de notre expérience.*

*Nos remerciements vont aussi à **DAMELASH Wondimagegnehu**, Professeur à l'Arba Minch University (AWTI, Éthiopie), et à **ABSI Rafik**, Professeur à l'ECAM-EPMI, CY Cergy Paris Université, pour leur collaboration et leur contribution enrichissante.*

*Nous adressons notre profonde reconnaissance à **tous les enseignants** qui, par la transmission de leur savoir, ont contribué à faire de nous des diplômées en **Master Ouvrages Hydrauliques**. À chacun d'eux, nous exprimons, mon binôme et moi, notre gratitude la plus sincère.*

*Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel administratif et pédagogique de **l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**, pour leur appui tout au long de notre formation.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements aux **membres du jury** pour avoir accepté d'examiner notre travail et de participer à notre soutenance. Nous sommes honorés de leur présence et reconnaissants du temps qu'ils consacrent à l'évaluation de notre projet.*

Enfin, nous remercions sincèrement nos familles et nos amis pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur présence bienveillante tout au long de cette aventure.

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire, fruit de longues années d'efforts, d'apprentissage et de sacrifices à :

Mon père, qui a sacrifié toute sa vie pour notre bien-être et notre avenir.

Ma mère, dont l'amour, le soutien et les prières silencieuses ont éclairé chacun de mes pas.

Sans vous, mes parents, je ne serais rien aujourd'hui.

Mes deux frères, Tarik et Lyes, deux âmes chères à mon cœur.

Ma petite sœur Alicia, source de joie, merci d'être toujours à mes côtés.

Mes grands-parents maternels, à qui j'exprime toute ma gratitude et mon profond respect.

Que Dieu vous préserve et vous accorde santé et sérénité.

Mes cousines Sandra et Ouardia, mes sœurs de cœur.

Ma chère Mina, ma meilleure amie et confidente, merci d'être toujours là, avec ton cœur immense et ton écoute infinie.

Tous mes amis qui m'ont encouragée et soutenue.

Sans oublier mon binôme, M. Dassine : merci pour tous les efforts partagés tout au long de ce travail.

Ouardia

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire, fruit de longues années d'efforts, d'apprentissage et de persévérance à :

Mon père, pour ses sacrifices inestimables, son travail acharné et sa présence silencieuse mais constante.

Ma mère, pour son amour inconditionnel, ses prières discrètes et son soutien indéfectible, même dans l'ombre.

Sans vous, mes parents, rien n'aurait été possible.

Mon frère Aris, et à mes deux sœurs, Dimya et Dyhia, qui m'ont toujours soutenu(e) avec affection et bienveillance.

La mémoire de mes grands-parents paternels et maternels : que Dieu vous accorde Sa miséricorde et la paix éternelle.

Mes chers oncles et tantes, à mes cousins et cousines, pour leurs encouragements, leur confiance et leurs mots réconfortants.

Mon oncle Younes et à mon cousin Yanis, partis trop tôt, mais jamais oubliés. Leur souvenir m'accompagne chaque jour. Que Dieu leur fasse miséricorde.

Ma chère Sophie, ma meilleure amie, merci d'avoir toujours été là, avec ton cœur généreux, ta présence fidèle et ton écoute précieuse.

Sophie, ma cousine au grand cœur, amie d'enfance et sœur de cœur, ma confidente fidèle, merci d'avoir marché à mes côtés avec douceur, loyauté et bienveillance.

Mon précieux binôme H. Ouardia, partenaire exemplaire et amie de confiance, merci pour ton écoute, ton soutien à chaque étape de ce mémoire. Sans toi, cette expérience n'aurait pas été la même.

Tous ceux qui m'ont aidé, soutenu ou inspiré, de près comme de loin, durant cette aventure.

Dassine

Résumé

Ce mémoire porte sur l'évaluation comparative des débits de crue à l'exutoire de trois bassins versants (Azazga, Hamiz et Oued Zeboudj), à partir de données pluviométriques. Deux approches ont été utilisées : la méthode empirique de Turraza et la modélisation hydrologique à l'aide du logiciel HEC-HMS. L'étude repose sur l'analyse des caractéristiques morphologiques des bassins, obtenues à partir de MNT, ainsi que sur la simulation des débits de crue. Les résultats issus des deux méthodes ont été comparés afin d'évaluer la performance du modèle HEC-HMS dans l'estimation des débits de pointe. Cette démarche permet de mieux comprendre la réponse hydrologique des bassins étudiés et d'optimiser la gestion des risques liés aux crues.

Mots-clés : Bassin versant, Débit de crue, HEC-HMS, Méthode de Turraza, Modélisation hydrologique.

Abstract

This thesis focuses on the comparative evaluation of flood discharges at the outlet of three watersheds (Azazga, Hamiz, and Oued Zeboudj), based on rainfall data. Two approaches were used: the empirical Turraza method and hydrological modeling using the HEC-HMS software. The study is based on the analysis of the morphological characteristics of the watersheds, obtained from a Digital Elevation Model (DEM), as well as the simulation of flood discharges. The results from both methods were compared in order to assess the performance of the HEC-HMS model in estimating peak discharges. This approach contributes to a better understanding of the hydrological response of the studied watersheds and helps improve flood risk management.

Keywords: Watershed, Flood discharge, HEC-HMS, Turraza method, Hydrological modeling.

Liste des abréviations

IDF	Intensité-Durée-Fréquence
K _G	coefficient de compacité de Gravilius
P	Périmètre du bassin versant.
S	Surface du bassin versant
L	Longueur de rectangle équivalent
l	Largeur de rectangle équivalent
H _{moy}	Altitude moyenne du bassin versant
S _t	Surface totale du bassin versant
S _i	La surface comprise entre deux courbes de niveau
H _i	Altitude moyenne entre deux courbes de niveau
L _{cp}	longueur du cours d'eau principal
I _{moy}	la pente moyenne du bassin
I _p	indice de pente de roche
H _{max}	L'altitude maximale
H _{min}	L'altitude minimale
I _g	indice de pente globale
H ₅	altitude correspondant à 5% de la surface totale du bassin
H ₉₅	altitude correspondant à 95% de la surface totale du bassin
D _s	dénivelée spécifique
I _g	indice de pente globale
T _C	Temps de concentration
D _d	densité de drainage
L _i	longueur de cours d'eau
D _h	densité hydrographique
$\sum N_i$	Nombre de cours d'eau.
R _c	rapport de confluence
N _i	le nombre de tronçons de cours d'eau d'ordre i
n	l'ordre total.
C _T	Rapport de torrentialité
F ₁	La fréquence des talwegs d'ordre 1.
N ₁	le nombre de tronçons de cours d'eau d'ordre 1.
I _{moy}	intensité moyenne de la pluie

Liste des abréviations

h	hauteur de pluies de l'averse
t	durée de l'averse
$I_T(t)$	Intensité de pluviométrie d'une averse
a	paramètre d'ajustement en fonction du temps de retour de la région d'étude.
b	paramètre d'ajustement en fonction du temps de retour de la région d'étude.
A	Constantes empiriques dépendant de la période de retour et de la région.
B	Constantes empiriques dépendant de la période de retour et de la région.
ORSTOM	l'Office de Recherche Scientifique d'Outre-Mer
CNFNH	Cadre National pour la Fréquentabilité des Hautes eaux
Q_{\max}	débit maximal de la crue
α	Coefficient de ruissellement ou coefficient d'écoulement du bassin versant
U	Coefficient qui est fonction des unités choisies.
λ	Coefficient caractérisant la morphologie du bassin
\bar{H}	module pluviométrique moyen annuel.
P	Hauteur totale maximale des précipitations
λ	Coefficient caractérisant la longueur du thalweg
P_{24}	Pluie maximale d'une durée de 24 heures
L_T	Longueur du thalweg
S_m	Surface de la partie montagneuse
S_p	Surface de la partie plate
MNT	Modèle Numérique de Terrain
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System.
USACE	United States Army Corps of Engineers
SCS	Soil Conservation Service.
SMA	Soil Moisture Accounting
RMS	Root Mean Square
CN	Curve Number
CN_{moy}	Curve Number moyen pondéré
CN_i	valeur du Curve Number pour l'occupation du sol i

Liste des abréviations

Si	superficie correspondante à cette occupation
$\sum Si$	superficie totale du bassin.
Y	penne moyenne
l	longueur hydraulique du bassin
s	rétention potentielle maximale
BV	Bassin Versant
GIS	Geographic Information System (système d'information géographique)
WGS	World Geodetic System (Système Géodésique Mondial)
UTM	Universal Transverse Mercator (Système de projection transverse universelle de Mercator)

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. Introduction	4
I.2. Cycle de l'eau	4
I.3. Définition d'un bassin versant.....	5
I.3.1. Bassin versant topographique	6
I.3.2. Bassin hydrogéologique ou bassin réel	6
I.4. Modélisation hydrologique	6
I.5. Bilan hydrologique	7
I.6. La modélisation pluie-débit	7
I.7. Caractéristique morphologique et hydrographique du bassin versant.....	8
I.7.1. Caractéristique morphologique d'un bassin versant.....	8
I.7.1.1. Superficie et périmètre	8
I.7.1.2. Indice de compacité de Gravilius (K_G).....	8
I.7.1.3. Rectangle équivalent	9
I.7.1.4. Le relief	9
I.7.1.4.1. La courbe hypsométrique	9
I.7.1.4.2. Les altitudes caractéristiques	9
I.7.1.4.3. La pente moyenne du bassin.....	10
I.7.1.4.4. Indice de pente de ROCHE	11
I.7.1.4.5. Indice de pente globale I_g	11
I.7.1.4.6. Dénivelée spécifique	12
I.7.1.4.7. Temps de concentration T_c	13
I.7.2. Caractéristique hydrographique.....	13
I.7.2.1. Classification d'un réseau hydrographique.....	13
I.7.2.2. Ordres du bassin versant (classification de Strehler).....	14
I.7.2.3. Le degré de développement du réseau	15
I.7.2.3.1. Densité de drainage	15
I.7.2.3.2. Densité hydrographique (D_h).....	15
I.7.2.3.3. Rapport de confluence	15
I.7.2.3.4. Rapport de torrentialité	16
I.8. Les Courbes IDF	16

Table des matières

I.8.1. Les caractéristiques des courbes IDF.....	16
I.8.1.1. Intensité.....	16
I.8.1.2. Durée.....	17
I.8.1.3. Fréquence d'apparition (F)	17
I.8.1.4. Période de retour ou Temps de retour (T)	17
I.8.2. Utilisation des courbe IDF.....	17
I.8.3. Conception des courbes IDF.....	18
I.8.3.1. Formule de Montana	18
I.8.3.2. Formule de TALBOT	18
I.9. Méthode de calcul de débits maximaux des crues	19
I.9.1. Définition de crue	19
I.9.2. Les types des crue	19
I.9.2.1. Crue fluviales.....	19
I.9.2.2. Crue torrentielles (rapide, brutales)	19
I.9.3. Les caractéristique de crue	20
I.9.3.1. Débit de pointe de la crue	20
I.9.3.2. Volume de crue	20
I.9.3.3. Durée	20
I.9.3.3.1. Temps de repense.....	20
I.9.3.3.2. Temps montée	20
I.9.3.3.3. Temps basé.....	20
I.9.3.3.4. Temps de concentration	20
I.10. Méthode empiriques	21
I.10.1. Méthode rationnelle	21
I.10.2. Formule d'Iskowski (1886).....	22
I.10.3. Formule de Turraza.....	22
I.10.4. Formule de Possenti.....	23
I.12. Conclusion.....	23
CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET METHODOLOGIE	
II.1. Introduction	24
II.2. Zone d'étude.....	24
II.2.1. Géographie.....	24
II.2.2. Relief.	26
II.2.3. Climat	26

Table des matières

II.2.4. Végétation.....	27
II.3. Méthodologie, données et matériels utilisés	27
II.3.1. Présentation du logiciel ArcGis	27
II.4. Etude des caractéristiques morphologiques et hydrographiques de bassin versant Azazga.....	28
II.4.1. Caractéristiques morphologiques du bassin versant Azazga	28
II.4.2. Caractéristique hydrographique du bassin versant Azazga	32
II.5. Etude des caractéristiques morphologiques et hydrographiques de bassin versant Hamiz.....	34
II.5.1. Caractéristiques morphologiques du bassin versant Hamiz	34
II.5.2. Caractéristique hydrographique du bassin versant Hamiz.....	38
II.6. Etude des caractéristiques morphologiques et hydrographiques de bassin versant Oued Zeboudj	40
II.6.1. Caractéristiques morphologiques du bassin versant Oued Zeboudj.....	40
II.6.2. Caractéristique hydrographique du bassin versant Oued Zeboudj.....	44
II.7. Description des bassins versants	47
II.8. Intensité des pluies	47
II.9. Calcule des débits maximaux de crues	49
II.9.1. La formule de Turraza	49
II.10. Conclusion.....	51
CHAPITRE III:PRESENTATIO DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS	
III.1. Introduction.....	53
III.2. Présentation du logiciel HEC-HMS	53
III.2.1. La description du modèle HEC-HMS	53
III.2.2. L'organisation du modèle HEC-HMS	54
III.2.2.1. Le modèle structural du bassin	54
III.2.2.2. Le modèle météorologique	55
III.2.2.3. Le modèle de la fonction de production	56
III.2.2.4. Le modèle de la fonction de transfert :	57
III.2.2.5. Le modèle de débit de base.....	57
III.2.2.6. Le modèle de Routage	58
III.2.2.7 La fonction objective	58
III.2.2.8. La fonction d'optimisation automatique	59
III.2.3. Développement d'un projet HEC-HMS.....	59
III.2.4. Préparation des entrées du HEC-HMS	60

III.3. Caractéristiques hydrologiques du sous bassin.....	60
III.3.1. Curve number.....	60
III.3.2 Lag time.....	60
III.3.3. Le temps de concentration Tc.....	61
III.4. Avantages et forces de HEC-HMS.....	66
III.5. Limites et inconvénients de HEC-HMS.....	66
III.6. Conclusion.....	66
CHAPITRE IV : APPLICATION DU MODELE HEC-HMS	
IV.1. Introduction.....	69
IV.2. Développement d'un projet HEC-HMS.....	69
IV.3. l'interface du logiciel HEC-HMS.....	69
IV.4. Créer un nouveau modèle HEC-HMS.....	70
IV.5. Les composants du modèle.....	70
IV.5.1. Création du modèle du bassin.....	70
IV.5.2. Gestionnaire de données de terrain.....	71
IV.5.3. La définition d'un système de coordonnées.....	72
IV.6. Modélisation du Bassin versant.....	73
IV.6.1. Traitement de MNT.....	73
IV.6.2. La délimitation du réseau fluvial.....	74
IV.6.3. Spécifiez la sortie.....	75
IV.6.4. Délimitation du bassin versant.....	75
IV.7. Préparation des entrées du modèle HEC-HMS.....	76
IV.7.1. Modélisation du bassin versant.....	77
IV.7.1.1. Modélisation d'un sous bassin.....	77
IV.7.1.2. Élément Reach.....	79
IV.7.2. Composant de modèle météorologique.....	79
IV.7.2.1. Créer un modèle météorologique.....	79
IV.7.3. Spécification de contrôle (control specifications).....	82
IV.7.4. Exécutions de simulation.....	83
IV.7.4.1. Créer et calculer une simulation.....	84
IV.7.4.2. Visualisation des résultats.....	85
IV.7.5. Essais d'optimisation.....	85
IV.7.5.1. Créer un essai d'optimisation.....	86
IV.8. Conclusion.....	90

CHAPITRE V: RESULTATS EY DISCUSSIONS	
V.1. Introduction.....	91
V.2. Résultats de simulation hydrologique	91
V.2.1. Simulation du bassin versant d'Azazga.....	91
V.2.1.1. Résultat au niveau de sous bassin.....	91
V.2.1.2. Résultats au niveau de reach.....	92
V.2.1.3. Résultats au niveau du sink	93
V.2.2. simulation du Bassin versant Hamiz	94
V.2.2.1. Résultat au niveau de sous bassin.....	94
V.2.2.2. Résultats au niveau de reach.....	95
V.2.2.3. Résultats au niveau du sink	96
V.2.3. simulation du Bassin versant Oued Zeboudj.....	97
V.2.3.1. Résultat au niveau de sous bassin.....	97
V.2.3.2. Résultats au niveau de reach.....	98
V.2.3.3. Résultats au niveau du sink	99
V.3. Comparaison entre la simulation et la formule Turraza	100
V.3.1. Bassin versant d'Azazga.....	100
V. 3.2. Bassin versant Hamiz.....	101
V.3.3. Bassin versant d'oued Zeboudj	102
V.4. Résultats de l'optimisation	103
V.4.1. Optimisation du lagtime du bassin versant Azazga	103
V.4.1.1. Niveau de subbasin.....	103
V.4.1.2. Niveau de reach.....	104
V.4.1.3. Niveau de sink.....	105
V.4.2. Optimisation du lagtime du bassin versant hamiz	105
V.4.2.1. Niveau de subbasin.....	105
V.4.2.2. Niveau de reach.....	106
V.4.2.3. Niveau de sink.....	107
V.4.3. Optimisation du lagtime du bassin versant oued zeboudj.....	107
V.4.3.1. Niveau de subbasin.....	107
V.4.3.1. Niveau de reach.....	108
V.4.3.3. Niveau de sink.....	109
V.5. Comparaison de la simulation avec les autres types d'optimisation (Muskingum, CN et lagtime).....	109
V.5.1. Bassin azazga.....	109

Table des matières

V.5.2. Bassin versant Hamiz	110
V.5.3. bassin versant Oued zeboudj	110
V.6. Discussion générale	111
V.7. Conclusion	113
CONCLUSION GENERALE	115

CHAPITRE I

Figure I. 1: Cycle de l'eau.[23]	5
Figure I. 2: délimitation d'un bassin versant.[24]	5
Figure I. 3: bassin versant topographique et bassin versant réel.[24]	6
Figure I. 4: classification de strahler[24]	14
Figure I. 5: réseau de drainage d'un bassin versant d'ordre 4.[24].....	14
Figure I. 6: courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) de la précipitation.....	17
Figure I. 7: Crue simple et crue complexe.[25]	19
Figure I. 8: Durées caractéristiques relatifs à un hydrogramme de crue.	21

CHAPITRE II

figure II. 1: carte du réseau hydro-climatique, zone N° 02, Tizi-Ouzou, Azazga.....	25
Figure II. 2: carte du réseau hydro-climatique, zone N° 02, Tizi-Ouzou, Azazga.....	25
Figure II. 3: carte du réseau hydro-climatique, zone N° 02, Tizi-Ouzou, Oued Zeboudj ..	26
Figure II. 4: Courbe hypsométrique du bassin Azazga.....	30
Figure II. 5: Réseau hydrographique du bassin versant Azazga	32
Figure II. 6: Classification du réseau hydrographique Azazga	33
Figure II. 7: Courbe hypsométrique du bassin Hamiz	36
Figure II. 8: Réseau hydrographique du bassin versant Hamiz	38
Figure II. 9: Classification du réseau hydrographique Hamiz	39
Figure II. 10: courbe hypsométrique Oued Zeboudj.....	42
Figure II. 11: Réseau hydrographique du bassin versant Oued Zeboudj	44
Figure II. 12: Classification du réseau hydrographique Oued Zeboudj.....	45

CHAPITRE IV

Figure IV. 1. Caractéristiques hydrologiques du sous bassin.....	60
Figure IV. 2: Créer un model HEC-HMS.	70
Figure IV. 3: Modèle du bassin.....	71
Figure IV. 4: Création du modèle du bassin.....	71
Figure IV. 5: création du terrain Data.....	71
Figure IV. 6: Insertion des données de terrain.....	72
Figure IV. 7: Affectation d'un système de coordonnées.	73
Figure IV. 8: modèle numérique du terrain.	73
Figure IV. 9: discontinuités du drainage.....	74
Figure IV. 10: élimination des erreurs.	74
Figure IV. 11: Flux identifiés.....	75
Figure IV. 12: définition de l'exutoire.....	75
Figure IV. 13: Délimitation les limites et les sous-bassins du bassin versant Azazga.....	76
Figure IV. 14: Le bassin versant d'Azazga modélisé dans HEC-HMS après la fusion des sous-bassins.....	76
Figure IV. 15: Différentes méthodes de production et de transfert.	78
Figure IV. 16: Inclure les données dans les éditeurs des bassins versants.....	78
Figure IV. 17: Les données Muskingum.	79
Figure IV. 18: Création du modèle météorologique.....	80
Figure IV. 19: Modèles météorologiques (Précipitation).	80
Figure IV. 20: exemple de hauteurs de pluies (10 ans).....	82
Figure IV. 21: Créer un spécifique de contrôle.....	83
Figure IV. 22 : Fenêtre de spécifications de contrôle.	83
Figure IV. 23: Créer une simulation.	84
Figure IV. 24: Calculer une simulation.....	85

Figure IV. 25: crée une optimisation.	86
Figure IV. 26: Les données d’essais d’optimisation.	86
Figure IV. 27: La méthode de recherche pour l’essai d’optimisation.....	87
Figure IV. 28: Objectif pour un essai d'optimisation avec l'objectif défini sur Maximisation.	87
Figure IV. 29: Fenêtre d’ajout des paramètres.	87
Figure IV. 30: les essaies d’optimisations.	88
Figure IV. 31: les essaies d’optimisations.	89
Figure IV. 32: calculer une optimisation.	90

CHAPITRE V

Figure V. 1: hydrogramme simulé au sous-bassin période de retour de 10 ans.....	91
Figure V. 2: hydrogramme simulé au reach période de retour de 10 ans	92
Figure V. 3: hydrogramme simulé au sink période de retour de 10 ans	93
Figure V. 4: hydrogramme simulé au sous-bassin periode de retour de 100 ans.....	94
Figure V. 5: hydrogramme simulé au reach période de retour de 100 ans	95
Figure V. 6: hydrogramme simulé au sink période de retour de 100 ans	96
Figure V. 7: hydrogramme simulé au sous-bassin periode de retour de 50 ans.....	97
Figure V. 8: hydrogramme simulé au reach période de retour de 50 ans	98
Figure V. 9: hydrogramme simulé au sink période de retour de 50 ans	99
Figure V. 10: Hydrogramme du sous-bassin après optimisation du lag time (TR = 10 ans)	103
Figure V. 11: Hydrogramme du reach après optimisation du lag time (TR = 10 ans)....	104
Figure V. 12: Hydrogramme du sink après optimisation du lag time (TR = 10 ans).....	105
Figure V. 13: Hydrogramme du sous-bassin après optimisation du lag time (TR = 100 ans)	105
Figure V. 14: Hydrogramme du reach après optimisation du lag time (TR = 100 ans)...	106
Figure V. 15: Hydrogramme du sink après optimisation du lag time (TR = 100 ans).....	107
Figure V. 16: Hydrogramme du sous-bassin après optimisation du lag time (TR = 50 ans)	107
Figure V. 17: Hydrogramme du reach après optimisation du lag time (TR =50 ans).....	108
Figure V. 18: Hydrogramme sink après optimisation du lag time (TR = 50 ans).....	109

CHAPITRE I

Tableau I. 1: Classification du relief selon Ig par O.R.S.T.O.M 12
Tableau I. 2: Deuxième classification d'après l'O.R.S.T.O.M..... 13

CHAPITRE II

Tableau II. 1 : Répartition hypsométrique du bassin Azazga 29
Tableau II. 2: Détermination de l'altitude moyenne..... 31
Tableau II. 3 : Classification des Talwegs (Arc gis)..... 33
Tableau II. 4: résultats de calcul de coefficient de confluence..... 34
Tableau II. 5: résultats de calcul de coefficient de torrentialité. 34
Tableau II. 6: Répartition hypsométrique du bassin el Hamiz 35
Tableau II. 7 : détermination de l'altitude moyenne 36
Tableau II. 8: Classification des Talwegs (Arc gis)..... 39
Tableau II. 9: résultats de calcul de coefficient de confluence..... 40
Tableau II. 10: résultats de calcul de coefficient de torrentialité. 40
Tableau II. 11: Répartition hypsométrique du bassin Oued Zeboudj 41
Tableau II. 12: Détermination de l'altitude moyenne..... 43
Tableau II. 13: Classification des Talwegs (Arc gis)..... 45
Tableau II. 14: résultats de calcul de coefficient de confluence..... 46
Tableau II. 15: résultats de calcul de coefficient de torrentialité. 46
Tableau II. 16: Caractéristiques morphologiques et hydrographiques des bassins 46
Tableau II. 17: Intensité des pluies pour bassin versant Azazga 48
Tableau II. 18: Intensité des pluies pour bassin versant Azazga 48
Tableau II. 19: Intensité des pluies pour bassin versant Oued Zeboudj 48
Tableau II. 20: débits max de crues pour bassin versant Azazga..... 49
Tableau II. 21 : débits max de crues pour bassin versant Hamiz..... 50
Tableau II. 22: débits max de crues pour bassin versant Oued Zeboudj..... 50

CHAPITRE III

Tableau III. 1: Curve Number de bassin versant Azazga 62
Tableau III. 2: Curve Number de bassin versant Hamiz 62
Tableau III. 3: Curve Number de bassin versant Oued Zeboudj 63
Tableau III. 4: lag time de bassin versant Azazga 63
Tableau III. 5: lag time de bassin versant Hamiz 64
Tableau III. 6: lag time de bassin versant Oued Zeboudj..... 65

CHAPITRE IV

Tableau IV. 1: méthodes appliquées aux sous-bassins et aux tronçons..... 77
Tableau IV. 2: les données pluviométriques des bassins versants..... 81

CHAPITRE V

Tableau V. 1: Débits de pointe simulés à l'exutoire du bassin versant d'Azazga pour différentes périodes de retour 94
Tableau V. 2: Débits de pointe simulés à l'exutoire du bassin versant Hamiz pour différentes périodes de retour 97
Tableau V. 3: Débits de pointe simulés à l'exutoire du bassin versant Hamiz pour différentes périodes de retour 100
Tableau V. 4: Comparaison des débits simulés et calculés (Turazza) -Azazga..... 100
Tableau V. 5: Comparaison des débits simulés et calculés (Turazza) - Hamiz..... 101
Tableau V. 6: Comparaison des débits simulés et calculés (Turazza) – Oued Zeboudj.. 102

Liste des tableaux

Tableau V. 7: Comparaison des débits simulés selon les types d'optimisation (Lag Time, CN, Muskingum) – Bassin d'Azazga	109
Tableau V. 8: Comparaison des débits simulés selon les types d'optimisation (Lag Time, CN, Muskingum) – Bassin Hamiz	110
Tableau V. 9: Comparaison des débits simulés selon les types d'optimisation (Lag Time, CN, Muskingum) – Bassin Oued zeboudj	110
Tableau V. 10: les résultats des débits maximaux par HEC-HMS, optimisation du lag time et méthode de Turazza	111

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La gestion durable des ressources en eau et la prévention des risques hydrologiques, notamment les crues, représentent aujourd'hui des enjeux majeurs, en particulier dans les régions exposées aux événements pluviométriques extrêmes. Face à la fréquence croissante de ces phénomènes, il devient impératif de disposer d'outils fiables pour évaluer les débits ruisselés et anticiper les réactions hydrologiques des bassins versants. L'hydrologie joue ainsi un rôle central, en tant que science consacrée à l'étude des eaux de surface, de leur origine, de leur circulation et de leur interaction avec le territoire.

La compréhension du comportement hydrologique d'un bassin versant et de la dynamique des écoulements est donc primordiale pour mieux maîtriser les apports hydriques et contribuer à la sécurité des personnes et des infrastructures. L'estimation des débits de crue à l'exutoire constitue un élément fondamental dans ce processus, que ce soit pour la conception des ouvrages hydrauliques ou pour la gestion des risques d'inondation.

Deux approches principales sont utilisées pour estimer ces débits : les méthodes empiriques, telles que la formule de Turraza, simples à appliquer mais fondées sur des hypothèses globales, et les méthodes de modélisation hydrologique, comme le logiciel HEC-HMS, qui simule de manière détaillée le processus pluie-débit en tenant compte des caractéristiques spécifiques du bassin.

Ce travail a pour objectif de comparer les débits de crue obtenus par la formule de Turraza à ceux simulés par le modèle HEC-HMS, à travers l'étude de trois bassins versants algériens : Azazga, Hamiz et Oued Zeboudj. L'étude vise à évaluer la précision, la fiabilité et la complémentarité de ces deux approches.

Le mémoire est structuré en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente les notions fondamentales de l'hydrologie, les caractéristiques morphologiques et hydrographiques des bassins versants, les courbes IDF, ainsi que les principales méthodes de calcul des débits de crue.

Le deuxième chapitre est consacré à la description détaillée des trois bassins versants étudiés, accompagnée de l'application de la formule de Turraza pour une première estimation des débits.

Introduction générale

Le troisième chapitre introduit le modèle HEC-HMS, ses principes de fonctionnement, ses composants, ainsi que les paramètres hydrologiques clés tels que le Curve Number (CN) et le temps de retard (Lag time).

Le quatrième chapitre décrit l'application concrète du modèle HEC-HMS aux trois bassins, en passant par la préparation des données, le choix des sous-modèles, et la calibration des paramètres par optimisation.

Enfin, le cinquième chapitre expose les résultats de simulation et d'optimisation, avec une comparaison des débits obtenus par HEC-HMS et ceux issus de la méthode de Turraza, en analysant les hydrogrammes de crue générés.

À la fin, nous terminons notre travail par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus et propose des pistes pour des travaux futurs.

CHAPITRE I :
RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

L'hydrologie est la science qui étudie les eaux de surface, leur origine, leur qualité ainsi que leur gestion, dans le but d'optimiser leur exploitation tout en maîtrisant les phénomènes extrêmes tels que les crues. Le bassin versant, en tant qu'unité géomorphologique de base, constitue un cadre essentiel pour analyser la dynamique hydrologique à l'aide de techniques morphométriques.

Les modèles pluviométriques et les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) permettent d'établir la relation entre les précipitations et les débits des cours d'eau. Le débit maximal des crues représente un paramètre fondamental dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et la prévention des risques d'inondation.

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord quelques notions générales sur l'hydrologie, puis nous détaillerons les caractéristiques morphologiques et hydrographiques du bassin versant étudié. Nous aborderons ensuite les courbes IDF, ainsi que les différentes méthodes de calcul des débits maximaux de crues.

I.2. Cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, ou cycle hydrologique, désigne l'ensemble des processus impliquant le mouvement et le renouvellement de l'eau à la surface de la Terre. Ce concept englobe non seulement une succession d'étapes, mais aussi des phénomènes qui peuvent se produire simultanément dans différentes parties du système terrestre.

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau s'évapore à partir des océans, des lacs, des rivières, ainsi que de la surface du sol. Cette vapeur d'eau s'élève dans l'atmosphère. En atteignant des altitudes plus élevées, l'air humide se refroidit, ce qui entraîne sa saturation en vapeur d'eau et, en présence de noyaux de condensation, la formation de gouttelettes qui composent les nuages.

Une fois condensée, l'eau est transportée dans l'atmosphère sous forme de nuages, puis restituée à la surface terrestre ou aux océans par les précipitations. Lorsqu'elle atteint le sol, une partie de cette eau peut être interceptée par la végétation, puis retournée à l'atmosphère par évapotranspiration. La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol. Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes. Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine. Un

écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle (figure I.1). [1]

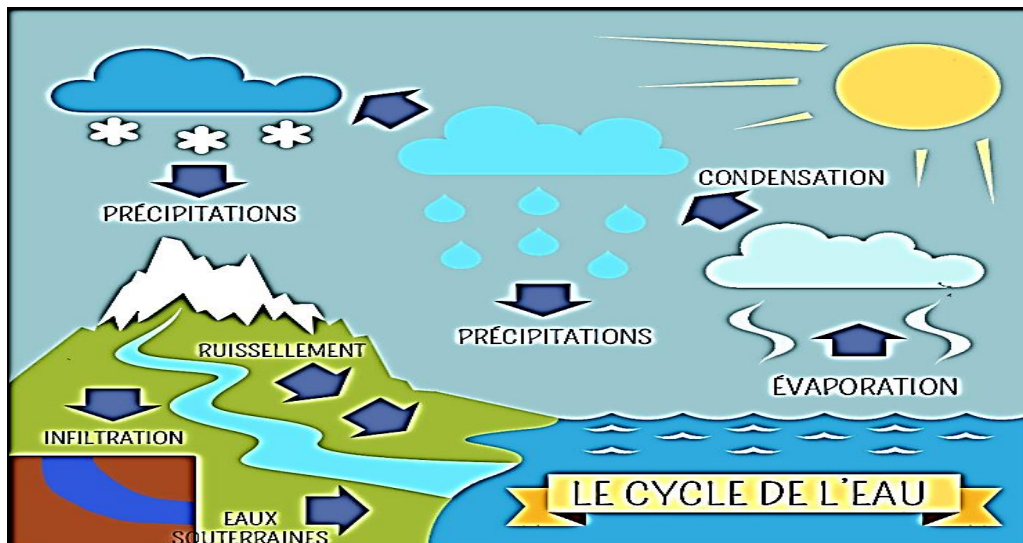


Figure I. 1: Cycle de l'eau.[23]

I.3. Définition d'un bassin versant

Un bassin versant est une zone géographique, il correspond à l'ensemble de la surface dans laquelle toutes les eaux (pluie, neige....) s'écoulent naturellement vers un même exutoire, comme un cours d'eau ou une nappe souterraine. Il est délimité par des lignes de partage des eaux, qui forment des frontières naturelles suivant les crêtes. La pluie qui tombe d'un côté ou de l'autre de cette ligne de partage alimentera deux bassins situés cotés à cotés. Le bassin versant d'un fleuve inclut également les sous-bassins versants de ses affluents (figure I.2).[2]

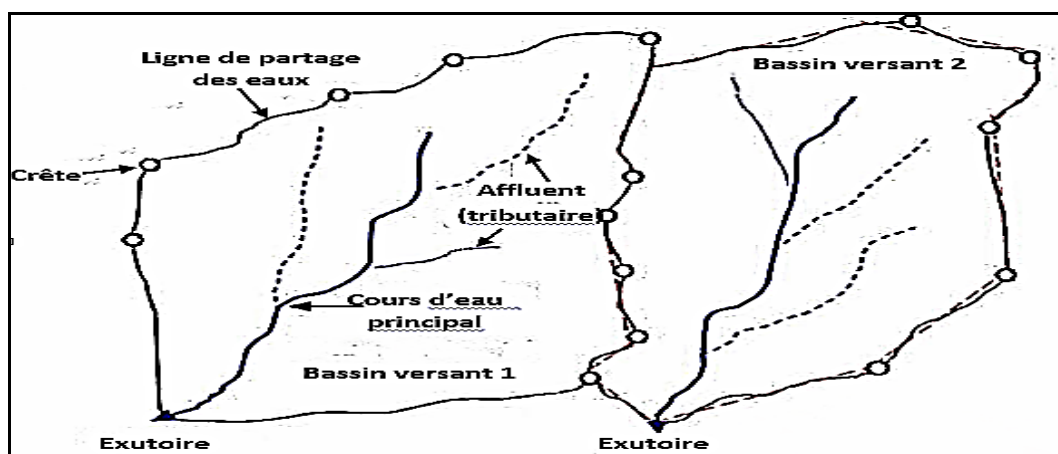


Figure I. 2: délimitation d'un bassin versant.[24]

Selon la nature des terrains, nous serons amenés à considérer deux définitions (figure I.3).

I.3.1. Bassin versant topographique

Si le sous-sol est imperméable, le cheminement de l'eau ne sera déterminé que par la topographie. Le bassin versant sera alors limité par des lignes de partage des eaux. [2]

I.3.2. Bassin hydrogéologique ou bassin réel

Lorsque le sous-sol est perméable, il se peut qu'une partie des eaux tombées à l'intérieur du bassin topographique s'infilte puis sorte souterrainement du bassin. [2]

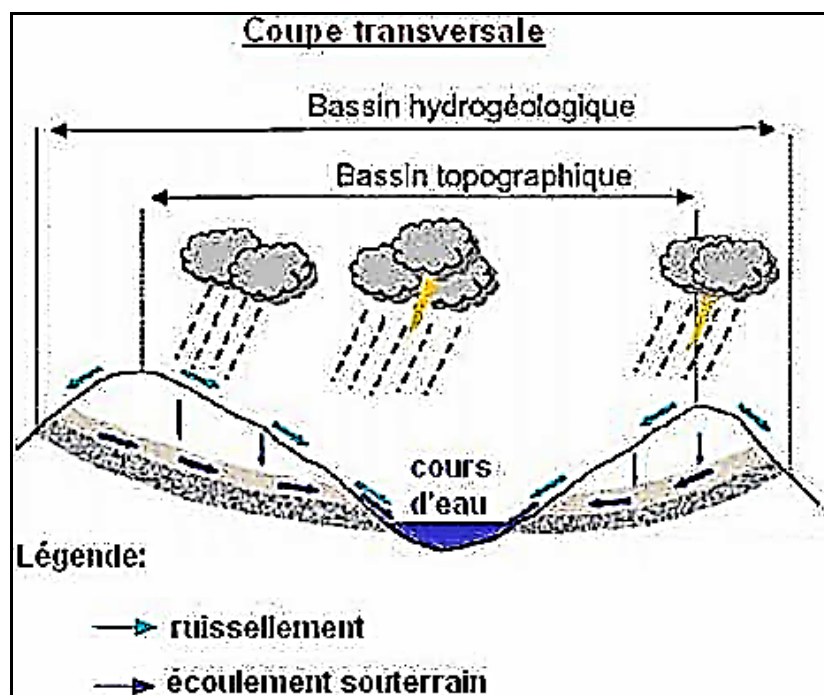


Figure I. 3: bassin versant topographique et bassin versant réel. [24]

I.4. Modélisation hydrologique

La modélisation consiste à représenter un processus réel sous forme d'équations mathématiques. Appliquée à l'hydrologie, elle permet de transcrire le cycle de l'eau, ses réservoirs et ses flux à travers une approche conceptuelle et simplifiée, à l'aide de formulations mathématiques.

Les objectifs de la modélisation hydrologique sont nombreux. Elle permet notamment de : (crues, sécheresse, gestion de, l'irrigation, d'ouvrages hydroélectriques, recharge d'aquifères) ou simulations de scénarios (changement climatique ; aménagements de bassins d'un point de vue qualité ou quantité d'eau).

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants doit permettre de reproduire les différentes étapes de la transformation pluie-débit, en tenant compte des processus comme les pertes par infiltration, le ruissellement ou encore l'écoulement souterrain. [25]

I.5. Bilan hydrologique

Un bassin versant est défini comme une superficie délimitée par les lignes de partage des eaux, drainée par un cours d'eau en direction d'un exutoire, généralement situé à une section transversale du cours d'eau. Toute goutte d'eau qui ruisselle à l'intérieur de ce périmètre converge naturellement vers cet exutoire.

L'eau qui tombe sur le bassin versant se répartit entre plusieurs compartiments hydrologiques une partie est retenue temporairement à la surface du sol ou interceptée par la végétation, une autre s'infiltré dans le sol et le reste ruisselle directement en surface pour rejoindre les cours d'eau. Une grande partie de l'eau interceptée et infiltrée est ensuite perdue par évaporation ou évapotranspiration, selon les conditions climatiques et la couverture végétale. L'eau qui ne subit pas ces pertes alimente le ruissellement de surface, aussi appelé pluie nette, qui constitue le ruissellement direct vers l'exutoire. C'est cette composante rapide de l'écoulement qui est souvent la plus significative lors des événements pluvieux intenses.

Notre étude porte principalement sur la transformation des pluie-débit à l'exutoire du bassin versant. Pour ce faire, nous utilisons des modèles hydrologiques composés de deux fonctions distinctes mais complémentaires.

Dans un premier temps, la pluie mesurée est convertie en eau disponible pour le ruissellement à l'aide d'une fonction de production. Ensuite, cette eau est acheminée depuis sa zone de formation jusqu'à l'exutoire au moyen d'une fonction de transfert.[3]

I.6. La modélisation pluie-débit

Il arrive fréquemment qu'il y ait un manque de données sur les débits, tandis que les données relatives aux précipitations sont généralement abondantes. Il semble donc indispensable, pour une gestion optimale des ressources en eau, d'obtenir une compréhension plus exacte des quantités d'eau disponible, de convertir les données pluviométriques en donnée hydrométriques. C'est pourquoi la modélisation pluie-débit basée sur l'utilisation de modèles simulant la réalité est si importante.

Un modèle de transformation pluie-débit est un instrument qui facilite la production, à partir de données pluviométriques et d'évapotranspiration potentielle, des débits se rapprochant le plus possible de ceux réellement observés ou potentiellement observables à l'exutoire d'un bassin versant. Un modèle doit satisfaire à deux exigences souvent antagonistes : il doit être assez simple pour permettre sa formulation et son utilisation facile, tout en étant aussi complet que possible pour représenter fidèlement le système étudié.[4]

I.7. Caractéristique morphologique et hydrographique du bassin versant

I.7.1. Caractéristique morphologique d'un bassin versant

I.7.1.1. Superficie et périmètre

La surface et le périmètre d'un bassin versant sont des facteurs essentiels dans les études des bassins versants, car ils déterminent l'air qui reçoit les précipitations et alimente les cours d'eau. Ces caractéristiques influencent la relation entre le débit et le temps.

La mesure de la surface et du périmètre d'un bassin versant est réalisée à l'aide des techniques de digitalisation, automatiquement exécutées avec des logiciels comme Global Mapper et Arc GIS 10. [5]

I.7.1.2. Indice de compacité de Gravilius (K_G)

L'indice de compacité de Gravilius, c'est pour caractériser la forme d'un bassin versant, qui est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface.

Le coefficient K_G est égale à :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (I.1)$$

K_G : coefficient de compacité de Gravilius

P : périmètre du bassin [Km]

S : superficie du bassin [Km²]

Il est classé en trois classes de formes différentes :

- a) Si $K_G \leq 1$: implique que le bassin versant à une forme circulaire.
- b) Si $K_G = 1,12$: implique que le bassin versant à une forme circulaire Forme carrée

c) Si $K_g > 1,12$: implique que le bassin versant à une forme circulaire Forme allongée.[6]

I.7.1.3. Rectangle équivalent

C'est une transformation purement géométrique du bassin versant en un rectangle de dimension L et l .Ce dernier permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue de l'écoulement.[6]

Sachant que le périmètre de rectangle équivalent vaut :

$$P = \frac{K_G \sqrt{S}}{0.28} = 2(L + l) \quad (I.2)$$

Et la surface :

$$S = (L * l) \quad (I.3)$$

Alors, la longueur "L», et la largeur "l" sont données par les expressions suivantes :

$$L = \frac{K_G \sqrt{S}}{1.128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right] \quad (I.4)$$

$$l = \frac{K_G \sqrt{S}}{1.128} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right] \quad (I.5)$$

I.7.1.4. Le relief

Le relief joue un rôle crucial sur les paramètres hydrométéorologiques, notamment la température, et les précipitations .Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants : [7]

I.7.1.4.1. La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique à une grande importance dans l'étude du relief d'un bassin versant. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

I.7.1.4.2. Les altitudes caractéristiques

a) L'altitude maximale

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin.

b) L'altitude minimale

L'altitude minimale c'est le point le plus bas, se situé à l'exutoire du bassin.[7]

c) L'altitude moyenne

Cette altitude se déduit directement de la courbe hypsométrique, elle est définie comme l'ordonnée moyenne de la courbe hypsométrique. Elle peut être estimée à partir de la relation suivante :[6]

$$H_{moy} = \frac{\sum(H_i * S_i)}{S_t} \quad (I.6)$$

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant en [m].

S_t : Surface totale du bassin versant en [Km²]

S_i : La surface comprise entre deux courbes de niveau en [Km²]

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m].

a) L'altitude médiane

Elle correspond au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique.[7]

I.7.1.4.3. La pente moyenne du bassin

La pente moyenne est une caractéristique importante dans le phénomène de ruissellement. Elle fournit une indication précise sur le temps de parcours du ruissellement direct, et par conséquent, sur le temps de concentration t_c . Elle a un impact direct sur le débit de pointe lors d'une averse. La pente moyenne peut être estimée à partir de la courbe hypsométrique.[7]

$$I_{moy} = \frac{2H_{moy}}{L_{cp}} \quad (I.7)$$

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

L_{cp} : longueur du cours d'eau principal [km]

I_{moy} : la pente moyenne du bassin est exprimée en %.

I.7.1.4.4. Indice de pente de ROCHE

L'indice de pente de ROCHE est utilisé pour calculer la pente moyenne à partir des données provenant du bassin versant. Il prend en considération l'effet du ruissellement et l'impact de la pente sur le régime hydrologique du bassin. Cet indice a été introduit par M. ROCHE et se calcule de la manière suivante :

$$I_P = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \quad (I.8)$$

I_P : indice de pente de roche [%]

H_{max} : L'altitude maximale [m]

H_{min} : L'altitude minimale [m]

L : longueur de rectangle équivalent [m] .[6]

I.7.1.4.5. Indice de pente globale I_g

Il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Il est donné par la formule suivante : [7]

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \quad (I.9)$$

I_g : indice de pente globale [m/Km]

H_5 : altitude correspondant à 5% de la surface totale du bassin[m].

H_{95} : altitude correspondant à 95% de la surface totale du bassin[m].

L'objectif de cet indice est de définir les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications. (Tableau I.1)

I.7.1.4.6. Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique est donc envisagée comme une modification de la dénivelée simple par l'application d'un coefficient qui dépend de la forme du bassin, permettant ainsi la comparaison entre les valeurs pour divers bassins. Le calcul de la dénivelée spécifique est effectué, donc par la relation suivante : [7]

$$D_s = I_g \sqrt{S} \quad (\text{I.10})$$

D_s : dénivelée spécifique [m].

I_g : indice de pente globale [m/Km].

S : surface de bassin versant [km²].

La classification spécifique de la dénivelée permet d'évaluer le relief selon les normes de l'Office de Recherche Scientifique d'Outre-Mer (ORSTOM) (tableau I.2).

Tableau I. 1: Classification du relief selon I_g par O.R.S.T.O.M

Relief très faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
Relief très fort	$0.1 < I_g$

Tableau I. 2: Deuxième classification d'après l'O.R.S.T.O.M.

Relief très faible	$D s < 10 \text{ m}$
Relief faible	$10 \text{ m} < D s < 25 \text{ m}$
Relief assez faible	$25 \text{ m} < D s < 50 \text{ m}$
Relief modéré	$50 \text{ m} < D s < 100 \text{ m}$
Relief assez fort	$100 \text{ m} < D s < 250 \text{ m}$
Relief fort	$250 \text{ m} < D s < 500 \text{ m}$
Relief très fort	$500 < D s$

I.7.1.4.7. Temps de concentration T_c

Le temps de concentration, c'est le temps que met la particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour arriver à l'exutoire, il se calcule par la formule de GIANDOTTI :

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{S} + 1,5 * L_{cp}}{0,8 * \sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (I.11)$$

T_c : Temps de concentration [heure].

S : Superficie du bassin [km^2].

L_{cp} : Longueur du talweg principal [km].

H_{moy} : altitude moyenne [m]

H_{min} : altitude minimal [m]. [6]

I.7.2. Caractéristique hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanent ou temporaire, qui participe à l'écoulement. [7]

I.7.2.1. Classification d'un réseau hydrographique

Pour bien étudier le réseau hydrographique de la région on fait des classifications des talwegs ce sont des lignes les plus basses des reliefs (c'est l'écoulement naturel de l'eau) qui jouent un rôle essentiel dans le drainage d'un bassin versant. Elle a été initialement basée

sur la méthode de HORTON en 1945 puis modifier en 1947 par STRAHLE, C'est aujourd'hui la plus utilisée. Son principe : [6]

- ✓ Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre 1.
- ✓ Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux.
- ✓ Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre x est d'ordre $n+1$.

Ce qui résume par :

$$n+n = n+1 \text{ et } n+m = \text{Max}(n, m) \text{ [8]}$$

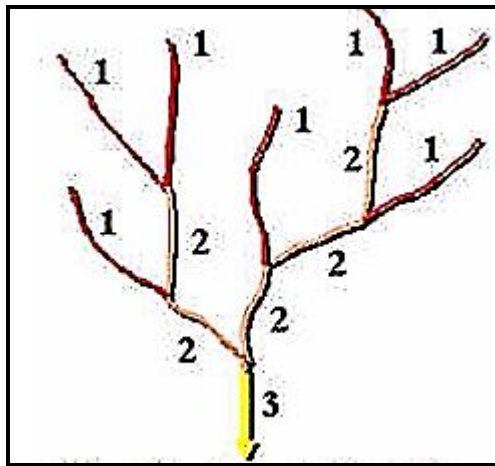


Figure I. 4:classification de strahler[24]

I.7.2.2.Ordres du bassin versant (classification de Strahler)

Un bassin versant a l'ordre du plus élevé de ses cours d'eau, soit l'ordre du cours d'eau principal à l'exutoire (figure I.5).[7]

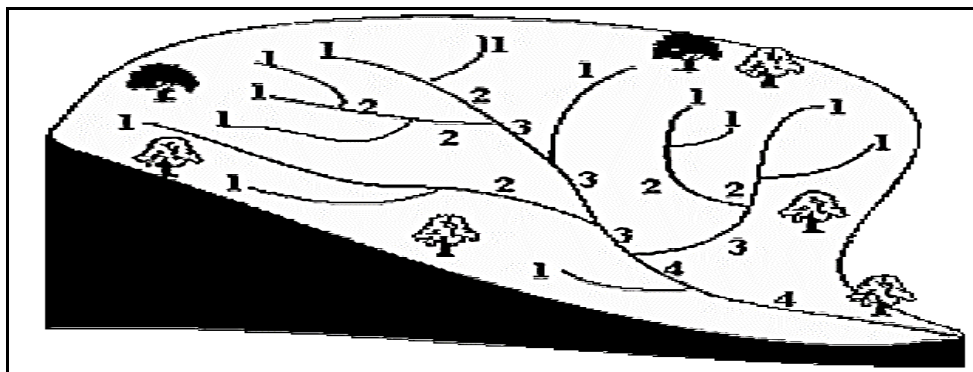


Figure I. 5: réseau de drainage d'un bassin versant d'ordre 4.[24]

I.7.2.3. Le degré de développement du réseau

I.7.2.3.1. Densité de drainage

Se définit comme étant le rapport de la longueur totale des cours d'eau à la superficie totale du bassin.[7]

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S} \quad (I.12)$$

D_d : densité de drainage [km/km²].

L_i : longueur de cours d'eau [km].

S : surface du bassin versant [km²].

I.7.2.3.2. Densité hydrographique (D_h)

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.[7]

$$D_h = \frac{\sum N_i}{S} \quad (I.13)$$

D_h : densité hydrographique [km⁻²].

$\sum N_i$: Nombre de cours d'eau.

S : superficie du bassin [km²].

I.7.2.3.3. Rapport de confluence

Le rapport de confluence est un nombre sans dimension exprimant le développement du réseau de drainage. C'est un élément important à considérer pour établir des corrélations d'une région à une autre.[7]

$$R_c = \frac{1}{n-1} \sum \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (I.14)$$

R_c : rapport de confluence

N_i : le nombre de tronçons de cours d'eau d'ordre i

n : l'ordre total.

I.7.2.3.4. Rapport de torrentialité

Ce coefficient reflète le caractère torrentiel des averses dans le bassin. Il est fortement lié à la densité de drainage et à la fréquence des drains. On l'exprime par la relation suivante :

$$C_T = F_1 * D_d \quad (I.15)$$

C_T : Rapport de torrentialité

D_d : densité de drainage [Km/Km²].

F_1 : La fréquence des talwegs d'ordre 1.

$$F_1 = \frac{N_1}{S} \quad (I.16)$$

Ce paramètre est le rapport de nombre de talwegs d'ordre 1 à la surface.

N_1 : le nombre de tronçons de cours d'eau d'ordre 1.

S : superficie du bassin versant [Km²].[9]

I.8. Les Courbes IDF

Les courbes IDF (intensité-durée-fréquence) représentent les relations entre les intensités, la durée et la fréquence d'apparition des pluies. Elles permettent d'une part de synthétiser l'information pluviométrique au droit d'une station donnée et d'autre part, de calculer grossièrement des débits de projet, d'estimer des débits de crue et aussi de déterminer des pluies de projet. Elles sont établies de manière : analytique à travers la formule de Montana ou de Talbot, ou statistique par une analyse fréquentielle. [10]

I.8.1. Les caractéristiques des courbes IDF

I.8.1.1. Intensité

C'est la hauteur de pluies tombée dans l'unité de temps (intensité moyenne d'une pluie sur une période spécifique). [11]

$$I_{moy} = \frac{h}{t} \quad (I.17)$$

I_{moy} : intensité moyenne de la pluie [mm/h, mm/min]

h : hauteur de pluies de l'averse [mm].

t : durée de l'averse [h ou min].

I.8.1.2. Durée

C'est l'intervalle de temps « Δt » qui s'écoule entre le début et la fin d'une pluie, elle est souvent mesurée en minute.[11]

I.8.1.3. Fréquence d'apparition (F)

On observe une averse particulière sur une période de n années. Si cette averse s'est produit N fois durant ces n années, alors :[11]

$$F = \frac{N}{n} \quad (I.18)$$

I.8.1.4. Période de retour ou Temps de retour (T)

La période de retour est l'inverse de la fréquence :

$$T = \frac{1}{F} \quad (I.19)$$

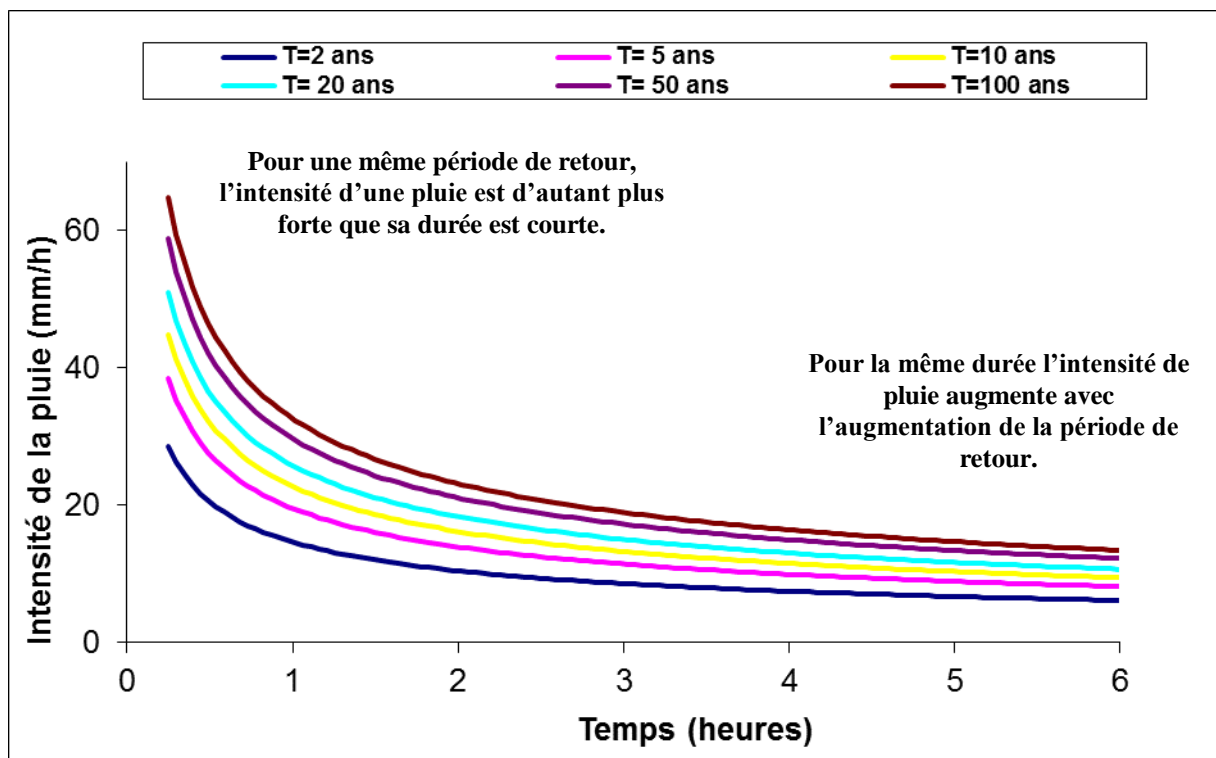


Figure I. 6: courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) de la précipitation

I.8.2. Utilisation des courbe IDF

Les courbes IDF sont construite dans le but permettent d'une part récupération des données pluviométrique d'une station et d'autre part de calculer le débits de projet ,l'estimation des débits de crues par des formule empirique ainsi déterminer les précipitation du projet utilisées dans la modélisation hydrologique et elles servent d'outil

d'aide au dimensionnement des ouvrages hydraulique et la concevoir les réseaux d'assainissement.[11]

I.8.3. Conception des courbes IDF

- ✓ Collecter des données pluviométriques enregistrées sur une longue période (une année) d'une station donnée (station météorologique).
- ✓ Identifier la précipitation maximale et pour chaque évènement déterminer Intensité moyenne maximales au pas de temps (dt ,2dt....)
- ✓ Ajuster des lois de probabilité application des formules pour déterminer la fréquence.
- ✓ Tracer la courbe de l'intensité moyenne maximale en fonction de la durée et cela pour différents période de retour.
- ✓ Modélisation la courbe IDF en ajustant une formule empirique sur les quantiles estimés pour chaque période de retour à l'aide de régressions non linéaires. Parmi les formules les plus utilisées on a celle de Montana et Talbot. [11]

I.8.3.1. Formule de Montana

Est une équation en hydrologie qui nous permettons de calculer intensité de pluies en fonction de la durée et de la période retour .elle exprimée comme suite :

$$I_T(t) = a * t^{-b} \quad (I.20)$$

$I_T(t)$: Intensité de pluviométrie d'une averse de durée t de temps de retour T [mm/h]

t : la durée de l'averse [h ou min]

a, b : paramètre d'ajustement en fonction du temps de retour de la région d'étude.

I.8.3.2. Formule de TALBOT

Il s'agit d'un modèle hyperbolique permettant le calcul d'une intensité moyenne $I_T(t)$, sur une durée t. elle exprimé comme suite :

$$I_T(t) = \frac{A}{(B + t)} \quad (I.21)$$

$I_T(t)$: Intensité de pluviométrie d'une averse de durée t de temps de retour T [mm/h]

t : Durée de la pluie [min ou h].

A, B : Constantes empiriques dépendant de la période de retour et de la région. [12]

I.9. Méthode de calcul de débits maximaux des crues

I.9.1. Définition de crue

La crue est une phase du régime hydrologique d'un cours d'eau marquée par une augmentation soudaine ou progressive du débit sous l'influence de facteurs extérieurs comme la forte précipitation et la fonte de neige. Cette montée rapide du niveau de l'eau peut entraîner non seulement le remplissage du lit mineur, submersion du lit majeur. D'après le cours d'eau on détermine le seuil qui est la moyenne interannuelle de l'écoulement.

La crue simple, si elle représente un seul point. Elle est dite complexe si elle représente plusieurs points (figure I.7).[13]

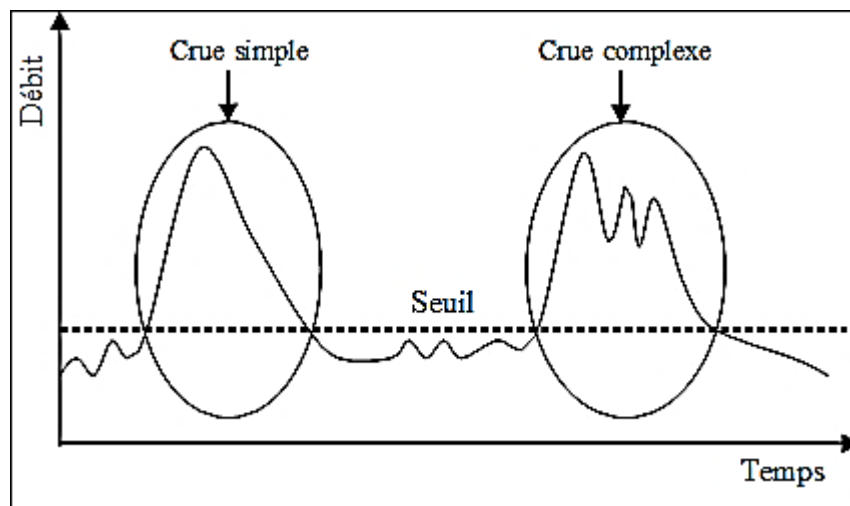


Figure I. 7:Crue simple et crue complexe.[25]

I.19.2. Les types des crue

Selon CNFNH 2000 il existe deux types de crues

I.9.2.1. Crue fluviales

Souvent saisonnier, affectent les cours d'eau importants au grand bassin versant, et l'élévation du niveau de l'eau se fait progressivement.

I.9.2.2. Crue torrentielles (rapide, brutales)

Elles sont généralement provoquées par des pluies extrêmement intenses et se caractérisent par une élévation très rapide dans de petits bassins versants où l'élévation du niveau de l'eau est particulièrement brutale.

I.9.3. Les caractéristique de crue**I.9.3.1. Débit de pointe de la crue**

C'est la valeur maximale atteint lors de la crue, C'est la caractéristique la plus recherchée pour le dimensionnement des ouvrages.

I.9.3.2. Volume de crue

C'est le volume d'eau cumulé durant toute la dure de la crue représente le volume total d'eau écoulé pendant la période de la crue.

I.9.3.3. Durée

Est indispensable dans la description du régime de crue, leur définition fait référence à une représentation simple de la transformation pluies-débit sont issue de Roche (1963) cité par Pierre Javelle (2001). [13]

I.9.3.3.1. Temps de repense

Est l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie efficace de la pointe de l'hydrogram (figure I.8).

I.9.3.3.2. Temps montée

Est la durée écoulée entre le début de l'arrivée à l'exutoire de ruissellement le maximum de l'hydrogramme.

I.9.3.3.3. Temps basé

Est la longueur sur les abscisses de l'hydrogramme de ruissèlement.

I.9.3.3.4. Temps de concentration

Le temps nécessaire à une particule d'eau pour atteindre l'exutoire depuis la zone la plus éloigné de bassin hydraulique.[14]

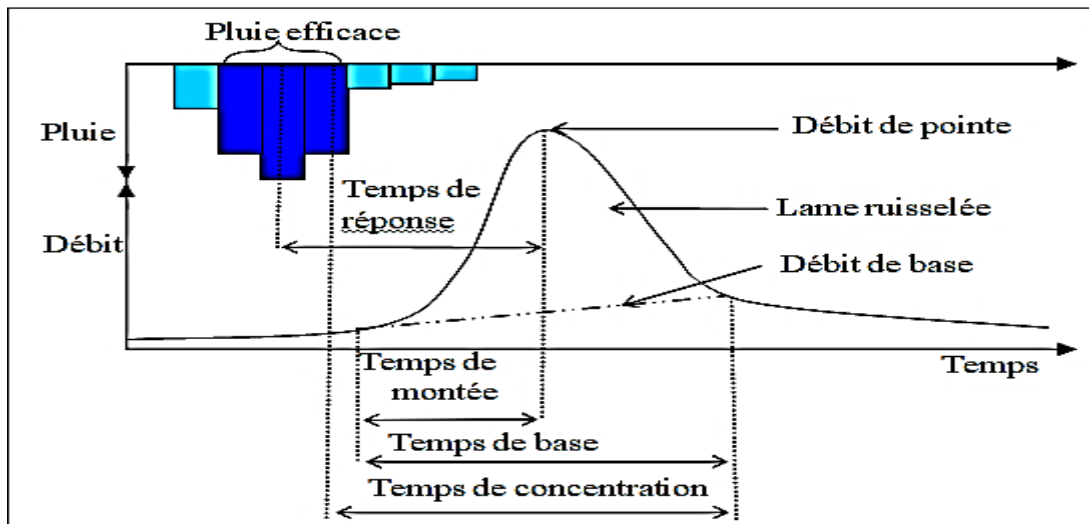


Figure I. 8: Durées caractéristiques relatives à un hydrogramme de crue.

I.10. Méthode empiriques

I.10.1. Méthode rationnelle

La notion de la technique ou formule rationnelle trouve ses racines chez un ingénieur irlandais, Mulvanay, qui était responsable du drainage agricole (1850).

En raison de sa simplicité, c'est probablement la formule la plus connue et la plus utilisée, malgré ses nombreuses hypothèses simplificatrices. Elle est particulièrement utilisée pour des bassins de petite taille et dans des conditions pluviométriques spécifiques. Toutefois, sa conception repose sur une loi physique très simplifiée : le volume d'eau écoulée est proportionnel au volume de précipitation sur l'intégralité du bassin. Le coefficient de ruissellement, également connu sous le nom de coefficient de proportionnalité, reste constant. Le volume de précipitation s'écoule sur le bassin pour une période qui correspond au temps de concentration du bassin. La méthode rationnelle part aussi du principe que le temps de montée coïncide avec le temps de concentration. Elle s'exprime ainsi :

$$Q_{max} = U * \alpha * i * S \quad (I.22)$$

Q_{max} : débit maximal de la crue [m^3/s]

α : Coefficient de ruissellement ou coefficient d'écoulement du bassin versant qui dépend de l'état du sol et de sa couverture végétale, il varie entre 0,05 et 0,95.

i : Intensité de la pluie pour une durée choisie en fonction du temps de concentration T_c
[mm/h ou mm/min]

S : Superficie du bassin versant [ha]

U : Coefficient qui est fonction des unités choisies.[13]

I.10.2. Formule d'Iskowski (1886)

Cette équation définit le débit de crue maximal (Q), basé sur la pluviométrie annuelle du bassin, et est exprimée par la formule suivante :

$$Q_{max} = \lambda * m * \bar{H} * S \quad (I.23)$$

Q_{max} : débits maximums [m^3/s]

λ : Coefficient caractérisant la morphologie du bassin, il varie entre 0.017 et 0.8.

m : coefficient variant de 10 à 1 lorsque la superficie du bassin passe de 1 à 25000 km^2

\bar{H} : Module pluviométrique moyen annuel. [mm]

S : superficie du bassin versant [Km^2].[13]

I.10.3. Formule de Turraza

Cette formule est un peu plus élaborée que les autres, basées sur les précipitations, car elle intègre aussi le temps de concentration (T_c) du bassin, à savoir le délai nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombée au point le plus haut du bassin arrive jusqu'à l'exutoire. Elle peut être formulée de cette manière (EMI, 1999). Cette formule ne prenant pas en compte la fréquence.

$$Q_{max} = \frac{\alpha PS}{3.6 T_c} \quad (I.24)$$

Q_{max} : débits maximums [m^3/s]

α : Coefficient de ruissellement du bassin versant, il varie entre 0.05 et 0.95, selon les caractéristiques du sol, de la végétation, de la pente, et de l'occupation du sol.

P : Hauteur totale maximale des précipitations pendant une durée [mm]

T_c : Temps de concentration [h]

S : Superficie du bassin versant [km^2]

i : intensité moyenne [mm/h].[13]

I.10.4. Formule de Possenti

Cette formule a été conçue sur la base de l'analyse des crues des rivières de certains bassins montagneux en Italie. Elle détermine le débit maximal en fonction des précipitations maximales sur une période de 24 heures.

$$Q_{max} = \frac{\lambda P_{24}}{L_T} \left(S_m + \frac{S_p}{3} \right) \quad (I.25)$$

Q_{max} : débit maximal de la crue. [m^3/s]

λ : Coefficient caractérisant la longueur du thalweg $700 \leq \lambda \leq 800$

P_{24} : Pluie maximale [mm] d'une durée de 24 heures en [mm]

L_T : Longueur du thalweg [m]

S_m : Surface de la partie montagneuse en [km^2]

S_p : Surface de la partie plate en [km^2].[13]

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre, d'étude bibliographique a permis de présenter la caractéristique morphologique et hydrographique du bassin versant, ainsi que les courbes IDF et les méthodes de calcul des débits maximums.

Dans le prochain chapitre, nous nous concentrons sur la présentation de la zone d'étude et la méthodologie.

CHAPITRE II :
PRESENTATION DE LA
ZONE D'ETUDE ET
METHODOLOGIE

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude dans son contexte général, en mettant en lumière ses principales caractéristiques morphologique et hydrographique de trois bassins versants : Azazga, Hamiiz et Oued Zeboudj.

L'analyse débute par une description morphologique et hydrographique de chaque bassin, en s'appuyant sur des données issues de Modèles Numériques de Terrain (MNT). Pour ce faire, des logiciels spécialisés tels que Global Mapper et ArcGIS ont été utilisés afin de traiter et d'extraire les principales informations géomorphologiques.

Par la suite, l'étude s'est focalisée sur le calcul du débit de crue à l'aide de la méthode de Turraza.

II.2. Zone d'étude**II.2.1. Géographie**

Le bassin versant d'Azazga est entre altitude 36° 44' 43"N et longitudes 4° 22' 16" E se trouve dans le nord-est algérien, précisément au centre de la Kabylie, dans la wilaya de Tizi-Ouzou. Située en amont du Fleuve Sebaou, Azazga a su tirer profit de sa position géographique entre les deux principales villes de Kabylie 30 km à l'est de Tizi Ouzou et à 90 km à l'ouest de Bejaïa. Elle est délimitée :

- à l'ouest la colline de Tizi Ouzou
- au sud Ifigh Souamaa
- à l'est Yakouren et Iferhounène
- nord par la mer Méditerranée.[15]

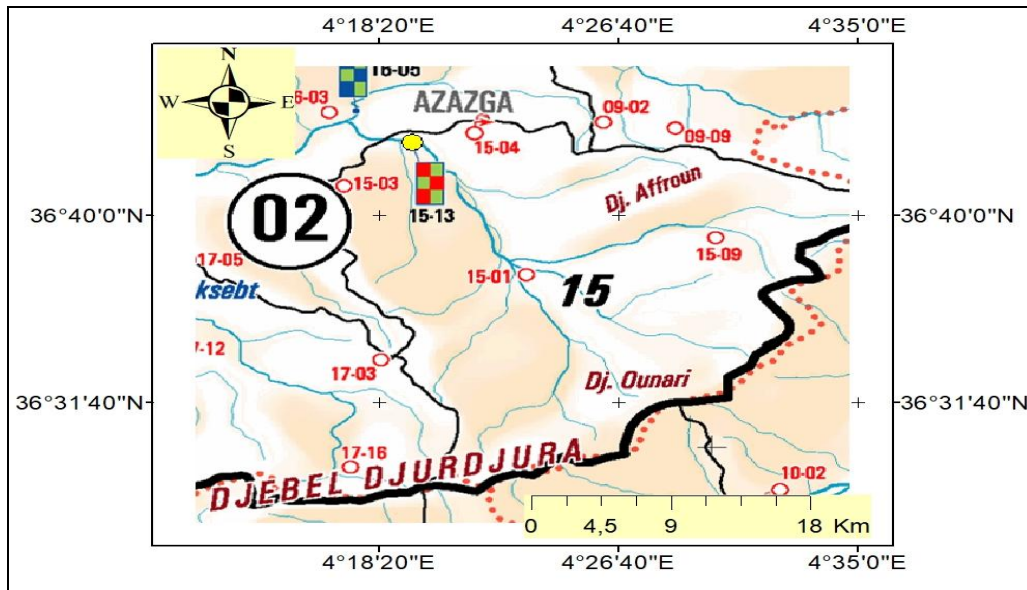


figure II. 1:carte du réseau hydro-climatique, zone N° 02, Tizi-Ouzou, Azazga.

Le bassin versant du barrage Hamiz , situé à l'attitude 36°35' N à 36°45' N longitude 3°10' E à 3°25' E dans la région nord-centre de l'Algérie entre les wilayas d'Alger et de Boumerdès, elle occupe la partie orientale de la plaine de la Mitidja ;elle est délimitée :

- Au nord par les communes de Rouïba, Dar El Beida.
- Au sud par les communes de Sohane et Boukrane.
- A l'ouest par les communes de Meftah, Les Eucalyptus.
- A l'est par les communes d'Ouled Moussa et Larache.[16]

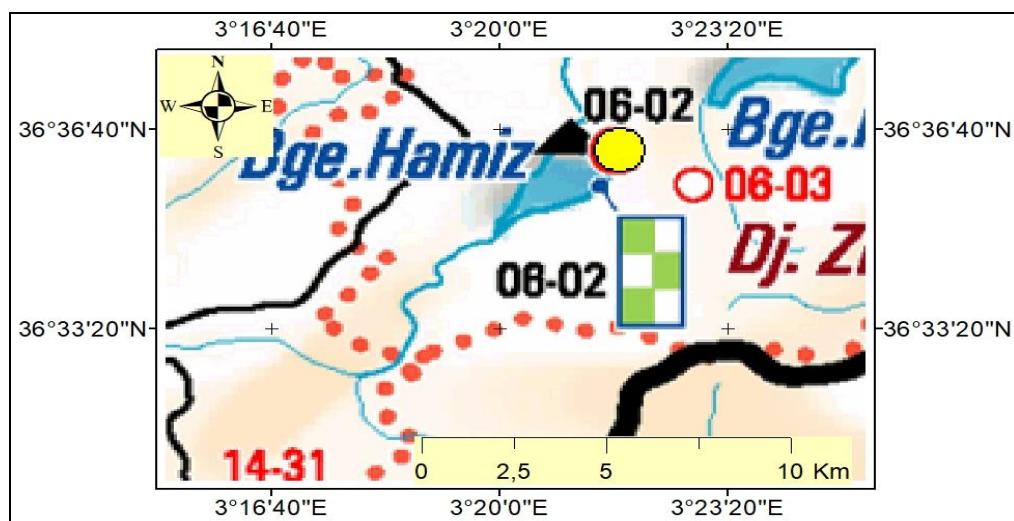


Figure II. 2:carte du réseau hydro-climatique, zone N° 02, Tizi-Ouzou, Azazga.

Le bassin versant de l'oued Zeboudj est situé l'altitude 36°18'34"N et longitudes 2°20'29"E dans le nord de l'Algérie, à la limite entre les wilayas de Tipaza et de Médéa. Il s'étend à travers une zone de transition entre les collines du Tell et la plaine occidentale de la Mitidja.

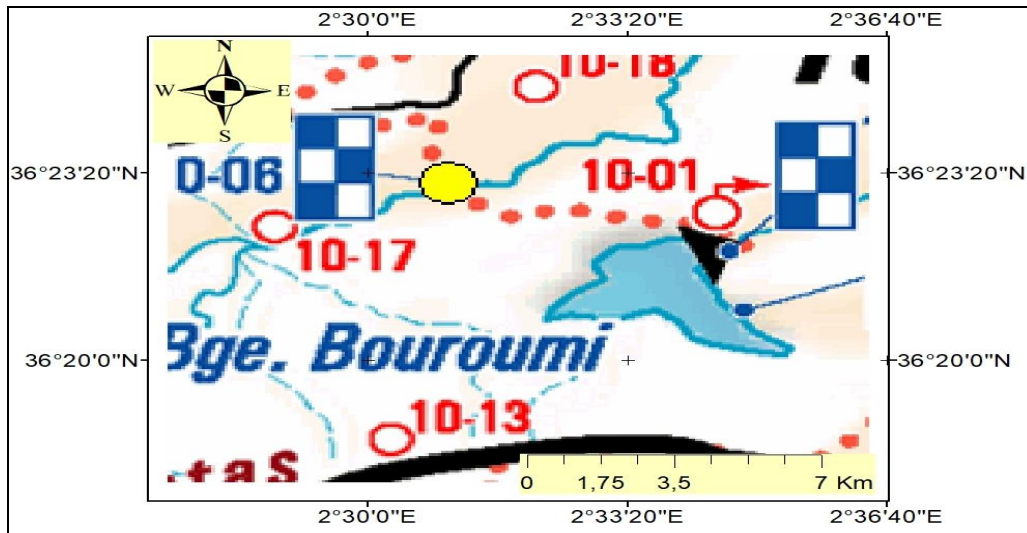


Figure II. 3:carte du réseau hydro-climatique, zone N° 02, Tizi-Ouzou, Oued Zeboudj

II.2.2. Relief

Le bassin versant d'Azazga caractérisé par un relief montagneux et escarpé, marqué par de fortes pentes, des altitudes élevées et des vallées profondes, typiques des contreforts de la Kabylie.

À l'inverse, le bassin versant de Hamiz se caractérise par un relief plus doux, composé de plaines fertiles, de collines basses et de piémonts, s'insérant dans la partie orientale de la plaine de la Mitidja.

Quant au bassin versant de l'oued Zeboudj, il présente un relief modérément vallonné, formé de collines agricoles, des pentes peu inclinées et de quelques zones légèrement encaissées vers sa source, à la frontière des wilayas de Aïn Defla et Médéa.

II.2.3. Climat

Le bassin versant d'Azazga se situe dans une zone à climat méditerranéen, marqué par une forte opposition thermique et pluviométrique au cours de l'année, avec des hivers des hivers humides et froids et des étés chauds et secs.

Le bassin versant de Hamiz, quant à lui, bénéficie d'un climat méditerranéen tempéré subhumide, caractérisé par des étés chauds et secs et des précipitations concentrées en hiver et au printemps.[15] [18]

Enfin, le bassin versant de l'oued Zeboudj, est soumis à un climat semi-humide de type méditerranéen, avec des hivers modérément pluvieux et des étés secs, influence par les pentes de l'Atlas tellien et les courants atlantiques.

II.2.4. Végétation

Le bassin versant d'Azazga se distingue par une végétation dense, riche et variée, favorisée par son relief montagneux et son climat humide. On y trouve de vastes forêts de chênes-lièges, de chênes verts, de pins d'Alep, ainsi que des cultures agricoles importantes, notamment des oliviers, figuiers, céréales et arbres fruitiers.

En revanche, le bassin versant de Hamiz présente une végétation plus clairsemée, composée de maquis, de broussailles, d'arbustes et de quelques arbres isolés, notamment dans les zones de collines. On y observe également une végétation herbacée plus diffuse.

Le bassin versant de l'oued Zeboudj, quant à lui, abrite une végétation semi-naturelle et agricole, avec des zones de collines boisées, des cultures de céréales et de légumes, ainsi que des friches, ponctuées de quelques bosquets de pins, d'eucalyptus et d'arbustes méditerranéens, caractéristiques des zones semi-humides de piémont.[15] [16]

II.3. Méthodologie, données et matériels utilisés

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé un modèle numérique d'élévation ASTER GLOBAL GDEM v2 Worldwide Elevation Data, C'est une source très importante qui fournit une représentation numérique d'une partie du terrain de la terre, permettant l'extraction de plusieurs données telles que le réseau hydrographique, la pente, l'altitude, et la délimitation des bassins versants...

Dans ce cas, L'utilisation le logiciel ArcGis 10.8 est très nécessaire pour développer cette démarche.

L'objectif principal de « ArcGis » et comment délimité un bassin versant et leur réseau hydrographique et calculé les paramètres morphologique et hydrographique a partir des cartes réalisé sur le logiciel "ArcGis".[19]

II.3.1. Présentation du logiciel ArcGis

Dans notre étude on a fait le choix de travailler avec le logiciel ArcGIS, un logiciel du leader mondial des SIG ESRI. Un choix justifié par le fait que ce dernier est l'un des logiciels SIG les plus complet et le plus utilisé à l'échelle international.

ArcGIS est constitué d'une interface ArcMap et un Système d'information Géographique permettant de visualiser, Centraliser les données spatiales dans un système unique, d'analyser et de mettre en forme les données. Il fournit des outils interactifs pour explorer, sélectionner, afficher, éditer, analyser, symboliser et classifier les données ou pour créer automatiquement, actualiser ou gérer les métadonnées. Le logiciel ArcGIS est réparti en trois grands compartiments :

1. ArcCatalog permet de structurer et de gérer les données de SIG (MNT).
2. ArcMap c'est l'application centrale d'ArcGIS, qui gère à la fois l'affichage et le traitement (analyse, édition,...) des données dans la fenêtre « data view ». La mise en page des cartes est réalisée dans la fenêtre « layout view ».
3. ArcToolbox également connu sous le nom de « boîte à outils », c'est là où ils sont regroupés l'ensemble des outils de géotraitements. On le retrouve en trois niveaux de perfectionnement progressif, à savoir : ArcView, ArcEditor et ArcInfo. [19]

II.4. Etude des caractéristiques morphologiques et hydrographiques de bassin versant Azazga

II.4.1. Caractéristiques morphologiques du bassin versant Azazga

Les caractéristiques morphologiques étudiées du bassin versant sont précisées comme suit :

➤ Superficie et périmètre

Dans notre cas, la surface et le périmètre de bassin versant est déterminés à l'aide du logiciel ArcGIS.

$$S=536,25 \text{ Km}^2$$

$$P=118,28 \text{ Km}$$

➤ Longueur du cours d'eau principale

La longueur du cours d'eau principal a pour valeur :

$$L_{cp}=34,88 \text{ Km}$$

➤ Indice de compacité de Gravilius (KG)

L'application de la formule(I.1) a donné le résultat suivant :

$$K_G=1,43$$

Donc, le bassin versant d'Azazga est allongée.

➤ **Rectangle équivalent**

Ces paramètres sont déduits à partir de la relation (I.4) et (I.5)

Ce qui nous donne une longueur : $L=47,40$ Km

Et une largeur : $l= 11,31$ Km

➤ **Courbe hypsométrique**

La courbe hypsométrique est tracée après avoir planimètre les surfaces partielles

Comprises entre les courbes de niveau successives.

On obtient les résultats suivants (voir tableau)

Tableau II. 1 : Répartition hypsométrique du bassin Azazga

Altitude(m)	Surface(Km ²)	Surface (%)	Surface cumulé (km ²)	Surface cumulé(%)	Pourcentage	élévation
58-181	181,48	7,25	181,48	7,25	100	58
181-260	223,37	8,93	404,85	16,18	92,75	181
260-343	201,33	8,05	606,18	24,23	83,82	260
343-426	204,73	8,18	810,91	32,41	75,77	343
426-508	196,58	7,86	1 007,49	40,27	67,59	426
508-588	190,81	7,63	1 198,30	47,89	59,73	508
588-667	184,99	7,39	1 383,28	55,29	52,11	588
667-746	173,47	6,93	1 556,75	62,22	44,71	667
746-826	159,3	6,37	1 716,06	68,59	37,78	746
826-907	144,18	5,76	1 860,23	74,35	31,41	826
907-991	125,98	5,04	1 986,21	79,39	25,65	907
991-1079	105,54	4,22	2 091,75	83,6	20,61	991
1079-1169	98,1	3,92	2 189,85	87,52	16,4	1079
1169-1263	83,15	3,32	2 273,00	90,85	12,48	1169
1263-1361	69,88	2,79	2 342,88	93,64	9,15	1263
1361-1464	60,15	2,4	2 403,03	96,05	6,36	1361
1464-1581	45,88	1,83	2 448,92	97,88	3,95	1464
1581-1719	28,36	1,13	2 477,28	99,01	2,12	1581
1719-1917	19,04	0,76	2 496,32	99,77	0,99	1719
1917-2304	5,66	0,23	2 501,98	100	0,23	1917
	2 501,97	100				2304

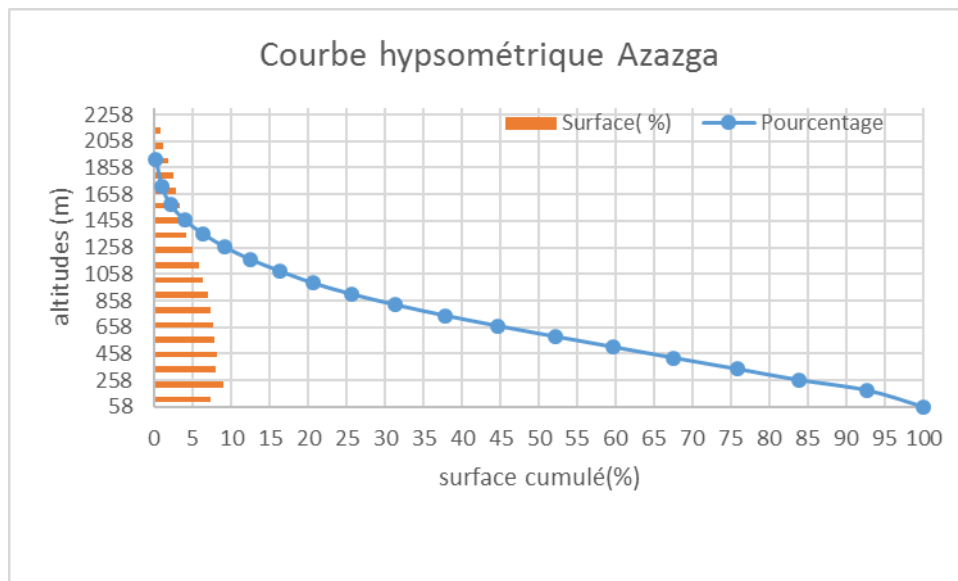


Figure II. 4: Courbe hypsométrique du bassin Azazga.

A partir de cette courbe on détermine les paramètres altimétriques :

- Altitude à 5% : $H_{5\%} = 1456$ m
- Altitude à 50% = 650 m
- Altitude à 95 % = 255 m
- L'altitude maximale est obtenue directement des cartes topographique, elle correspond au point culminant: $H_{\max} = 2304$ m
- L'altitude minimale correspond à l'exutoire : $H_{\min} = 58$ m
- L'altitude moyenne : on peut la définir suivant la formule (I.6)

$$H_{\text{moy}} = 717,47 \text{ m}$$

Tableau II. 2: Détermination de l'altitude moyenne

tranche d'altitude (m)	Hi(m)	Si(Km ²)	Hi*Si	Hmoy
58-181	119,5	181,48	21686,86	717,47
181-260	220,5	223,37	49253,085	
260-343	301,5	201,33	60700,995	
343-426	384,5	204,73	78718,685	
426-508	467	196,58	91802,86	
508-588	548	190,81	104563,88	
588-667	627,5	184,99	116081,225	
667-746	706,5	173,47	122556,555	
746-826	786	159,3	125209,8	
826-907	866,5	144,18	124931,97	
907-991	949	125,98	119555,02	
991-1079	1035	105,54	109233,9	
1079-1169	1124	98,1	110264,4	
1169-1263	1216	83,15	101110,4	
1263-1361	1312	69,88	91682,56	
1361-1464	2825	60,15	169923,75	
1464-1581	1522,5	45,88	69852,3	
1581-1719	1650	28,36	46794	
1719-1917	3636	19,04	69229,44	
1917-2304	2110,5	5,66	11945,43	
		2 501,97	1795097,12	

➤ **La pente moyenne de bassin versant**

Exprimer par la formule (I.7)

$I_{moy} = 4\%$

➤ **Indice de pente de ROCHE**

L'indice de pente I_p défini par la relation (I.8)

$I_p = 4,74\%$

➤ **Indice de pente globale I_g**

A partir de la courbe hypsométrique qui déjà tracée on prend les points

$H_{5\%} = 1456\text{ m}$ et $H_{95\%} = 255$

En appliquant la relation (I.9)

$I_g = 25,34\text{m/Km} = 2,5\%$

Selon la classification de l'ORSTOM, le bassin versant présente un relief assez fort.

➤ **Dénivelée spécifique**

Le calcul de la dénivelée spécifique est effectué, donc par la relation (I.10)

$$D_s = 586,8 \text{ m}$$

Selon la classification de l'ORSTOM, le bassin versant présente un relief très fort.

II.4.2. Caractéristique hydrographique du bassin versant Azazga

➤ **Réseau hydrographique**

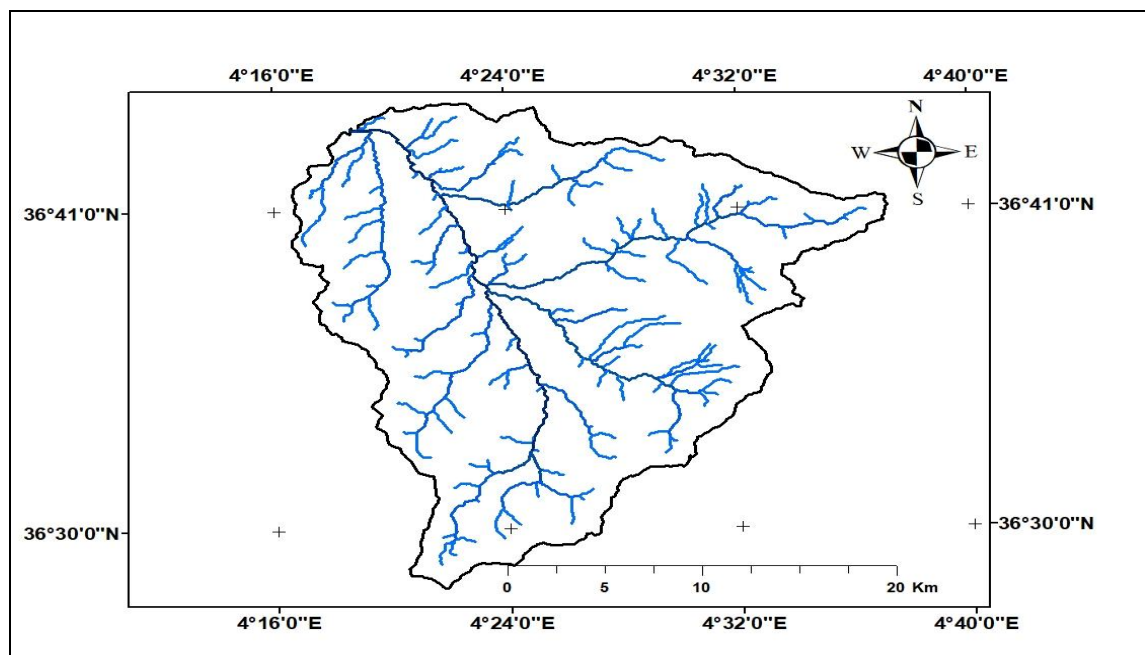


Figure II. 5: Réseau hydrographique du bassin versant Azazga

➤ **Classification hydrographique**

La figure ci-dessous illustre la classification hydrographique du réseau de drainage selon la méthode de Strahler.

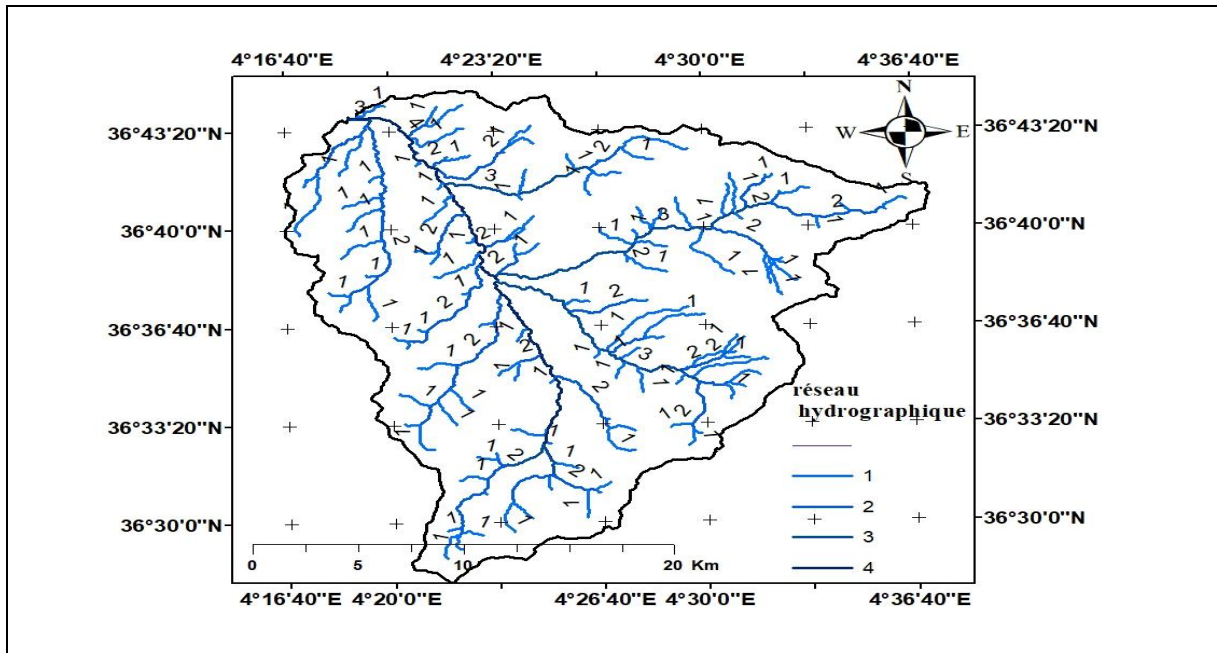


Figure II. 6: Classification du réseau hydrographique Azazga

➤ **Densité de drainage**

La densité de drainage est exprimée par la formule (I.12) estimée à 0,64 km/km²

Avec $\sum L_i = 344,11$ Km

➤ **Densité hydrographique**

Tableau II. 3 : Classification des Talwegs (Arc gis).

ordre du cours d'eau	Nombre
1	213
2	82
3	54
4	48
Total	397

La densité hydrographique est exprimé par la formule (I.13) est estimée à 0,74 Km⁻²

➤ **Rapport de confluence**

Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule(I.14)

Tableau II. 4: résultats de calcul de coefficient de confluence.

ordre	Nombre	$Rc = \frac{N_i}{N_{i+1}}$	Moyenne
1	213	2,6	1, 73
2	82	1,5	
3	54	1,1	
4	48		

5,2

➤ **Rapport de torrentialité**

Il est estimé par la formule (I.15)

Tableau II. 5: résultats de calcul de coefficient de torrentialité.

Ordre	nombre	$Fi = \frac{N_i}{S}$	Ct	Moyenne
1	213	0,39	0,25	0,12
2	82	0,15	0,1	
3	54	0,10	0,064	
4	48	0,09	0,058	

➤ **Temps de concentration**

Il se calcule par la formule de GIONDOTTI (I.11)

$T_c = 7h$

II.5. Etude des caractéristiques morphologiques et hydrographiques de bassin versant Hamiz

II.5.1. Caractéristiques morphologiques du bassin versant Hamiz

Les caractéristiques morphologiques étudiées du bassin versant sont précisées comme suit :

➤ **Superficie et périmètre**

Dans notre cas, la surface et le périmètre de bassin versant est déterminés à l'aide du logiciel ArcGIS.

$S = 139,09 \text{ Km}^2$

$P = 56,94 \text{ Km}$

➤ **Longueur du cours d'eau principale**

La longueur du cours d'eau principal a pour valeur :

$L_{cp} = 22,10 \text{ Km}$

➤ **Indice de compacité de Gravilius (KG)**

L'application de la formule(I.1) a donné le résultat suivant :

$$K_G=1,3$$

Donc, le bassin versant d'Azazga est allongé

➤ **Rectangle équivalent**

Ces paramètres sont déduits à partir de la relation (I.4) et (I.5)

Ce qui nous donne une longueur : $L=20,34$ Km

Et une largeur : $l= 6,83$ Km

➤ **Courbe hypsométrique**

La courbe hypsométrique est tracée après avoir planimètre les surfaces partielles comprises entre les courbes de niveau successives.

On obtient les résultats suivants (voir tableau II.6).

Tableau II. 6: Répartition hypsométrique du bassin el Hamiz

Altitude	surface	surface %	surface cumulé	surface cumulé %	Pourcentage	élévation
84-133	56,53	6,17	56,53	6,17	100	84
133-183	50,83	5,55	107,36	11,72	93,26	133
183-237	60,45	6,6	167,81	18,32	87,71	183
237-288	58,6	6,4	226,41	24,72	81,11	237
288-377	64,66	7,06	291,07	31,78	74,71	288
337-386	61,45	6,71	352,52	38,49	67,65	337
386-434	61,33	6,7	413,85	45,19	60,94	386
434-481	61,04	6,67	474,89	51,86	54,24	434
481-526	60,51	6,61	535,4	58,47	47,57	481
526-570	57,07	6,23	592,47	64,7	40,96	526
570-615	54,83	5,99	647,3	70,69	34,73	570
615-660	51,68	5,64	698,98	76,33	28,74	615
660-705	45,89	5,01	744,87	81,34	23,1	660
705-751	41,16	4,49	786,03	85,83	18,09	705
751-798	35,89	3,92	821,92	89,75	13,6	751
798-848	31,23	3,41	853,15	93,16	9,68	798
848-903	24,51	2,68	877,66	95,84	6,27	848
903-971	19,42	2,12	897,08	97,96	3,59	903
971-1139	13,42	1,47	910,5	100	1,47	971
	910,5	100				1139

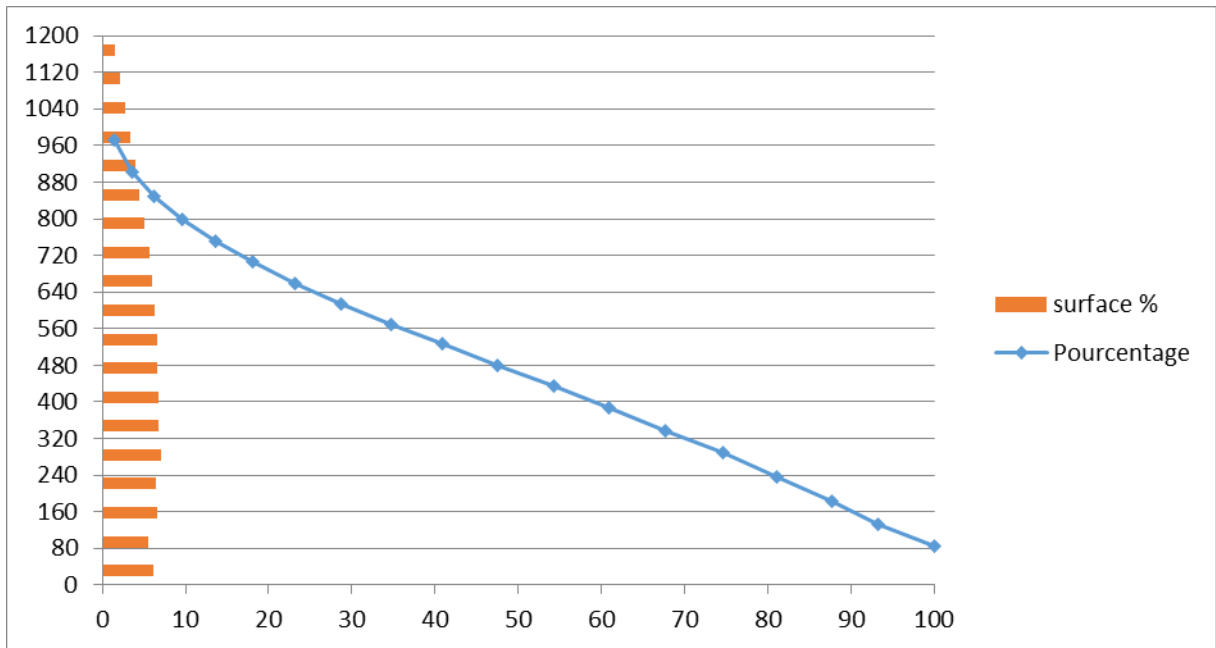


Figure II. 7: Courbe hypsométrique du bassin Hamiz

A partir de cette courbe on détermine les paramètres altimétriques :

- Altitude à 5% : $H_{5\%} = 900$ m
- Altitude à 50% = 461 m
- Altitude à 95 % = 122 m
- L'altitude maximale est obtenue directement des cartes topographique, elle correspond au point culminant : $H_{\max} = 1139$ m
- L'altitude minimale correspond à l'exutoire : $H_{\min} = 20$ m
- L'altitude moyenne : on peut la définir suivant la formule (I.6)

$H_{\text{moy}} = 476,12\text{m}$

Tableau II. 7 : détermination de l'altitude moyenne

Tranche d'altitude(m)	Hi (m)	Si (km ²)	Hi*Si	Hmoy
84-133	108,5	56,53	6133,505	
133-183	158	50,83	8031,14	
183-237	210	60,45	12694,5	
237-288	262,5	58,6	15382,5	
288-337	312,5	64,66	20206,25	
337-386	361,5	61,45	22214,175	
386-434	410	61,33	25145,3	
434-481	457,5	61,04	27925,8	

481-526	503,5	60,51	30466,785	476,12
526-570	548	57,07	31274,36	
570-615	592,5	54,83	32486,775	
615-660	637,5	51,68	32946	
660-705	682,5	45,89	31319,925	
705-751	728	41,16	29964,48	
751-798	774,5	35,89	27796,805	
798-848	823	31,23	25702,29	
848-903	875,5	24,51	21458,505	
903-971	937	19,42	18196,54	
971-1139	1055	13,42	14158,1	
		910,5	433503,735	

➤ **La pente moyenne de bassin versant**

Suivant la formule (I.7)

$$I_{\text{moy}} = 4,31\%$$

➤ **Indice de pente de ROCHE**

L'indice de pente I_p défini par la relation (I.8)

$$I_p = 5,5\%$$

➤ **Indice de pente globale I_g**

A partir de la courbe hypsométrique qui déjà tracée on prend les points

$$H_{5\%} = 900 \text{ m et } H_{95\%} = 122 \text{ m}$$

En appliquant la relation (I.9)

$$I_g = 38,2 \text{ m/Km} = 3,82\%$$

Selon la classification de l'ORSTOM, le bassin versant présente un relief assez fort.

➤ **Dénivelée spécifique**

Le calcul de la dénivelée spécifique est effectué, donc par la relation (I.10)

$$D_s = 451,1 \text{ m}$$

Selon la classification de l'ORSTOM, le bassin versant présente un relief fort.

II.5.2. Caractéristique hydrographique du bassin versant Hamiz

➤ Réseau hydrographique

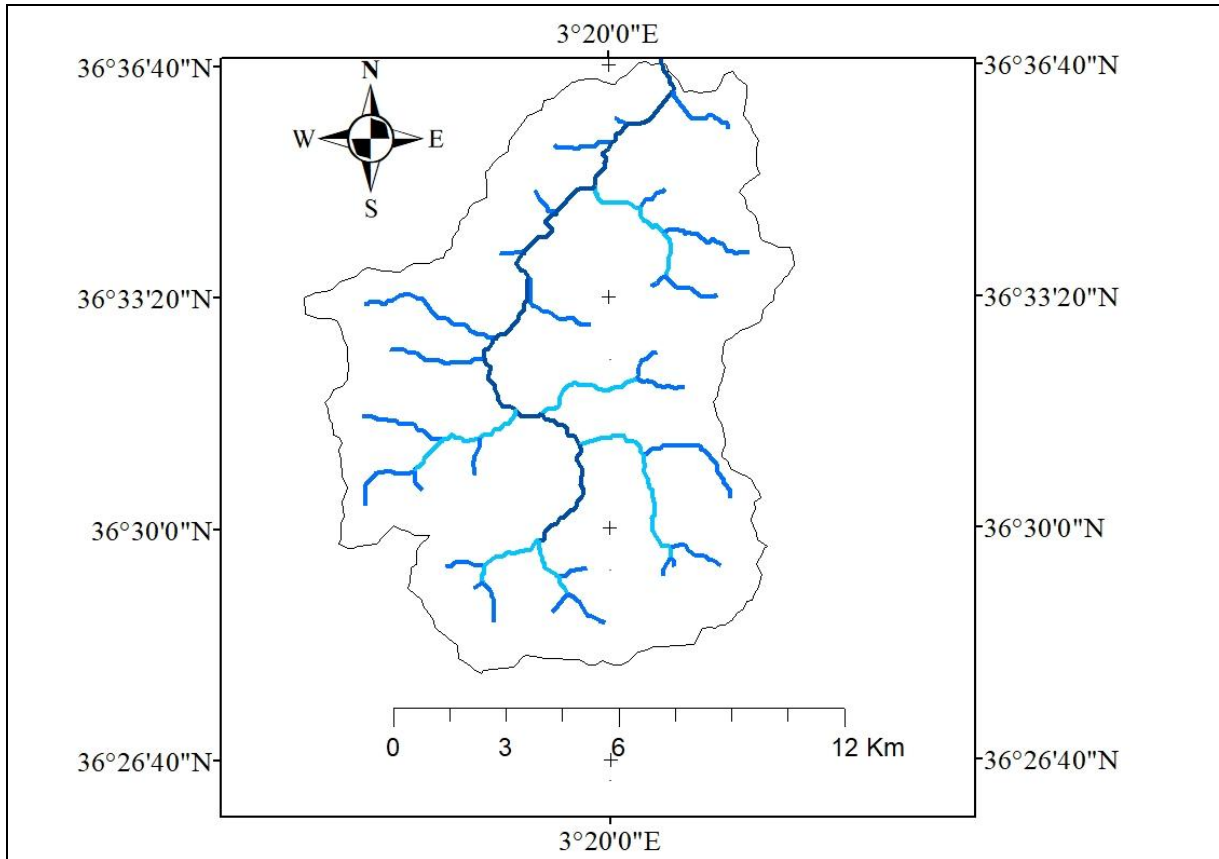


Figure II. 8: Réseau hydrographique du bassin versant Hamiz

➤ Classification hydrographique

La figure ci-dessous illustre la classification hydrographique du réseau de drainage selon la méthode de Strahler.

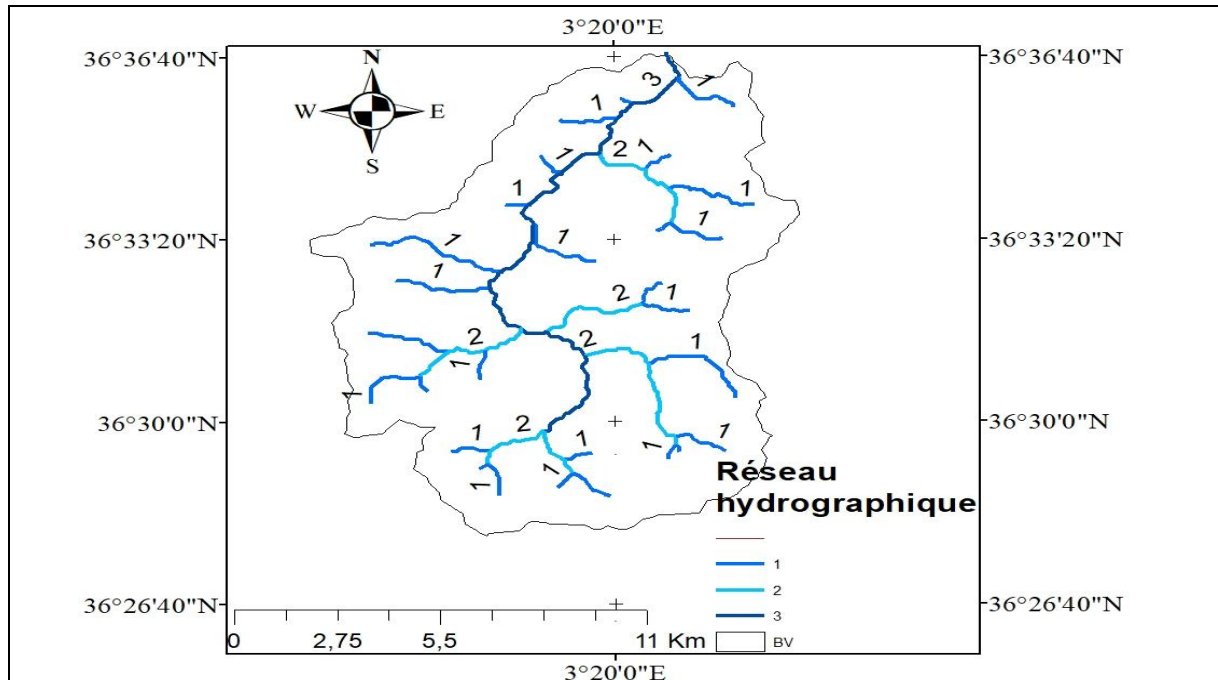


Figure II. 9: Classification du réseau hydrographique Hamiz

➤ **Densité de drainage**

La densité de drainage est exprimée par la formule (I.12) estimée à 0,58 km/km²

➤ **Densité hydrographique**

Tableau II. 8: Classification des Talwegs (Arc gis).

ordre du cours d'eau	Nombre
1	44
2	16
3	19
Total	450

La densité hydrographique est exprimé par la formule (I.13) est estimée à 0,57 Km⁻²

➤ **Rapport de confluence**

Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule(I.14)

Tableau II. 9: résultats de calcul de coefficient de confluence.

Ordre	Nombre	$Rc = \frac{N_i}{N_{i+1}}$	Moyenne
1	44	2,75	1,8
2	16	0,84	
3	19		
		3,59	

➤ **Rapport de torrentialité**

Il est estimé par la formule (I.15)

Tableau II. 10: résultats de calcul de coefficient de torrentialité.

Ordre	Nombre	$F_i = \frac{N_i}{S}$	Ct	moyenne
1	44	0,32	0,19	0,11
2	16	0,12	0,07	
3	19	0,14	0,08	

➤ **Temps de concentration**

Il se calcule par la formule de GIONDOTTI (I.11)

$T_c = 4 \text{ h}$

II.6. Etude des caractéristiques morphologiques et hydrographiques de bassin versant Oued Zeboudj

II.6.1. Caractéristiques morphologiques du bassin versant Oued Zeboudj

Les caractéristiques morphologiques étudiées du bassin versant sont précisées comme suit :

➤ **Superficie et périmètre**

Dans notre cas, la surface et le périmètre de bassin versant est déterminés à l'aide du logiciel ArcGIS.

$S = 342,21 \text{ Km}^2$

$P = 94,15 \text{ Km}$

➤ **Longueur du cours d'eau principale**

La longueur du cours d'eau principal a pour valeur :

$L_{cp} = 29,66 \text{ Km}$

➤ **Indice de compacité de Gravilius (KG)**

L'application de la formule(I.1) a donné le résultat suivant :

$$K_G=1,43$$

Donc, le bassin versant d'oued zeboudj est allongé.

➤ **Rectangle équivalent**

Ces paramètres sont déduits à partir de la relation (I.4) et (I.5)

Ce qui nous donne une longueur L=37,87Km

Et une largeur l= 9,04Km

➤ **Courbe hypsométrique**

La courbe hypsométrique est tracée après avoir planimètre les surfaces partielles

Comprises entre les courbes de niveau successives.

On obtient les résultats suivants (voir tableau II.11).

Tableau II. 11: Répartition hypsométrique du bassin Oued Zeboudj

Altitudes	Surface(Km ²)	surface(%)	Surface cumulé(Km ²)	surface cumulé(%)	pourcentage	élévation
13-100	230,29	7,57	230,29	7,57	100	13
100-167	129,96	4,27	360,25	11,84	92,43	100
167-237	115,36	3,79	475,61	15,63	88,16	167
237-297	320,24	10,53	795,86	26,16	84,37	237
297-349	277,38	9,12	1 073,24	35,27	73,84	297
349-402	271,43	8,92	1 344,67	44,20	64,73	349
402-453	283,88	9,33	1 628,55	53,53	55,80	402
453-503	262,92	8,64	1 891,47	62,17	46,47	453
503-554	238,19	7,83	2 129,66	70,00	37,83	503
554-607	191,89	6,31	2 321,55	76,30	30,00	554
607-662	163,76	5,38	2 485,30	81,69	23,70	607
662-719	143,39	4,71	2 628,69	86,40	18,31	662
719-779	119,89					719

		3,94	2 748,58	90,34	13,60	
779-846	88,55	2,91	2 837,13	93,25	9,66	779
846-921	67,84	2,23	2 904,97	95,48	6,75	846
921-1008	50,46	1,66	2 955,42	97,14	4,52	921
1008-1108	31,86	1,05	2 987,29	98,18	2,86	1008
1108-1218	25,27	0,83	3 012,56	99,02	1,82	1108
1218-1344	19,83	0,65	3 032,38	99,67	0,98	1218
1344-1563	10,13	0,33	3 042,51	100,00	0,33	1344
	3 042,51	100,00				1563

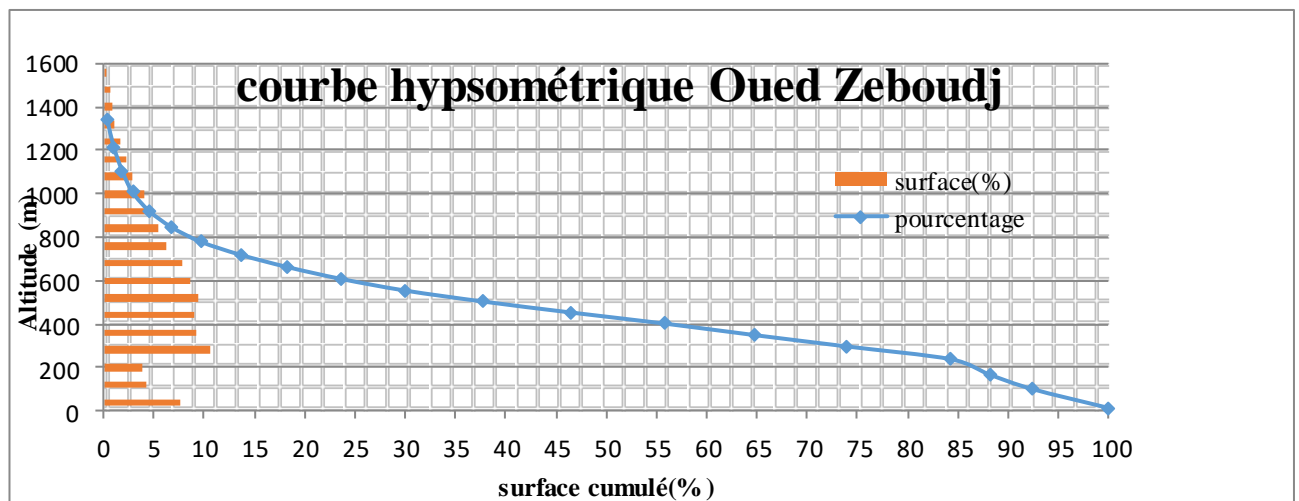


Figure II. 10: courbe hypsométrique Oued Zeboudj

A partir de cette courbe on détermine les paramètres altimétriques :

- Altitude à 5% =900 m
- Altitude à 50% = 450 m
- Altitude à 95 % =100 m
- L'altitude maximale est obtenue directement des cartes topographique, elle correspond au point culminant: $H_{max}=1563$ m
- L'altitude minimale correspond à l'exutoire : $H_{min} = 18$ m
- L'altitude moyenne : on peut la définir suivant la formule (I.6)

$$H_{moy}=457,34m$$

Tableau II. 12: Détermination de l'altitude moyenne

Tranche d'altitude(m)	Hi (m)	Si (Km ²)	Hi *Si	Hmoy(m)
13-100	56,5	230,29	13011,48008	457,34
100-167	133,5	129,96	17349,98872	
167-237	202	115,36	23302,86833	
237-297	267	320,24	85504,44698	
297-349	323	277,38	89593,84577	
349-402	375,5	271,43	101922,0814	
402-453	427,5	283,88	121359,3652	
453-503	478	262,92	125675,6861	
503-554	528,5	238,19	125884,1394	
554-607	580,5	191,89	111389,927	
607-662	634,5	163,76	103903,7705	
662-719	690,5	143,39	99009,81339	
719-779	749	119,89	89794,57727	
779-846	812,5	88,55	71945,27961	
846-921	883,5	67,84	59936,95649	
921-1008	964,5	50,46	48665,89839	
1008-1108	1058	31,86	33712,89817	
1108-1218	1163	25,27	29390,09066	
1218-1344	1281	19,83	25397,17248	
1344-1563	1453,5	10,13	14724,52251	
		3 042,51	1391474,808	

➤ La pente moyenne de bassin versant

Suivant la formule (I .7)

Imoy= 3,1%

➤ **Indice de pente de ROCHE**

L'indice de pente I_p défini par la relation (I.8)

$$I_p = 4\%$$

➤ **Indice de pente globale I_g**

A partir de la courbe hypsométrique qui déjà tracée on prend les points

$$H_{5\%} = 900 \text{ m et } H_{95\%} = 100 \text{ m}$$

En appliquant la relation (I.9)

$$I_g = 21,15 \text{ m/Km} = 2,1\%$$

Selon la classification de l'ORSTOM, le bassin versant présente un relief assez fort.

➤ **Dénivelée spécifique**

Le calcul de la dénivelée spécifique est effectué, donc par la relation (I.10)

$$D_s = 391,25 \text{ m}$$

Selon la classification de l'ORSTOM, le bassin versant présente un relief fort.

II.6.2. Caractéristique hydrographique du bassin versant Oued Zeboudj

➤ **Réseau hydrographique**

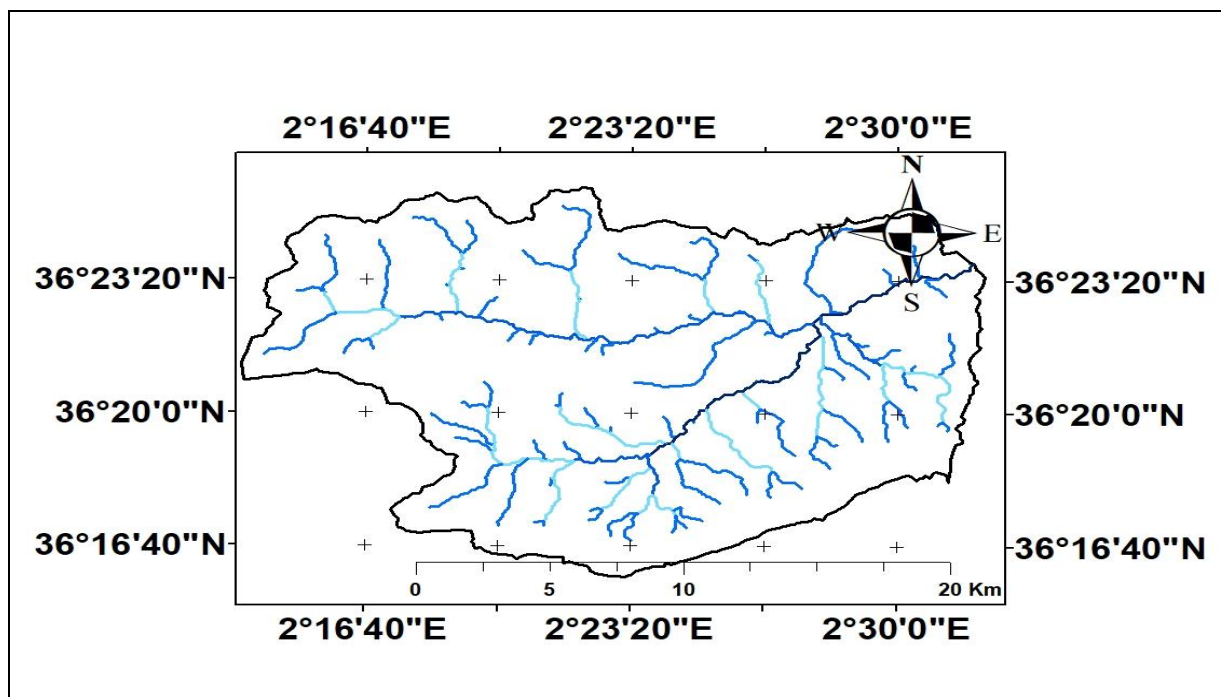


Figure II. 11: Réseau hydrographique du bassin versant Oued Zeboudj

➤ **Classification hydrographique**

La figure ci-dessous illustre la classification hydrographique du réseau de drainage selon la méthode de Strahler.

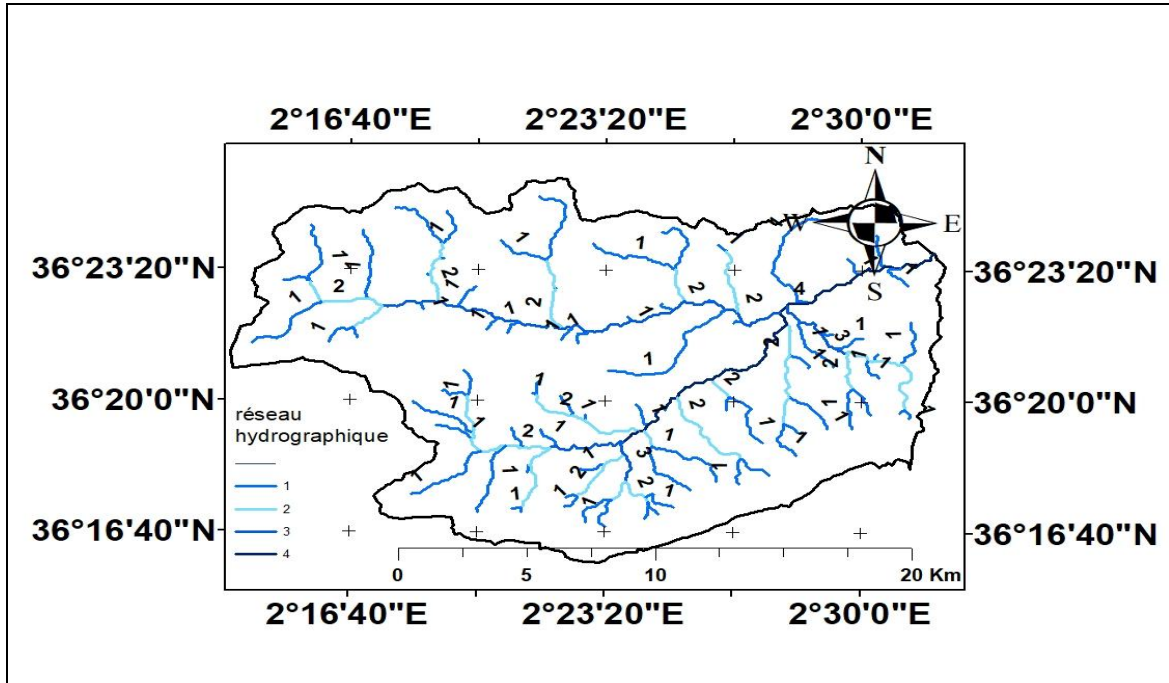


Figure II. 12: Classification du réseau hydrographique Oued Zeboudj

➤ **Densité de drainage**

La densité de drainage est exprimée par la formule (I.12) estimée à 0,65 km/km²

Avec $\sum L_i = 223,03$ Km

➤ **Densité hydrographique**

Tableau II. 13: Classification des Talwegs (Arc gis).

ordre du cours d'eau	Nombre
1	158
2	51
3	38
4	35
Total	282

La densité hydrographique est exprimé par la formule (I.13) est estimée à 0,82 Km⁻²

➤ **Rapport de confluence**

Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule(I.14)

Tableau II. 14: résultats de calcul de coefficient de confluence.

ordre	Nombre	$Rc = \frac{N_i}{N_{i+1}}$	Moyenne
1	158	3,1	1, 83
2	51	1,3	
3	38	1,1	
4	35		
		5,5	

➤ **Rapport de torrentialité**

Il est estimé par la formule (I.15)

Tableau II. 15: résultats de calcul de coefficient de torrentialité.

Ordre	nombre	$Fi = \frac{N_i}{S}$	Ct	Moyenne
1	158	0,46	0,3	0,14
2	51	0,15	0,1	
3	38	0,11	0,07	
4	35	0,10	0,07	

➤ **Temps de concentration**

Il se calcule par la formule de GIANDOTTI (I.11)

$$T_c = 7h$$

L'ensemble des caractéristiques morphologiques et hydrographiques des bassins sont Présentés dans le tableau.

Tableau II. 16: Caractéristiques morphologiques et hydrographiques des bassins

Caractéristiques	Bassin Azazga	Bassin Hamiz	Bassin Oued Zeboudj
S(Km ²)	536,25	139,09	342,21
P(Km ²)	118,28	56,94	94,15
L(Km)	47,40	20,34	37,87
l(Km)	11,31	6,83	9,04
Indice de compacité de Gravilius (K _G)	1,43	1,3	1,43
Forme	Allongée	Allongée	Allongée
Altitude maximale (m)	2304	1139	1563
Altitude minimale (m)	58	20	18
Altitude moyenne(m)	717,46	476,12	457,34
Altitude médiane(m)	650	461	450
Longueur de la cour d'eau principale L _{cp} (Km)	34,88	22,10	29,66

Pente moyenne I_{moy} (%)	4	4,31	3,1
Indice de roche I_p (%)	4,74	5,50	4
Indice de pente globale I_g (%)	2,5	3,82	2,1
Dénivelé spécifique D_s (m)	586,8	451,1	391,25
Densité de drainage D_d (Km/Km ²)	0,64	0,58	0,65
Densité hydrographique D_h (Km ⁻²)	0,74	0,57	0,82
Rapport de confluence R_c	1,73	1,8	1,83
Rapport de torrentialité C_t	0,12	0,11	0,14
Temps de concentration t_c (h)	7	4	7

II.7. Description des bassins versants

Le bassin d'Azazga, se situe dans la wilaya de Tizi Ouzou, à une surface de 536,25 Km² et un périmètre de 118,28 Km. Il a une forme allongée vue ($K_c=1,43$). Il a une longueur de 47,40Km .Ces altitudes max et min sont respectivement (2304- 58 m) avec une moyenne d'altitude de 717,46 m. la pente moyenne est très faible 4,1 %.

Bassin versant de Hamiz est situé dans la commune de Larbâtache de la wilaya de Boumerdès à une surface de 139,09 Km et un périmètre de 56,94 Km. Sa forme est allongée ($K_c=1,3$), son altitude maximale est de 1139 alors que l'altitude minimale est de 20, altitude moyenne 476,12. Son relief est très forts, la pente moyenne ($I_m=0,4$) avec une pente globale de 3,8.

Bassin versant Oued Zeboudj est situé dans la wilaya d'Ain Defla à une surface de 342,21 Km 2 et un périmètre de 94,15 Km. Sa forme est allongée ($K_c=1,43$), son altitude maximale est de 1563 alors que l'altitude minimale est de 18, altitude moyenne 457,34. Son relief est très forts, la pente moyenne ($I_m=3,1\%$) avec une pente globale de 2,1%.

II.8. Intensité des pluies

Les données d'intensité de la pluie ont été fournies par le professeur DAMELASH Wondimagegnehu, professeur à l'Arba Minch University Water Technology Institute (AWTI) en Éthiopie.

Tableau II. 17: Intensité des pluies pour bassin versant Azazga

Temps(h) Période de retour (ans)	0,25	0,5	1	2	3	6	12	24	a	b
2	25,33	21,03	15,60	11,00	8,89	6,31	4,53	2,84	14,63	0,48
5	35,84	28,43	20,52	14,24	11,39	7,97	6,04	3,99	19,56	0,49
10	42,97	33,28	23,69	16,30	12,96	9,01	7,03	4,77	22,77	0,49
20	49,91	37,90	26,67	18,22	14,42	9,97	7,96	5,52	25,81	0,49
50	59,07	43,88	30,48	20,66	16,26	11,17	9,16	6,51	29,71	0,49
100	66,10	48,37	33,31	22,46	17,62	12,05	10,06	7,27	32,64	0,50

Tableau II. 18: Intensité des pluies pour bassin versant Azazga

Temps(h) Période de retour (ans)	0,25	0,5	1	2	3	6	12	24	a	b
2	38,55	26,20	19,33	12,33	9,55	5,48	3,64	2,14	17,64	0,64
5	51,16	33,16	24,46	15,05	11,83	7,18	5,22	3,42	22,63	0,6
10	59,32	37,51	27,66	16,70	13,24	8,28	6,30	4,36	25,78	0,58
20	67,03	41,53	30,62	18,20	14,53	9,30	7,36	5,33	28,71	0,56
50	76,92	46,57	34,33	20,05	16,13	10,61	8,77	6,68	32,4	0,56
100	84,30	50,26	37,05	21,38	17,29	11,58	9,86	7,77	35,12	0,54

Tableau II. 19: Intensité des pluies pour bassin versant Oued Zeboudj

Temps (h) Période de retour (h)	0,25	0,5	1	2	3	6	12	24	a	b
2	34,68	23,39	15,59	10,30	7,99	5,33	3,45	2,06	15,40	0,61
5	62,90	39,17	24,26	14,96	11,14	7,24	4,87	3,39	24,36	0,64
10	85,89	51,31	30,58	18,17	13,25	8,50	5,82	4,39	30,96	0,66
20	111,0	64,11	37,0	21,35	15,2	9,70	6,7	5,44	37,7	0,6

	8		2		9		6		4	7
50	148,3 5	82,37	45,9 0	25,59	17,9 6	11,2 6	7,9 9	6,93	47,1 6	0,7 0
100	179,9 1	97,35	52,9 7	28,87	19,9 9	12,4 3	8,9 3	8,14	54,7 1	0,7 0

II.9. Calcule des débits maximaux de crues

Plusieurs méthodes existent pour la prédétermination des débits max ; ces méthodes sont en fonction de la disponibilité des données et des caractéristiques des bassins versants. Donc, on a opté pour la méthode de Turraza.

II.9.1. La formule de Turraza

Tableau II. 20: débits max de crues pour bassin versant Azazga

temps (h)	0,25	0,5	1	2	3	6	12	24
α	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
T_C (h)	7	7	7	7	7	7	7	7
S (Km ²)	536,25	536,25	536,25	536,25	536,25	536,25	536,25	536,25
I_2 (mm/h)	25,33	21,03	15,6	11	8,89	6,31	4,53	2,84
P_2	6,33	10,51	15,59	22,00	26,68	37,83	54,35	68,22
Q_2 (m ³ /s)	94,35	156,66	232,32	327,77	397,43	563,53	809,70	1016,26
I_5 (mm/h)	35,84	28,43	20,52	14,24	11,39	7,97	6,04	3,99
P_5	8,96	14,21	20,52	28,48	34,16	47,82	72,54	95,80
Q_5 (m ³ /s)	133,45	211,71	305,68	424,26	508,90	712,27	1080,4 9	1427,00
I_{10} (mm/h)	42,97	33,28	23,69	16,30	12,96	9,01	7,03	4,77
P_{10}	10,74	16,64	23,69	32,60	38,88	54,05	84,36	114,42
Q_{10} (m ³ /s)	160,01	247,85	352,88	485,59	579,19	805,15	1256,5 5	1704,34
I_{20}	49,91	37,90	26,67	18,22	14,42	9,97	7,96	5,52
P_{20}	12,48	18,95	26,67	36,44	43,27	59,81	95,55	132,49
Q_{20}	185,87	282,28	397,30	542,85	644,47	890,88	1423,3 3	1973,49
I_{50}	59,074	43,875	30,477	20,656	16,263	11,170	9,161	6,510
P_{50}	14,77	21,94	30,48	41,31	48,79	67,02	109,94	156,25
Q_{50} (m ³ /s)	219,99	326,78	453,99	615,38	726,76	998,31	1637,5 9	2327,48
I_{100} (mm/h)	66,10	48,37	33,31	22,46	17,62	12,05	10,06	7,27
P_{100}	16,52	24,19	33,31	44,91	52,86	72,30	120,71	174,41
Q_{100} (m ³ /s)	246,15	360,27	496,19	669,04	787,37	1077,02	1798,0 3	2598,02

Tableau II. 21 : débits max de crues pour bassin versant Hamiz

temps (h)	0,25	0,5	1	2	3	6	12	24
α	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$T_c(h)$	4	4	4	4	4	4	4	4
S (Km ²)	139,09	139,09	139,09	139,09	139,09	139,09	139,09	139,09
I_2 (mm/h)	38,55	26,20	19,33	12,33	9,55	5,48	3,64	2,14
P_2	9,64	13,10	19,33	24,66	28,64	32,89	43,68	51,47
Q_2 (m ³ /s)	65,17	88,58	130,69	166,71	193,63	222,36	295,31	348,01
I_5 (mm/h)	65,17	88,58	130,69	166,71	193,63	222,36	295,31	348,01
P_5	12,79	16,58	24,46	30,09	35,50	43,10	62,62	82,00
Q_5 (m ³ /s)	345,91	224,21	165,36	101,73	80,01	48,57	35,29	23,10
I_{10} (mm/h)	59,32	37,51	27,66	16,70	13,24	8,28	6,30	4,36
P_{10}	14,83	18,76	27,66	33,40	39,72	49,66	75,62	104,62
Q_{10} (m ³ /s)	100,27	126,81	187,02	225,80	268,56	335,74	511,29	707,36
I_{20}	16,76	20,76	30,62	36,40	43,58	55,81	88,36	127,93
P_{20}	16,76	20,76	30,62	36,40	43,58	55,81	88,36	127,93
Q_{20} (m ³ /s)	113,31	140,39	207,03	246,08	294,67	377,35	597,41	864,96
I_{50}	76,92	46,57	34,33	20,05	16,13	10,61	8,77	6,68
P_{50}	19,23	23,28	34,33	40,09	48,38	63,65	105,27	160,42
Q_{50} (m ³ /s)	130,01	157,42	232,12	271,09	327,09	430,37	711,77	1084,65
I_{100} (mm/h)	84,30	50,26	37,05	21,38	17,29	11,58	9,86	7,77
P_{100}	21,07	25,13	37,05	42,77	51,86	69,48	118,31	186,54
Q_{100} (m ³ /s)	142,49	169,91	250,50	289,16	350,65	469,79	799,92	1261,26

Tableau II. 22: débits max de crues pour bassin versant Oued Zeboudj

temps (h)	0,25	0,5	1	2	3	6	12	24
α	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$T_c(h)$	7	7	7	7	7	7	7	7
S (Km ²)	342,21	342,21	342,21	342,21	342,21	342,21	342,21	342,21
I_2 (mm/h)	34,68	23,39	15,59	10,30	7,99	5,33	3,45	2,06
P_2	8,67	11,69	15,59	20,61	23,98	31,97	41,40	49,51
Q_2 (m ³ /s)	82,42	111,17	148,21	195,90	227,97	303,90	393,56	470,65
I_5 (mm/h)	62,90	39,17	24,26	14,96	11,14	7,24	4,87	3,39
P_5	15,73	19,59	24,26	29,91	33,41	43,43	58,39	81,33
Q_5 (m ³ /s)	149,48	186,19	230,66	284,33	317,59	412,85	555,02	773,10

I ₁₀ (mm/h)	85,89	51,31	30,58	18,17	13,25	8,50	5,82	4,39
P ₁₀	21,47	25,65	30,58	36,35	39,74	50,98	69,89	105,44
Q ₁₀ (m ³ /s)	204,11	243,86	290,72	345,53	377,74	484,63	664,38	1002,3 3
I ₂₀	111,08	64,11	37,02	21,35	15,29	9,70	6,76	5,44
P ₂₀	27,77	32,06	37,02	42,70	45,86	58,20	81,08	130,65
Q ₂₀ (m ³ /s)	263,97	304,71	351,92	405,86	435,90	553,20	770,74	1241,9 8
I ₅₀	148,35	82,37	45,90	25,59	17,96	11,26	7,99	6,93
P ₅₀	37,09	41,19	45,90	51,17	53,87	67,54	95,82	166,30
Q ₅₀ (m ³ /s)	352,56	391,52	436,32	486,42	512,12	642,03	910,89	1580,7 9
I ₁₀₀ (mm/h)	179,91	97,35	52,97	28,87	19,99	12,43	8,93	8,14
P ₁₀₀	44,98	48,68	52,97	57,74	59,98	74,59	107,11	195,30
Q ₁₀₀ (m ³ /s)	427,56	462,71	503,55	548,82	570,18	709,02	1018,19	1856,5 2

II.10. Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons présenté le site de trois bassins versants et nous avons pu cerner toutes les caractéristiques des trois bassins versants concernés par l'étude de Azazga, Hamiz et Oued Zeboudj à partir de logiciel ARCGIS et nos calculs. Cette étape nous a également permis de calculer l'intensité des précipitations ainsi que le débit de crue pour chacun des sites étudiés, fournissant ainsi une base solide pour les analyses ultérieures de notre travail.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter le logiciel HEC-HMS.

CHAPITRE III
PRESENTATION DU MODELE
HYDROLOGIQUE HEC-HMS

III.1. Introduction

Dans le cadre de la modélisation hydrologique, le choix d'un outil performant et adapté aux caractéristiques du bassin versant étudié est essentiel. Parmi les modèles les plus utilisés dans ce domaine, HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) se distingue comme l'un des outils les plus couramment employés en hydrologie opérationnelle. Il permet de simuler les processus hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant et d'estimer les débits générés en réponse aux précipitations.

Ce chapitre est consacré à la présentation détaillée du modèle HEC-HMS, afin de fournir une compréhension claire et structurée de son fonctionnement.

III.2. Présentation du logiciel HEC-HMS

III.2.1. La description du modèle HEC-HMS

Le HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), ce modèle hydrologique a été développé par le "Hydrologic Engineering Center (HEC)" de l'U.S .Army corp of Engineers (USACE). La première version de ce logiciel est apparue en 1995.

C'est un modèle pluie-débit, qui se compose d'une série de modèles hydrologiques, capables de représenter le fonctionnement d'un bassin versant de manière spatialisé.

HEC-HMS est un modèle qui permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs sous bassin, qui sont considérés comme ayant chacun des caractéristiques homogènes.

Ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs telle que, les études de drainage urbain, la prévision des crues et leur impact, la conception des réservoirs, ainsi que la réduction des effets des inondations.

Il existe plusieurs version, et nous, dans notre travail, nous concentrons sur la version publique, à savoir HEC-HMS 4.12.

Le logiciel HEC-HMS offre la possibilité de traiter ou de simuler à la fois les différents données suivantes :

- Les précipitations : ces données peuvent correspondre à des mesures réelles de pluie lors d'évènements pluvieux ordinaires ou exceptionnels, mais aussi à des évènements pluvieux théoriques basés sur une analyse statistique.

Les pertes, soit par :

- infiltration : c'est le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol lors des précipitations.

- évapotranspiration : qui caractérise le transport de l'eau de la surface vers l'atmosphère, représente l'ensemble de l'évaporation direct de l'eau du sol et la transpiration effectués par les végétaux.

L'évaluation du ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant est rendue possible grâce à ces deux éléments l'infiltration et l'évapotranspiration.

- ✓ Le ruissellement direct : qui prennent en compte les écoulements de surface, le stockage et les pertes de charge.[20]

III.2.2. L'organisation du modèle HEC-HMS

Pour faciliter la construction d'un modèle complet adapté aux situations particulières de chaque étude de cas, il est indispensable que le modèle contienne au minimum quatre modèles et deux fonctions cruciales pour la modélisation via HEC-HMS, deux autres modèles supplémentaires sont disponibles si nous souhaitons affiner nos résultats et nos analyses. Ces composants sont ordonnés ci-dessous selon leur priorité de conception.[4]

III.2.2.1. Le modèle structural du bassin

Cela implique de schématiser le bassin versant examiné en composantes essentielles connectés sous forme d'un arbre ramifié. Le HEC-HMS permet de modéliser toutes les entités naturelles ou artificielles qui sont situées dans un bassin et qui ont un impact sur le processus de transformation pluie-débit, allant depuis les sous-bassins, les exutoires jusqu'aux canaux de diversion d'eau, sans oublier les réservoirs, les retenues de barrages, etc. On cite ci-après ces composants et leurs fonctions dans la représentation de l'état du bassin versant : [4]

- ✓ L'élément "subassin" : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.
- ✓ L'élément "Reach" : représente généralement la rivière et il sert à faire la connexion entre les autres composants. L'information de base attachée est la fonction de routage.
- ✓ L'élément "Reservoir" : les réservoirs et les retenues de barrage, avec leurs caractéristiques attribués, permettent d'établir les conditions de stockage et de déstockage.

- ✓ L'élément "source " : apport supplémentaire d'un cours d'eau qui facilite l'installation de stations pour mesurer le débit ou la représentation des conditions aux limites.
- ✓ L'élément "Jonction" : emploie pour combiner au moins deux éléments, comme dans le contexte de la confluence de deux rivières.
- ✓ L'élément "Diversion" : désigne des zones ou des prélèvements d'eau ont lieu, comme c'est le cas pour les canaux de diversion .C'est l'un des points de faiblesse de HEC-HMS.
- ✓ L'élément "Sink» : simule l'exutoire des sous bassin versants.[20]

III.2.2.2. Le modèle météorologique

Son but est de distribuer les précipitations saisies sur l'ensemble de la surface étudiée.

Le HEC-HMS propose huit méthodes différentes, à choisir en fonction des objectifs et de la disponibilité des données. Toutefois, elles partagent presque toutes une Caractéristique de répartir de manière homogène la hauteur de pluie dans le temps et l'espace. Ces méthodes sont :

- ✓ "Specified Hyetograph" : hyétogramme spécifié, c'est l'utilisateur qui se charge de saisir son hyétogramme dont il dispose.
- ✓ "Frequency Storm» : averse de fréquence, utilisé pour développer un événement de précipitation où les hauteurs pour différentes durées dans l'averse ont une probabilité cohérente.
- ✓ "Gages weights" : stations pondérées, utilise un coefficient de pondération à chaque station de mesure de précipitations.
- ✓ "Inverse distance " : l'inverse de distance, calcule la moyenne de pluie par l'application de la méthode d'inverse carré des distances pour attribuer à chaque station un coefficient de pondération.
- ✓ "Gridded precipitations» : précipitations en maille, permet d'introduire les précipitations sous forme de grille de mesure.
- ✓ "Standard Project Storm» : averse de projet standard, répartie une hauteur de précipitations donnée sur un intervalle de temps spécifié.
- ✓ " SCS Storm» : averse SCS, applique à la hauteur de précipitations journalière une des distributions d'averse de projet définies par le SCS.[4]

III.2.2.3. Le modèle de la fonction de production

La fonction de production assure la transformation de la pluie brute en pluie nette, en déduisant toutes les pertes possibles dues à l'interception (obstacles, végétation, cuvettes, etc.), l'infiltration et l'évapotranspiration (lors d'une modélisation continue).

La fonction de production du modèle HEC-HMS fait une distinction entre une surface perméable et imperméable. La première est perçue comme les champs d'intervention de la fonction, afin d'éviter de surévaluer les précipitations qui contribuent réellement au ruissellement, appelées pluies nettes. Quant à la seconde, elle est présumée non touchée par les pertes dues à la pluie, surtout si elle liée au réseau hydrographique et est identifiée dans le modèle par le taux d'imperméabilité du bassin. Cette fonction peut être représentée par six formalismes différents, à savoir :

- ✓ "Initial and Constant Loss" : pertes initiales, à taux constant. Ce formalisme considère un taux maximum de pertes constant, et une perte initiale à atteindre avant que le ruissellement ne se produise.
- ✓ "Deficit and Constant Loss" : à déficit et à taux de perte constant. Une variante du premier formalisme qui permet de régénérer les pertes initiales pendant une période sans la pluie pendant de l'événement modélisé.
- ✓ "Green and Ampt Loss" : formalisme qui s'intéresse plutôt aux pertes par infiltration, Cette technique se base sur l'équation de Darcy et la conservation de masse.
- ✓ "Soil Moisture Accounting Loss» : formalisme très poussé qui calcule les pertes par évapotranspiration, infiltration et percolation profonde en se basant sur le concept de couche de stocka.
- ✓ "SCS Curve Number Loss " : formalisme qui relie les pertes en pluie à l'occupation du sol et le type de sol et l'humidité antécédente.
- ✓ "Gridded SCS Curve Number Loss" : format maillé du formalisme précédent.

Le choix de l'un de ces formules est une étape délicate qui va certainement avoir un impact sur les résultats du modèle. La première contrainte à prendre en compte est que la décision peut être influencée par les formalismes utilisés pour les autres modèles (modèle météorologique, fonction de transfert, etc.) tandis que la seconde dépend de la nature des données disponible (sous forme de maille, détaillées, plusieurs variables).[4]

III.2.2.4. Le modèle de la fonction de transfert :

Une fois évaluée la pluie qui contribue au ruissellement, c'est alors le moment d'intervenir pour la fonction de transfert. Cette étape est essentielle pour transformer la pluie efficace en hydrogramme de débit à l'exutoire. Ce modèle à six formalismes pour calculer : [21]

- ✓ "User-Specified Unit Hydrograph» : Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur. Ce formalisme vise à établir l'hydrogramme unitaire en se basant sur des données complètes d'un événement pluvieux.
- ✓ " Snyder Unit Hydrograph» : Hydrogramme unitaire de Snyder.
- ✓ " Kinematic Wave» : onde cinétique. Reconnaît les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant est équivalent à la pluie nette.
- ✓ "SCS Unit Hydrograph" : Hydrogramme unitaire de la SCS. Résultant de la combinaison des hydrogrammes de plusieurs bassins versants.
- ✓ "Clark Unit Hydrograph» : Hydrogramme unitaire de Clark. Prend en compte les deux phénomènes de translation et d'atténuation.
- ✓ " Mod Clark» : forme maillée du dernier formalisme.[4]

III.2.2.5. Le modèle de débit de base

C'est l'un des deux modèles complémentaires du modèle, à défaut duquel le HEC-HMS peut fonctionner, mais sa présence améliore la compréhension des processus qui contrôlent le ruissellement dans le bassin d'étude.

Le débit de base est la contribution du réservoir souterrain dans l'écoulement, sa compréhension est essentiel pour modéliser la récession de l'hydrogramme avant et après la pointe de débit, ainsi que pour mieux estimer le volume de crue. Le modèle propose trois formalismes :

- ✓ "Constant Monthly «: Constante mensuelle. Il est considéré que l'écoulement souterrain reste constant sur des périodes d'un mois. Ainsi, ce débit mensuel de base est donc ajouté au ruissellement direct provenant des précipitations nettes.
- ✓ " Linear Reservoir» : Réservoir linéaire. Il simule le stockage souterrain d'un réservoir, il est donc toujours lié à la fonction de production type SMA.
- ✓ "Recession» : utilise une récession exponentielle du débit de base. Elle est employée pour les bassins ou les volumes de crue sont affectés par les événements

pluvieux.[4]

III.2.2.6. Le modèle de Routage

C'est le deuxième des deux modèles complémentaires, Ce modèle permet de déterminer l'hydrogramme en aval d'un bassin versant à partir de l'hydrogramme en amont, en appliquant l'un des formalismes suivants :

- ✓ Lag
- ✓ Muskingum
- ✓ Modified Plus
- ✓ kinematic-wave
- ✓ Muskingum Cunge.[4]

III.2.2.7 La fonction objective

Elle mesure la qualité de l'ajustement de l'hydrogramme simulé à l'hydrogramme observé que ce soit en termes de débit, de volume ou du temps. Le HEC-HMS comprend sept fonctions objectives à savoir :

- ✓ "Peak weighted RMS error « : Changement de la fonction objectif couramment employée qui est l'erreur sur la racine moyenne des carrés.de débit. Cette technique donne plus de poids aux débits en dessus de la moyenne et moins de poids aux débits en dessous.
- ✓ "Sum of squared residuals " : la somme des résidus au carré, attribue plus de poids aux larges erreurs et moins aux petits erreurs.
- ✓ " Sum of Absolute Residuals» : La somme des résidus absolus, qui ne fait pas de différence entre les erreurs large et celles restreintes.
- ✓ "Percent Error in Peak Flow» : le pourcentage d'erreur sur le débit de pointe, qui se concentre sur l'ajustement des débits de pointe.
- ✓ " Percent Error in Volume « : le pourcentage d'erreur sur le volume, qui se focalise sur l'ajustement des volumes de ruissellement.
- ✓ "RMS Log Error» : emploi l'erreur sur la moyenne de la racine carrée des log des débits pour mettre en phase les débits faibles et forts.
- ✓ "Time weighted» : donne du poids aux erreurs proches survenant près de la fin de l'événement et moins aux erreurs du début.[4]

III.2.2.8. La fonction d'optimisation automatique

Elle est utilisée pour trouver, sans intervention de l'utilisateur, le jeu optimal de paramètres qui donne à la fonction objective sa valeur la plus avantageuse. Le HEC-HMS offre deux méthodes pour accomplir cette tâche :

- ✓ "Univariate Gradient» : le gradient uni-varié, ajuste un seul paramètre à la fois tout en gardant les autres constants.
- ✓ "Nelder et Mead» : Utilise une méthode visant à optimiser tous les paramètres simultanément. Chacune a le paramètre suivant :
- ✓ La tolérance : détermine la valeur de changement de la fonction objective en dessous de laquelle l'optimisation des paramètres s'arrête.
- ✓ Maximum d'itérations : détermine le nombre maximal de jeux de paramètres à essayer avant d'arrêter l'optimisation.
- ✓ La fonction d'optimisation s'arrête une fois l'une de ces conditions est remplie :
- ✓ La valeur de la fonction objective est nulle.
- ✓ Le nombre d'itérations est atteint et ceci quel que soit la valeur de la fonction objective.
- ✓ La valeur de variation de la fonction objective est en inférieure à la tolérance.[4]

III.2.3. Développement d'un projet HEC-HMS

Pour développer un modèle hydrologique, l'utilisateur doit suivre les étapes suivantes :

- Démarrage d'un nouveau projet.
- Définition du modèle de bassin versant.
- Données de la ou des stations météorologiques.
- Définition du modèle de précipitation.
- Définition des paramètres de contrôle de la simulation.
- Création et exécution d'une simulation.
- Visualisation des résultats.[19]

III.2.4. Préparation des entrées du HEC-HMS

La modélisation de la réponse hydrologique d'un bassin versant soumis à un événement pluvieux à l'aide du logiciel HEC-HMS, est découpée en trois parties :

- la modélisation du bassin versant.
- la modélisation de la météorologiques.
- les spécifications de la simulation.

Le logiciel offre la possibilité d'utiliser diverses méthodes pour représenter à la fois le comportement du bassin versant et les précipitations. La partie relative aux spécifications permet de définir les paramètres propres à chaque simulation, notamment la date de début et de fin ainsi que le pas de temps de la simulation.[19]

III.3.Caractéristiques hydrologiques du sous bassin

Une fois les données pluies-débits introduites dans notre logiciel, il est indispensable de choisir quelques paramètres importants avant de pouvoir lancer la simulation ; Ces paramètres sont les suivants :

III.3.1. Curve number

Le curve number dépend du groupe hydrologique du sol, de l'occupation du sol, du traitement, des conditions hydrologiques et des conditions d'humidité initiales. La plage autorisée du CN va de 30 à 100. Le curve number est souvent utilisé dans le calcul de la quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol et celle qui ruisselle en surface.[22]

Dans notre étude sur les bassins versants, les numéros de courbe (Curve Number - CN) ont été déterminés pour chaque bassin à l'aide du logiciel ArcGIS. Ces valeurs ont été extraites et interprétées sous forme de tableaux détaillés, en s'appuyant sur une base de données géospatiale issue d'images satellites. Chaque bassin est composé de plusieurs zones, chacune caractérisée par un CN spécifique en fonction de l'occupation du sol et du type de sol. Afin de représenter de manière synthétique le comportement hydrologique de chaque bassin, nous avons calculé un CN moyen pondéré. Cette méthode permet d'attribuer à chaque bassin une valeur représentative unique, facilitant ainsi l'analyse comparative et les simulations hydrologiques.

III.3.2 Lag time

En hydrologie est défini comme l'intervalle de temps entre le pic de précipitation effective et le pic de débit observé à l'exutoire d'un bassin versant. Autrement dit, c'est le

délai nécessaire pour que l'eau tombée sur le bassin atteigne son débit maximum à la station de mesure.

Donnée par l'équation suivante :

$$\text{Lag} = 0.6 \times T_c \quad (\text{III.2})$$

T_c = le temps de concentration[h]. [22]

III.3.3. Le temps de concentration T_c

Le temps nécessaire pour que l'eau s'écoule du point le plus éloigné du bassin jusqu'à l'exutoire, ainsi que le temps qui passe entre la fin des pluies excédentaires et l'atteinte du point de décroissance sur la courbe de l'hydrogramme unitaire. Il est exprimé par la relation suivante :

$$T_c = \frac{\text{Lag}}{0,6} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Lag} = \frac{l^{0,8} (s+1)^{0,7}}{1900 Y^{0,5}} \quad (\text{III.4})$$

$$T_c = \frac{l^{0,8} (s+1)^{0,7}}{1400 Y^{0,5}} \quad (\text{III.5})$$

T_c : temps de concentration[h]

Lag : temps de décalage (lag time) [h]

l : longueur hydraulique du bassin en pieds[m]

Y : pente moyenne.

s : rétention potentielle maximale en pouces .[22]

- **Calcul de curve number**

Les données présentées dans ce tableau ont été extraites à partir d'ArcGIS. Afin de déterminer le Curve Number (CN) moyen de bassin versant.

$$CN_{\text{moy}} = \frac{\sum(CN_i \cdot S_i)}{\sum S_i} \quad (\text{III.6})$$

CN_{moy} : valeur moyenne pondérée du Curve Number (CN).

CN_i : valeur du CN pour l'occupation du sol i .

S_i : superficie correspondante à cette occupation [hectares ou km^2].

$\sum S_i$: superficie totale du bassin [hectares ou Km^2].[22]

Tableau III. 1: Curve Number de bassin versant Azazga

Zone	Curve number (CN)	Superficie (S)	CN _i *S _i
1	85	787	66895
2	86	4427	380722
3	87	1697	147639
4	88	4740	417120
5	89	122	10858
6	90	320	28800
7	91	325	29575
8	93	5	465
9	95	101	9595
10	97	8	776
11	98	10	980
12	85	10	850
Σ		12552	1094275
CN moyen	87,18		

Tableau III. 2: Curve Number de bassin versant Hamiz

Zone	Curve number (CN)	Superficie (S)	CN _i *S _i
1	85	94	7990
2	86	1355	116530
3	87	1085	94395
4	88	628	55264
5	89	10	890
6	90	16	1440
7	91	80	7280
Σ		3268	283789
CN moyen	86,84		

Tableau III. 3: Curve Number de bassin versant Oued Zeboudj

Zone	Curve number (CN)	Superficie (S)	CN _i *S _i
1	85	24	2040
2	86	1122	96492
3	87	1389	120843
4	88	3784	332992
5	89	11	979
6	90	1558	140220
7	91	97	8827
8	95	32	3040
9	97	24	2328
10	98	5	490
Σ		8046	708251
CN moyen	88,03		

- Calcul de lag time

Tableau III. 4: lag time de bassin versant Azazga

Subbassin	CN	l(km)	Y	s	l(m)	Tc (h)	Lag(h)	lag (min)
Subbassin 1	87.18	4,94	0,43	1,47	4938,02	2,28	1,37	82,11
Subbassin 10	87.18	9,48	0,41	1,47	9482,10	3,91	2,35	140,91
Subbassin 11	87.18	10,67	0,32	1,47	10669,13	4,84	2,91	174,37
Subbassin 12	87.18	17,19	0,41	1,47	17191,10	6,30	3,78	226,89
Subbassin 13	87.18	8,27	0,11	1,47	8267,10	6,68	4,01	240,51
Subbassin 14	87.18	7,02	0,15	1,47	7022,38	5,04	3,02	181,26
Subbassin 15	87.18	6,37	0,28	1,47	6368,53	3,45	2,07	124,27
Subbassin 16	87.18	14,46	0,18	1,47	14457,21	8,22	4,93	295,99
Subbassin 17	87.18	9,30	0,16	1,47	9303,19	6,21	3,72	223,40
Subbassin 18	87.18	12,27	0,30	1,47	12271,88	5,67	3,40	204,25
Subbassin 19	87.18	7,65	0,26	1,47	7654,38	4,12	2,47	148,32
Subbassin 2	87.18	16,12	0,21	1,47	16119,39	8,32	4,99	299,36
Subbassin 3	87.18	7,80	0,34	1,47	7803,78	3,68	2,21	132,59
Subbassin 4	87.18	8,91	0,39	1,47	8910,71	3,83	2,30	137,99
Subbassin 5	87.18	10,61	0,17	1,47	10607,34	6,60	3,96	237,53
Subbassin 6	87.18	8,24	0,24	1,47	8241,91	4,59	2,75	165,08

Subbasin 7	87.18	8,30	0,18	1,47	8298,20	5,25	3,15	188,86
Subbasin 8	87.18	10,33	0,19	1,47	10331,00	6,11	3,67	219,99
Subbasin 9	87.18	16,27	0,23	1,47	16274,29	8,14	4,88	293,06

Tableau III. 5: lag time de bassin versant Hamiz

Subbasin	CN	l(km)	y	s	l(m)	T _c (h)	lag(h)	lag (min)
Subbasin 8	86,84	5,11	0,36	1,52	5110,33	2,58	1,55	92,78
Subbasin 7	86,84	8,76	0,36	1,52	8761,47	3,99	2,39	143,48
Subbasin 6	86,84	6,21	0,28	1,52	6214,06	3,40	2,04	122,54
Subbasin 5	86,84	7,03	0,39	1,52	7029,33	3,22	1,93	115,99
Subbasin 4	86,84	4,49	0,34	1,52	4485,03	2,39	1,44	86,11
Subbasin 3	86,84	6,03	0,29	1,52	6027,6	3,27	1,96	117,79
Subbasin 2	86,84	7,89	0,29	1,52	7887,7	4,10	2,46	147,73
Subbasin 1	86,84	6,58	0,25	1,52	6578,01	3,79	2,27	136,33

Tableau III. 6: lag time de bassin versant Oued Zeboudj

subbasin	CN	l(Km)	y	s	l(m)	T _c	Lag(h)	lag (min)
Subbasin 21	88,03	5,82	0,43	1,36	5816,14	2,51	1,50	90,19
Subbasin 20	88,03	6,00	0,42	1,36	6004,90	2,59	1,55	93,19
Subbasin 19	88,03	7,67	0,39	1,36	7669,82	3,27	1,96	117,66
Subbasin 18	88,03	9,36	0,34	1,36	9363,20	4,14	2,48	148,98
Subbasin 17	88,03	8,47	0,22	1,36	8465,03	4,78	2,87	172,23
Subbasin 16	88,03	8,36	0,18	1,36	8362,24	5,15	3,09	185,45
Subbasin 15	88,03	5,99	0,17	1,36	5987,91	4,13	2,48	148,71
Subbasin 14	88,03	6,72	0,28	1,36	6718,27	3,51	2,10	126,23
Subbasin 13	88,03	7,15	0,19	1,36	7146,60	4,50	2,70	161,95
Subbasin 12	88,03	5,28	0,21	1,36	5282,84	3,29	1,98	118,61
Subbasin 11	88,03	6,52	0,16	1,36	6524,76	4,56	2,73	164,08
Subbasin 10	88,03	6,55	0,14	1,36	6553,62	4,79	2,87	172,28
Subbasin 9	88,03	7,83	0,19	1,36	7829,93	4,73	2,84	170,22
Subbasin 8	88,03	6,87	0,20	1,36	6870,27	4,25	2,55	152,93
Subbasin 7	88,03	8,16	0,21	1,36	8163,20	4,75	2,85	171,09
Subbasin 6	88,03	7,66	0,19	1,36	7664,29	4,67	2,80	168,26
Subbasin 5	88,03	9,71	0,18	1,36	9708,91	5,86	3,52	210,96
Subbasin 4	88,03	4,55	0,15	1,36	4548,92	3,46	2,08	124,52
Subbasin 3	88,03	8,78	0,18	1,36	8783,85	5,41	3,25	194,76
Subbasin 2	88,03	6,89	0,15	1,36	6888,86	4,82	2,89	173,47
Subbasin 1	88,03	8,29	0,22	1,36	8289,70	4,63	2,78	166,83

III.4. Avantages et forces de HEC-HMS

- HEC-HMS est un logiciel libre développé par l'US Army Corps of Engineers, ce qui le rend accessible à un large public, notamment les chercheurs, ingénieurs et étudiants.
- Il propose plusieurs méthodes pour représenter les processus hydrologiques (pertes, transformation pluie-débit, routage), ce qui permet de l'adapter à différents contextes hydrologiques et niveaux de données disponibles.
- HEC-HMS est utilisé dans des projets réels de gestion des crues, planification des bassins versants, et études d'impact des aménagements hydrauliques.
- Le logiciel propose plusieurs options de modélisation pour chaque processus. Par exemple, l'utilisateur peut choisir entre différentes méthodes d'infiltration ou de routage, ce qui permet d'adapter le modèle aux données disponibles et aux caractéristiques du bassin.[4]

III.5. Limites et inconvénients de HEC-HMS

- Tous les formalismes utilisent des valeurs constantes des paramètres c'est-à-dire qu'ils sont indépendants du temps.
- La représentation de la structure du bassin : représentée dans le HEC-HMS, par un arbre ramifié qui rend son assimilation difficile.
- Tous les modules ne sont pas accouplés, c'est-à-dire que chaque partie du modèle est calculée indépendamment de l'autre, mais l'erreur liée à ce problème est minimisée par l'utilisation de courts temps de calcul.[4]

Toutes ces limites de représentation sont gênantes, mais dans notre cas, leurs effets sont neutralisés, parce que notre bassin est très simplifié (un élément de « Subbasin », un élément « Reach » et un exutoire).

III.6. Conclusion

Le modèle HEC-HMS, par sa structure modulaire et ses multiples options de simulation hydrologique, s'impose comme un outil essentiel pour l'analyse du comportement d'un bassin versant face aux précipitations. Ce chapitre a permis de comprendre son fonctionnement général, ainsi que son application aux bassins versants étudiés.

Dans le chapitre suivant, le modèle HEC-HMS sera appliqué aux bassins versants étudiés afin de simuler le comportement hydrologique en réponse aux événements pluviométriques.

CHAPITRE IV
APPLICATION DU MODELE
HEC-HMS

IV.1. Introduction

Ce chapitre détaille l'application du modèle HEC-HMS pour la modélisation hydrologique des bassins d'Azazga, Hamiz et Oued Zeboudj. Il couvre toutes les étapes, depuis la préparation des données topographiques et la délimitation des sous-bassins, jusqu'à l'intégration des données pluviométriques et la sélection des méthodes de production et de transfert. Une part importante est consacrée à la calibration via des essais d'optimisation des paramètres hydrologiques et hydrauliques. L'objectif est de présenter de manière précise la construction et la configuration d'un modèle opérationnel pour chacun des bassins versants, afin d'obtenir des simulations fiables.

IV.2. Développement d'un projet HEC-HMS

Pour développer un modèle hydrologique, l'utilisateur doit suivre les étapes suivantes :

- Démarrage d'un nouveau projet.
- Définition du modèle de bassin versant.
- Données de la ou des stations météorologiques.
- Définition du modèle de précipitation.
- Définition des paramètres de contrôle de la simulation.
- Création et exécution d'une simulation.
- Visualisation des résultats. [19]

IV.3. l'interface du logiciel HEC-HMS

L'interface utilisateur comprend une barre de menu, une barre d'outils, ainsi que quatre volets principaux. En partant du coin supérieur gauche de la Figure (IV.1) et en suivant le sens antihoraire, ces volets sont nommés : explorateur de bassin versant, éditeur de composants, journal des messages et bureau. Un simple double-clic sur le programme permet d'ouvrir cette fenêtre.

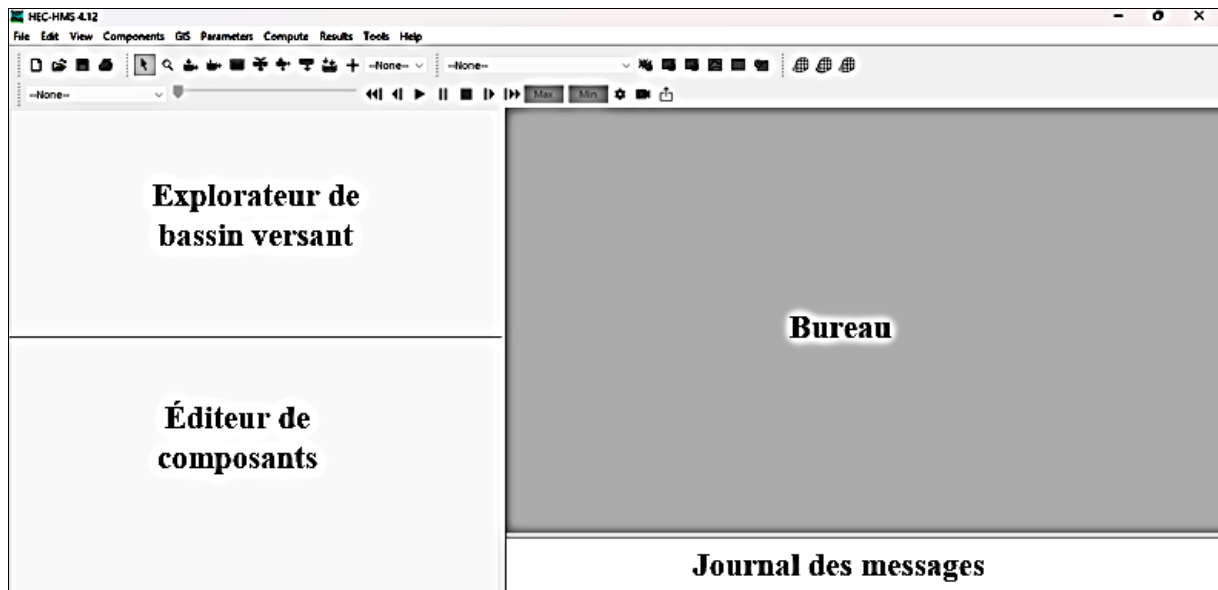


Figure IV. 1 : Interface de logiciel HEC-HMS

IV.4. Créer un nouveau modèle HEC-HMS

Pour créer un nouveau projet, il suffit de cliquer sur Fichier (file) → Nouveau (New) dans la barre de menu. Une boîte de dialogue apparaît, dans laquelle on attribue un nom au nouveau projet (figure IV.2). Il convient également d'indiquer l'emplacement du dossier de travail, de sélectionner le système d'unités souhaité, puis de cliquer sur le bouton Créer (Create).

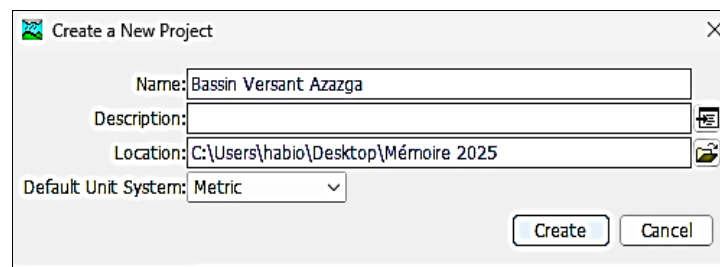


Figure IV. 1: Créer un model HEC-HMS.

IV.5. Les composants du modèle

IV.5.1. Création du modèle du bassin

Dans la barre des composants "Component", on sélectionne "Basin model managé"(Figure IV.3)

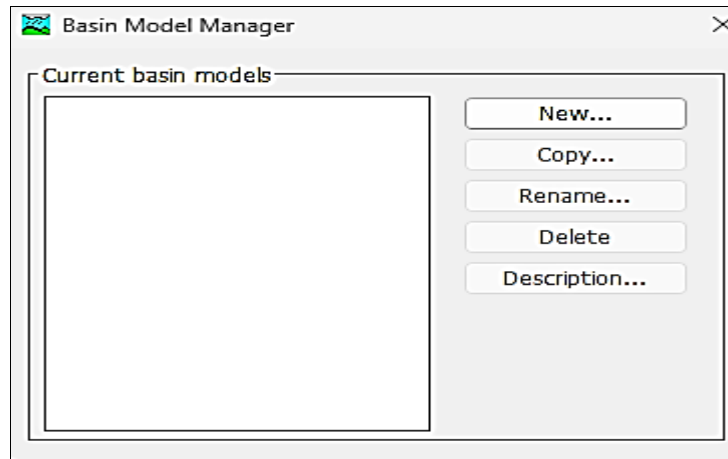


Figure IV. 2: Modèle du bassin.

Cliquez sur le bouton "New" → Nommez le bassin "Name" → donnez une description "Description" et appuyez sur "Create". (Figure IV.4).

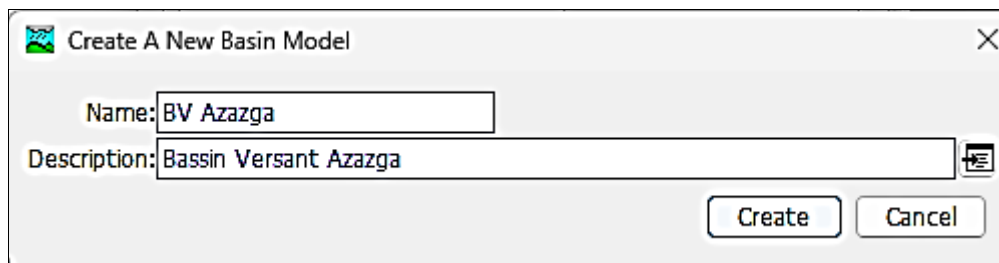


Figure IV. 3: Création du modèle du bassin.

IV.5.2. Gestionnaire de données de terrain

Le gestionnaire de données de terrain permet de manipuler les données de terrain, notamment le modèle numérique d'élévation (MNT) d'une zone d'étude.

Dans l'onglet composantes (Components) permet d'importer le MNT, en suivant le chemin suivant : Components → terrain data manager. (Figure IV.5)

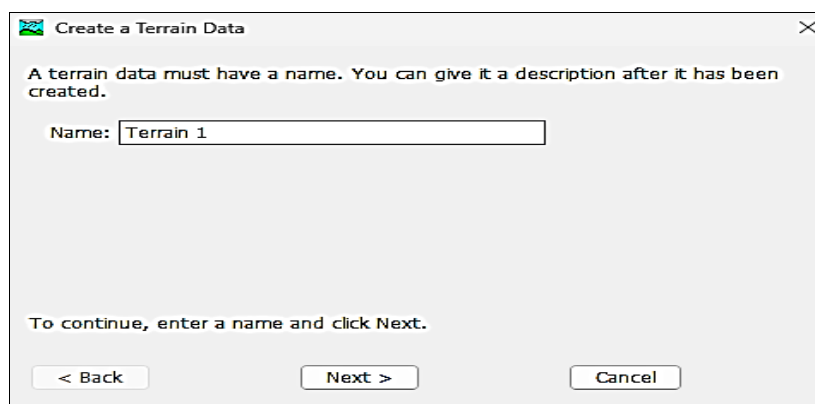


Figure IV. 4: création du terrain Data.

Accédez à azzazga1.tif, choisissez les unités verticales appropriées pour l'élévation (mètres en ce cas), et cliquez sur Terminer "finish". (Figure IV.6)

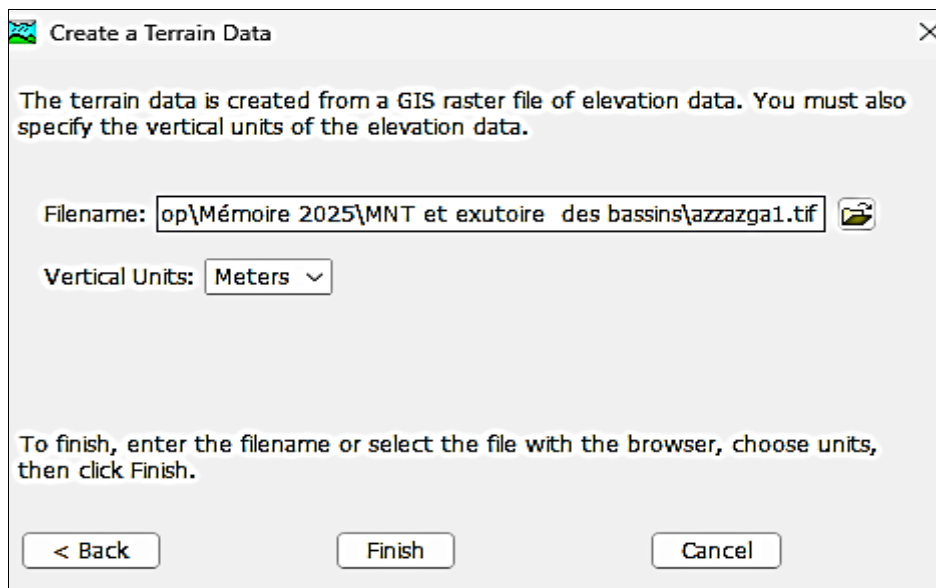


Figure IV. 5: Insertion des données de terrain.

La dernière étape est de connecter le modèle du bassin au MNT. Il est alors nécessaire d'associer les données de terrain au modèle de bassin :

Dans les propriétés du modèle BV Azazga, on modifie le champ Terrain Data, en remplaçant la valeur None par Terrain1.

IV.5.3. La définition d'un système de coordonnées

Actuellement, nous disposons d'un modèle de bassin vide, que nous compléterons en traitant le terrain 1. Pour cela, il est nécessaire de géo-référencer le modèle de bassin à partir des données de notre terrain.

Dans l'onglet "GIS" du menu principal permet grâce à la commande Système de coordonnées "Coordinate system" de définir le système de coordonnées du bassin. Il y a deux options : Prédéfini "Predefined" et parcourir "Browse".

Le "predefined", permet de définir un système de coordonnées connue. L'option "Browse" permet de définir le système de coordonnées à partir d'une autre couche (raster ou vectorielle du bassin). Pour notre cas, nous utilisons l'option "predefined", le système de coordonnées sera celui du MNT : WGS 84 UTM Zone 31 Northern (Figure IV.7).

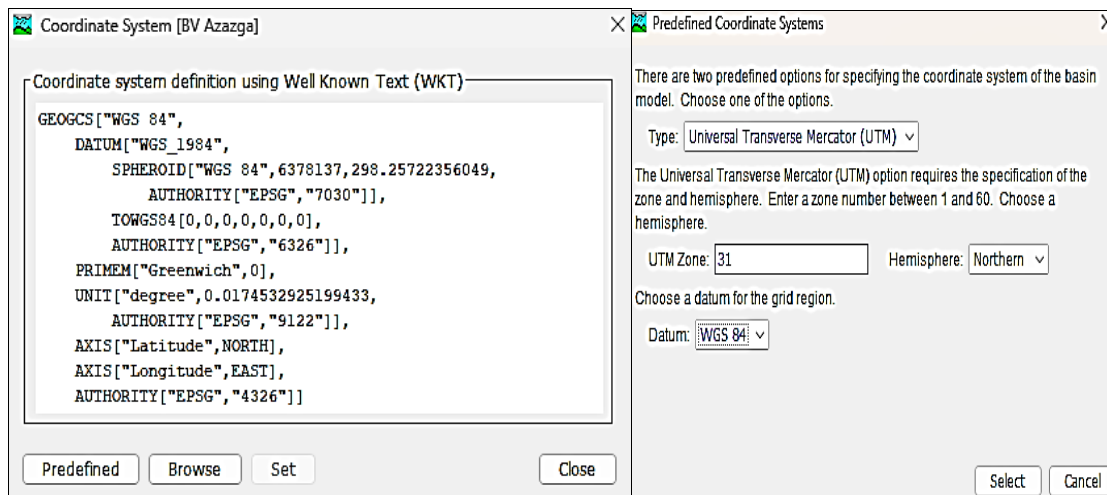


Figure IV. 6: Affectation d'un système de coordonnées.

Une fois cette configuration achevée, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) apparaît automatiquement dans l'interface graphique du logiciel.

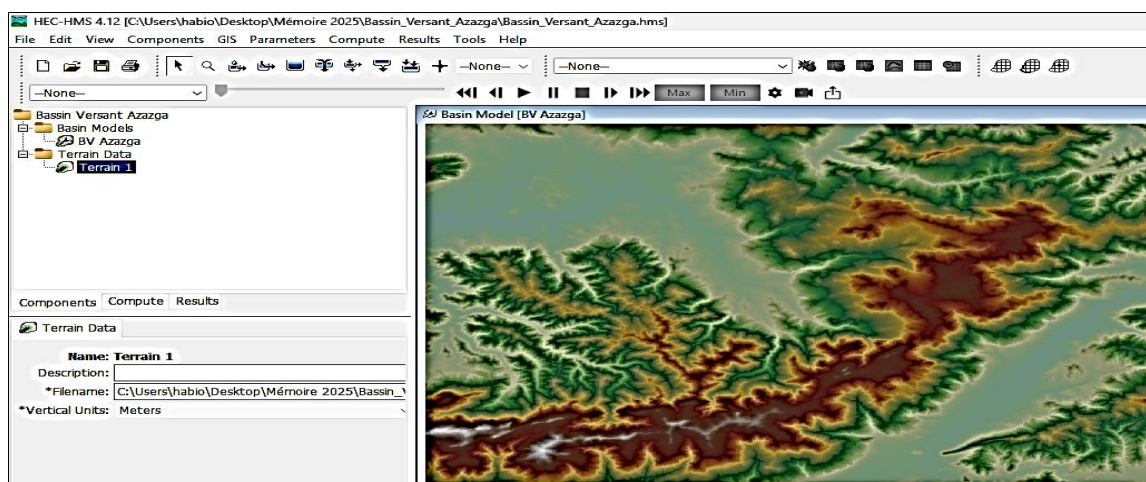


Figure IV. 7: modèle numérique du terrain.

IV.6. Modélisation du Bassin versant

IV.6.1. Traitement de MNT

Le logiciel HEC-HMS traite les données topographiques sous forme de pixels, ce qui peut entraîner des erreurs dans la représentation du drainage. Il est donc essentiel de corriger ces anomalies avant de procéder à la délimitation du bassin versant. Pour cela, il faut accéder à :

L'onglet GIS et cliquer sur Process Sink, Cette action fait apparaître sur la carte des points signalant les discontinuités du drainage.

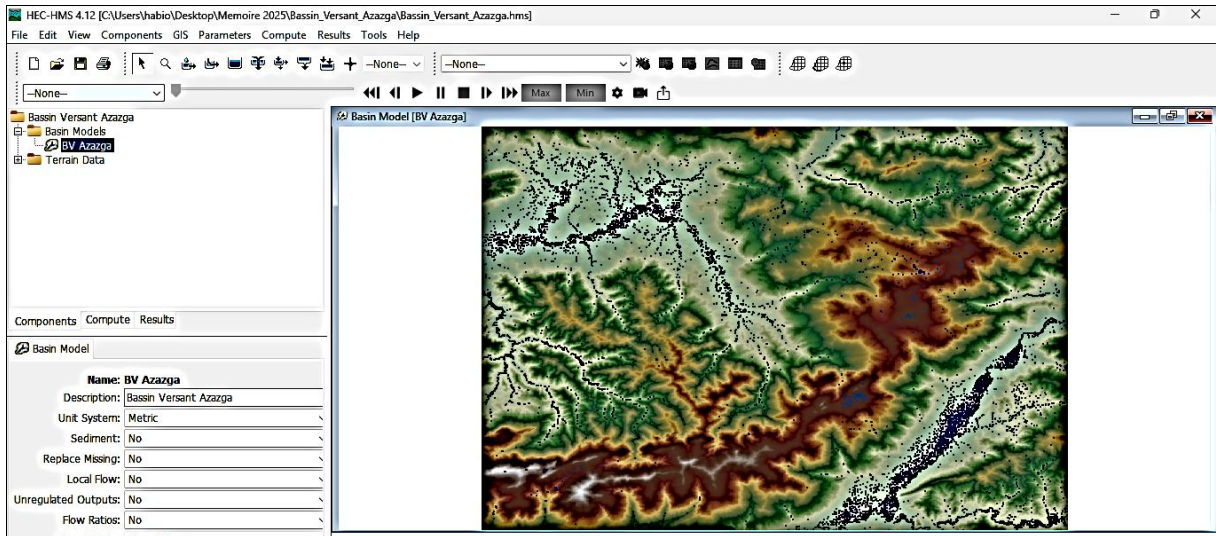


Figure IV. 8: discontinuités du drainage.

Ensuite clique sur Process Drainage pour éliminer ces erreurs.

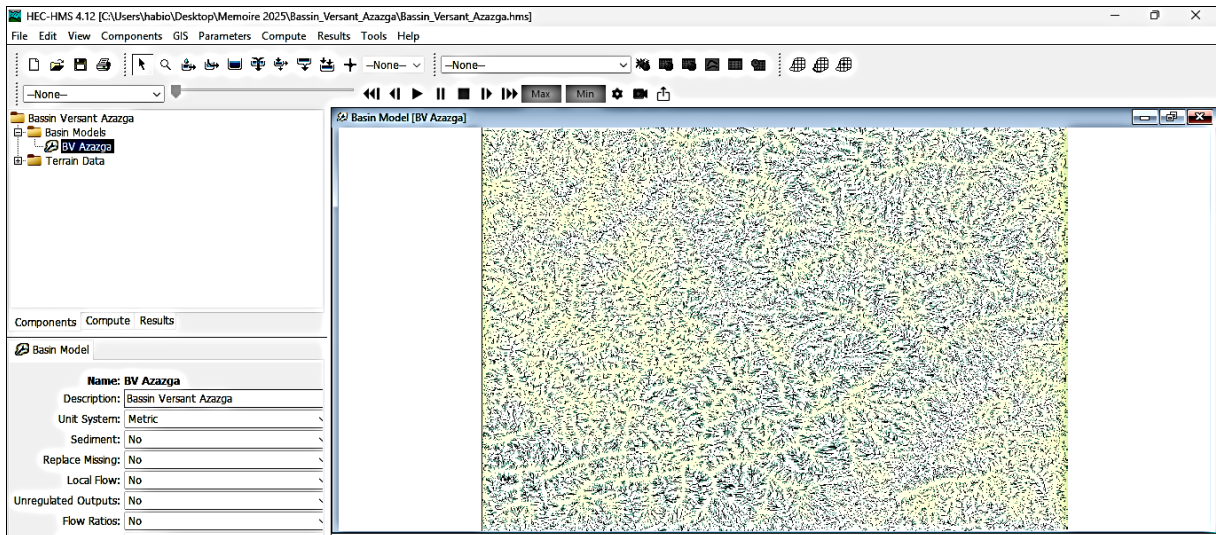


Figure IV. 9: élimination des erreurs.

IV.6.2. La délimitation du réseau fluvial

Accédez à "GIS" → Identifier les flux "identify streams". Précisez le seuil de superficie des cours d'eau (6Km^2 dans notre cas) pour délimiter les cours d'eau. Le logiciel génère alors le cours d'eau principal correspondant à cette surface.

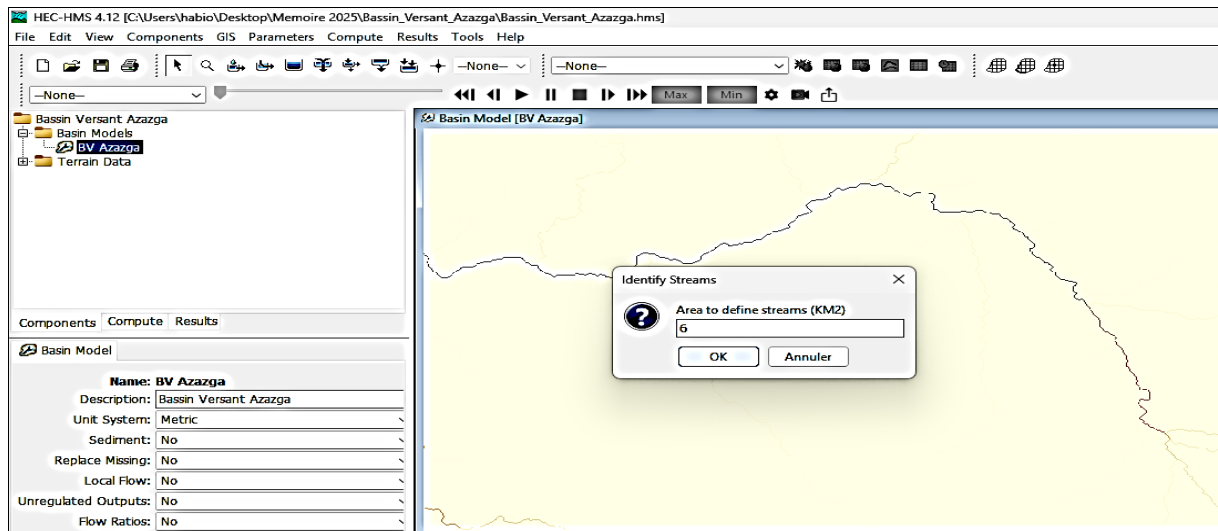


Figure IV. 10: Flux identifiés.

IV.6.3. Spécifiez la sortie

Pour spécifier la sortie, on va dans GIS puis Cliquer sur Break Point pour placer l'exutoire à l'extrémité aval du cours d'eau.

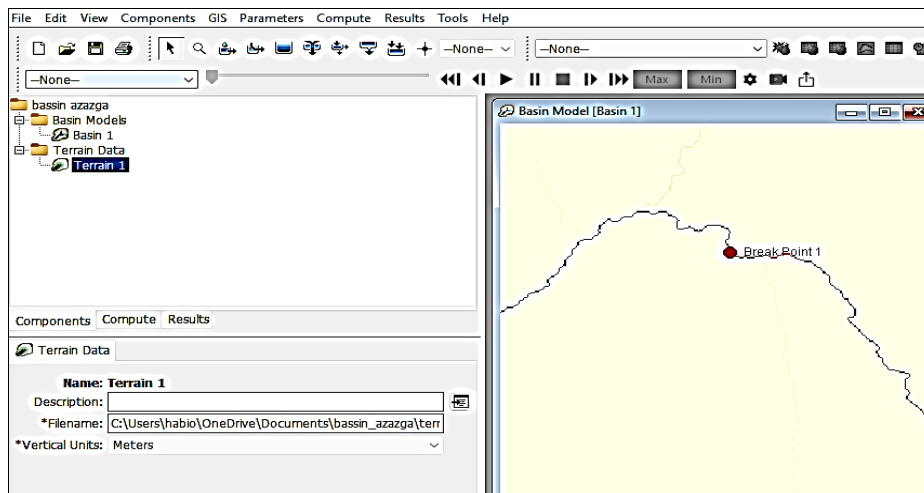


Figure IV. 11: définition de l'exutoire.

IV.6.4. Délimitation du bassin versant

En ayant dans "Delineate Elements" dans "GIS". Cela générera des sous-bassins. Le modèle de bassin comporte principalement deux types d'éléments : le sous-bassin et le tronçon (Reach).

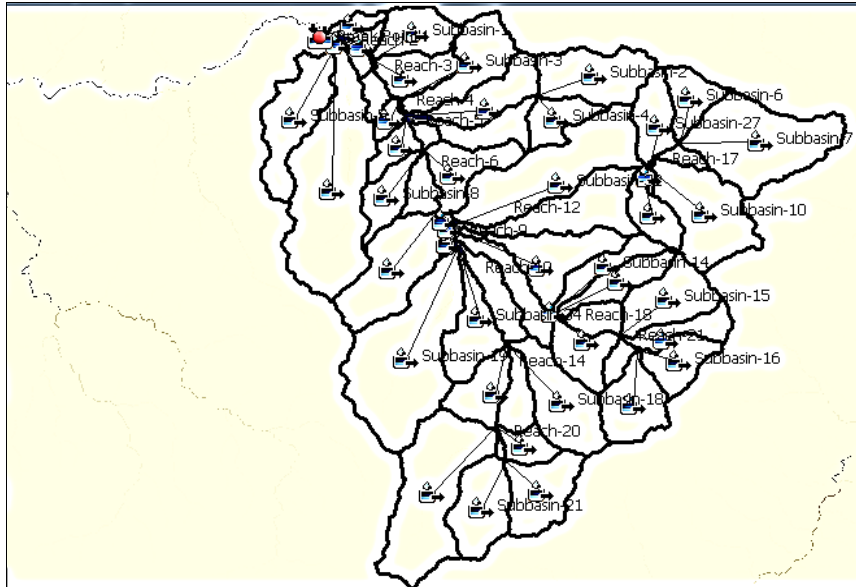


Figure IV. 12: Délimitation des limites et des sous-bassins du bassin versant Azazga.

Le logiciel permet également de modifier la structure du bassin selon les besoins pour jumeler deux sous-bassins en allant dans "GIS" puis "Merge Elements". Pour effectuer cette opération entre deux bassins, il faut qu'au minimum un bassin soit traversé par le fleuve "Stream" principale.

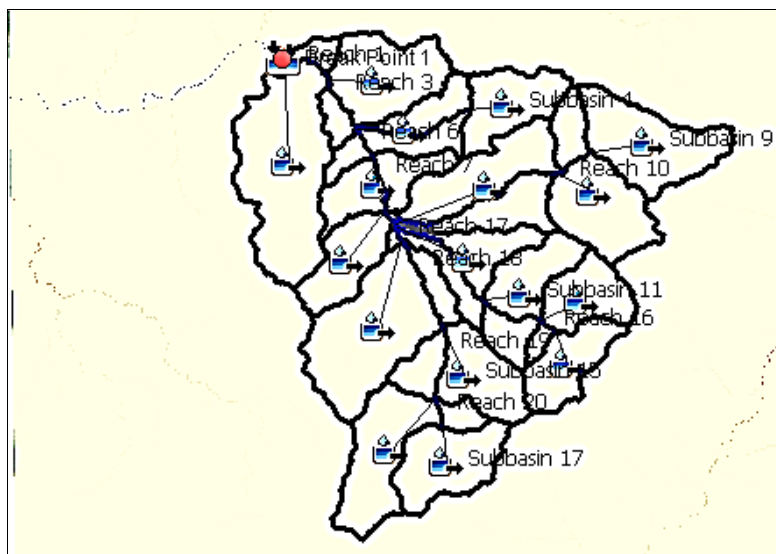


Figure IV. 13: Le bassin versant d'Aziza modélisé dans HEC-HMS après la fusion des sous-bassins.

On peut aussi diviser un Sous-Bassin ; pour cela il suffit de sélectionner le sous bassin concerné par la division, puis d'aller dans "GIS" et appuyer sur "Split Elements".

IV.7. Préparation des entrées du modèle HEC-HMS

La modélisation de la réponse hydrologique d'un bassin versant sous le logiciel HEC-

HMS se compose de trois parties principales, chaque partie offre la possibilité de choix entre plusieurs méthodes de calcul. Les trois parties nécessaires sont les suivantes :

- ✓ Modélisation du bassin versant.
- ✓ Modélisation de la météorologie.
- ✓ Spécifications de contrôle.

IV.7.1. Modélisation du bassin versant

IV.7.1.1. Modélisation d'un sous bassin

La modélisation d'un bassin versant est une étape essentielle dans l'analyse hydrologique, car elle permet de simuler les processus de transformation de la pluie en ruissellement. Cette modélisation commence par le découpage du bassin versant en sous-bassins élémentaires, afin de mieux représenter la variabilité spatiale des caractéristiques physiques (pente, occupation du sol, type de sol, etc.) Une fois le bassin divisé, il convient de spécifier les méthodes de calcul utilisées pour modéliser les différents phénomènes hydrologiques, tels que les pertes par infiltration, le ruissellement de surface. Dans le modèle HEC-HMS processus sont représentés à travers un réseau d'éléments interconnectés (sous-bassins, jonctions, réservoirs, canaux, etc.), configurés pour reproduire la dynamique de l'écoulement dans le système.[19]

Le Tableau (IV.1) résume les méthodes appliquées aux sous-bassins et aux tronçons (Reach).

Tableau IV. 1: méthodes appliquées aux sous-bassins et aux tronçons.

L'élément hydrologique	Type de calcul	Méthode
Sous bassin	Perte (Loss)	SCS curve number
	Ruissellement direct (Transform)	SCS unit hydrograph
Reach	Routing	Muskingum

Les différentes modélisations sont présentées dans les figures suivantes :

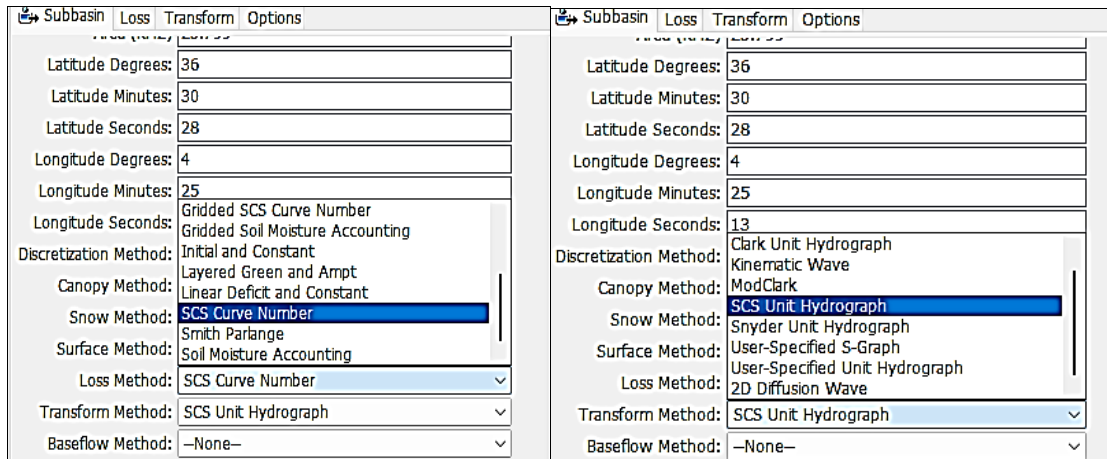


Figure IV. 14: Différentes méthodes de production et de transfert.

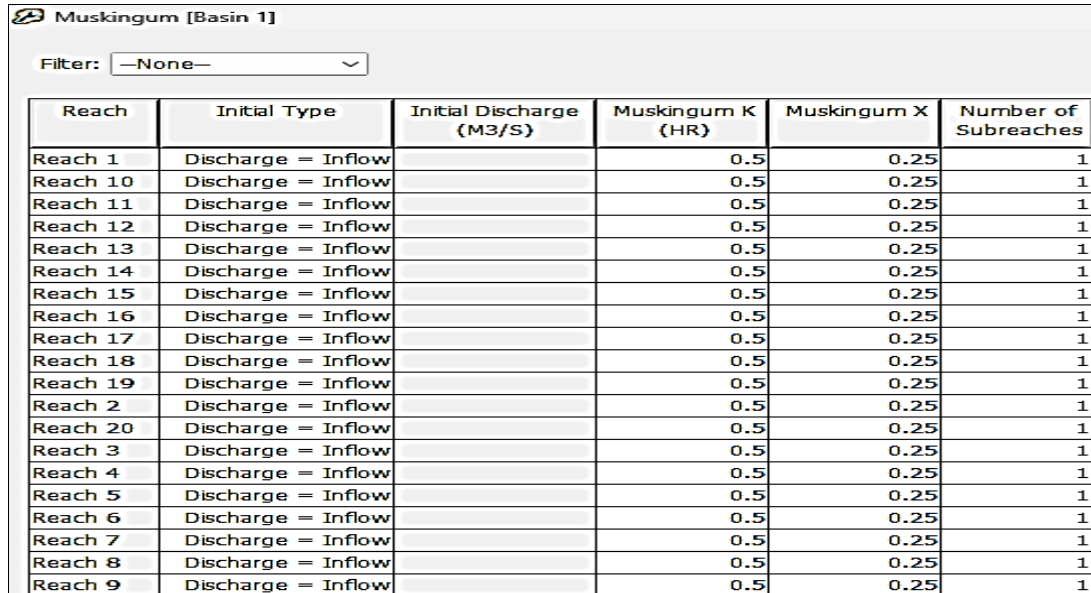
Après avoir choisi les deux méthodes de production et de transfert voici les fenêtres où on introduit les données.

SCS Curve Number [Basin 1]				SCS Unit Hydrograph [Basin 1]		
Filter: <input type="text" value="-None-"/>				Filter: <input type="text" value="-None-"/>		
Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)	Subbasin	Graph Type	Lag Time (MIN)
Subbasin 1	0	87.18	0.0	Subbasin 1	Standard (PRF 484)	290.47
Subbasin 10	0	87.18	0.0	Subbasin 10	Standard (PRF 484)	250.45
Subbasin 11	0	87.18	0.0	Subbasin 11	Standard (PRF 484)	161.25
Subbasin 12	0	87.18	0.0	Subbasin 12	Standard (PRF 484)	138.44
Subbasin 13	0	87.18	0.0	Subbasin 13	Standard (PRF 484)	105.47
Subbasin 14	0	87.18	0.0	Subbasin 14	Standard (PRF 484)	217.14
Subbasin 15	0	87.18	0.0	Subbasin 15	Standard (PRF 484)	138.78
Subbasin 16	0	87.18	0.0	Subbasin 16	Standard (PRF 484)	170.08
Subbasin 17	0	87.18	0.0	Subbasin 17	Standard (PRF 484)	118.77
Subbasin 2	0	87.18	0.0	Subbasin 2	Standard (PRF 484)	269.95
Subbasin 3	0	87.18	0.0	Subbasin 3	Standard (PRF 484)	231.04
Subbasin 4	0	87.18	0.0	Subbasin 4	Standard (PRF 484)	183.62
Subbasin 5	0	87.18	0.0	Subbasin 5	Standard (PRF 484)	207.16
Subbasin 6	0	87.18	0.0	Subbasin 6	Standard (PRF 484)	169.94
Subbasin 7	0	87.18	0.0	Subbasin 7	Standard (PRF 484)	293.06
Subbasin 8	0	87.18	0.0	Subbasin 8	Standard (PRF 484)	184.67
Subbasin 9	0	87.18	0.0	Subbasin 9	Standard (PRF 484)	215.19

Figure IV. 15: Inclure les données dans les éditeurs des bassins versants.

IV.7.1.2. Élément Reach

Après avoir sélectionné la méthode de Muskingum, la fenêtre suivante permet de saisir les données correspondantes.



Reach	Initial Type	Initial Discharge (M3/S)	Muskingum K (HR)	Muskingum X	Number of Subreaches
Reach 1	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 10	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 11	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 12	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 13	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 14	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 15	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 16	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 17	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 18	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 19	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 2	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 20	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 3	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 4	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 5	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 6	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 7	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 8	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1
Reach 9	Discharge = Inflow		0.5	0.25	1

Figure IV. 16: Les données Muskingum.

IV.7.2. Composant de modèle météorologique

L'élément météorologique est la première composante de calcul qui permet de répartir les précipitations dans l'espace et le temps au sein du bassin versant. Il évalue la quantité de précipitations nécessaire pour un composant du sous-bassin à une pluie donnée. Diverses méthodes sont proposées pour modéliser un événement pluvieux. Les données météorologiques sont données par les services de la météorologie dans des fichiers à format libre ou dans des tableaux.[19]

IV.7.2.1. Créer un modèle météorologique

L'ajout d'un modèle météorologique à un projet s'effectue de la même manière que pour le modèle de bassin. Il faut accéder au menu "Composants" → "Meteorology Model Manager". Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquez sur le bouton "New", puis renseignez un nom "Name" et une description "Description" dans la boîte de dialogue.

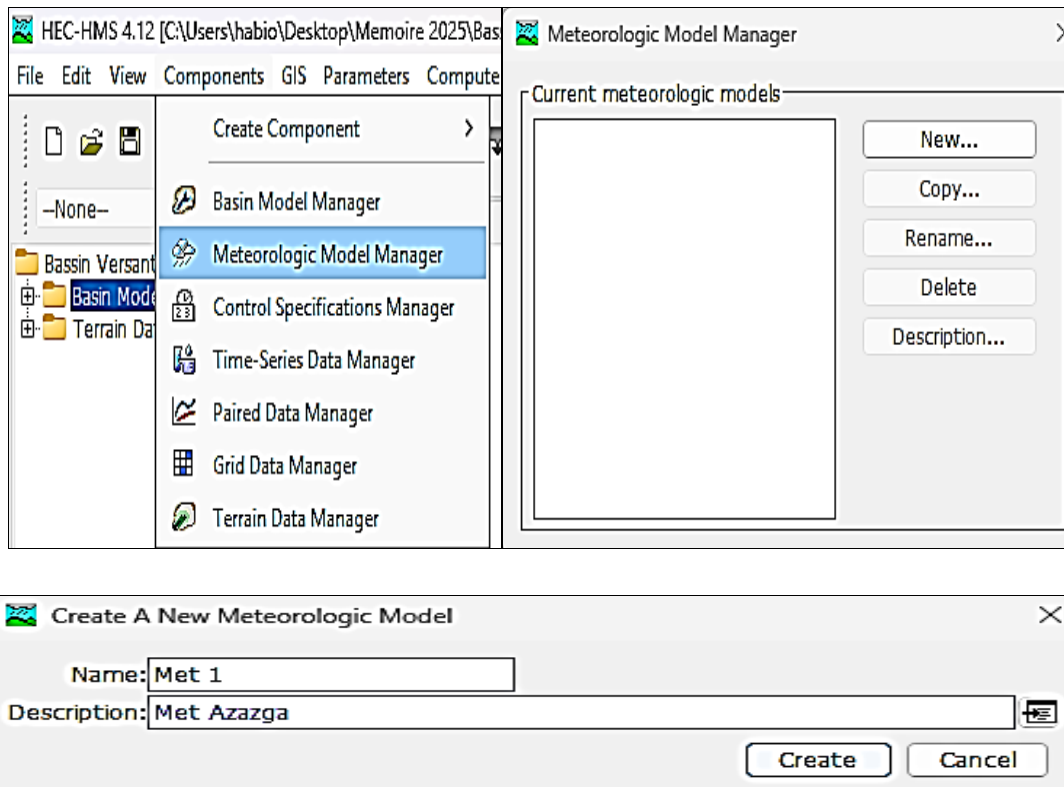


Figure IV. 17: Création du modèle météorologique.

Après avoir créé un nouveau modèle météorologique (Météorologic Models), l'écran modèle météorologique apparaît, dans notre cas on choisit frequency strom puis on incéré les données pluviométrique.

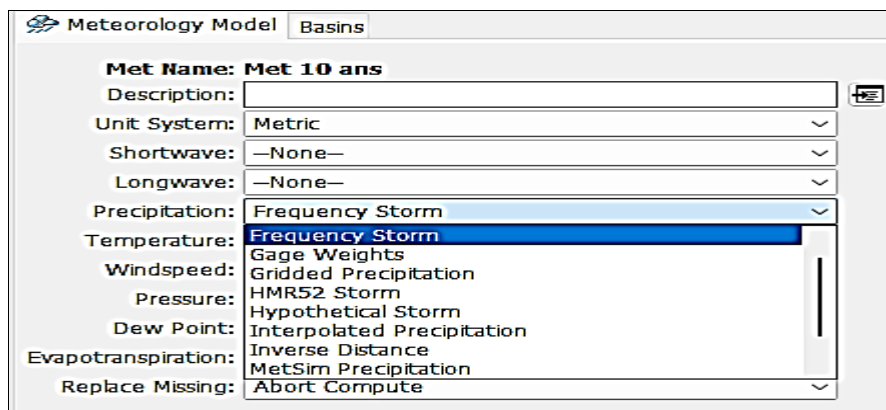


Figure IV. 18: Modèles météorologiques (Précipitation).

Tableau IV. 2: les données pluviométriques des bassins versants.

BV Azazga	Temps (heures)							
Période de retour (ans)	0.25	0.5	1	2	3	6	12	24
2	6,33	10,52	15,60	22,00	26,68	37,83	54,36	68,22
5	8,96	14,21	20,52	28,48	34,16	47,82	72,54	95,80
10	10,74	16,64	23,69	32,60	38,88	54,05	84,36	114,42
20	12,48	18,95	26,67	36,44	43,27	59,81	95,55	132,49
50	14,77	21,94	30,48	41,31	48,79	67,02	109,94	156,25
100	16,52	24,19	33,31	44,91	52,86	72,30	120,71	174,41
BV Hamiz	Temps (heures)							
Période de retour (ans)	0.25	0.5	1	2	3	6	12	24
2	9,64	13,10	19,33	24,66	28,64	32,89	43,68	51,47
5	12,79	16,58	24,46	30,09	35,50	43,10	62,62	82,00
10	14,83	18,76	27,66	33,40	39,72	49,66	75,62	104,62
20	16,76	20,76	30,62	36,40	43,58	55,81	88,36	127,93
50	19,23	23,28	34,33	40,09	48,38	63,65	105,27	160,42
100	21,07	25,13	37,05	42,77	51,86	69,48	118,31	186,54
BV Oued Zeboudj	Temps (heures)							
Période de retour (ans)	0.25	0.5	1	2	3	6	12	24
2	8,67	11,69	15,59	20,61	23,98	31,97	41,40	49,51
5	15,73	19,59	24,26	29,91	33,41	43,43	58,39	81,33
10	21,47	25,65	30,58	36,35	39,74	50,98	69,89	105,44

20	27,77	32,06	37,02	42,70	45,86	58,20	81,08	130,65
50	37,09	41,19	45,90	51,17	53,87	67,54	95,82	166,30
100	44,98	48,68	52,97	57,74	59,98	74,59	107,11	195,30

Les données de ces tableaux sont Transmises par DAMELASH Wondimagegnehu, Professeur à l’Arba Minch University Water Technology Institute (AWTI), Éthiopie, et par ABSI Rafik, Professeur et Directeur de la Recherche à ECAM-EPMI, CY Cergy Paris Université.

Une fois la méthode Frequency Storm sélectionnée pour la précipitation, il faut entrer les hauteurs de pluie correspondant aux différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans).

Duration	Depth (MM)
5 Minutes	
10 Minutes	
15 Minutes	10.74
30 Minutes	16.64
1 Hour	23.69
2 Hours	32.6
3 Hours	38.88
6 Hours	54.05
12 Hours	84.36
1 Day	114.42
2 Days	
3 Days	
4 Days	
7 Days	

Figure IV. 19: exemple de hauteurs de pluies (10 ans).

IV.7.3. Spécification de contrôle (control specifications)

Une spécification de contrôle peut être ajoutée à un projet en accédant au menu "Component" → "control specifications Manager ". Dans la fenêtre qui s’ouvre, cliquez sur le bouton "New", puis saisissez un nom "Name" et une description "Description" dans la boîte de dialogue. Créer une nouvelle spécification de contrôle.

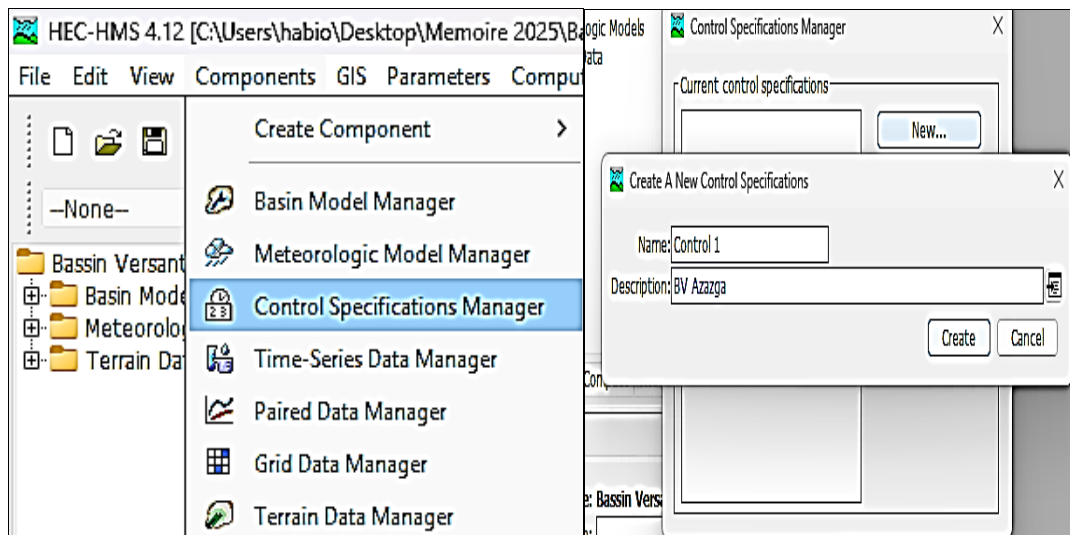


Figure IV. 20: Créer un spécifique de contrôle.

Les spécifications de contrôle sont la dernière composante indispensable pour effectuer une simulation. C'est à cette étape que l'on définit les instants de départ et de fin de la simulation ainsi que le pas de temps de calcul.

L'éditeur de composants pour une spécification de contrôle requiert la saisie d'une date et d'une heure de début, d'une date et d'une heure de fin, ainsi que d'un pas de temps. Les dates doivent être saisies au format "dd/MMM/YYYY", où "d" représente le jour, "M" représente le mois et "Y" représente l'année. L'heure, doit être saisie au format 24 heures, sous la forme "HH : MM", où *HH* représente l'heure et *MM* les minutes. Le pas de temps est sélectionné à partir d'une liste déroulante proposant des intervalles allant de 1 minute à 24 heures.[19].

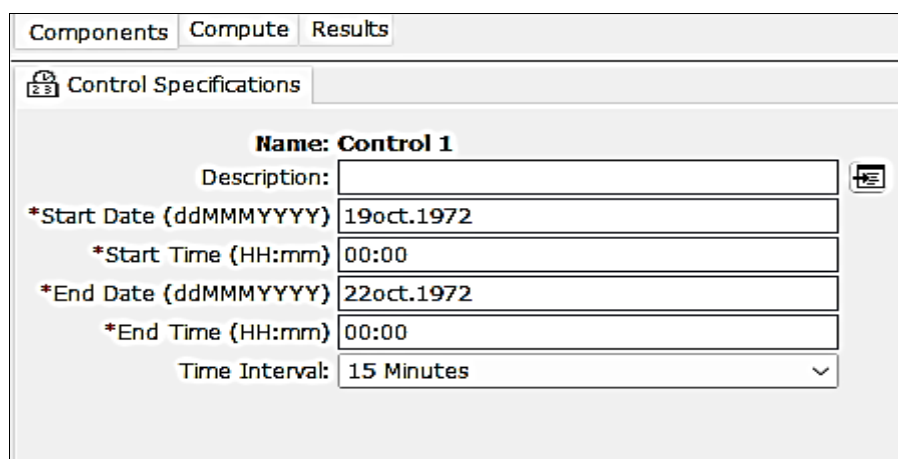


Figure IV. 21 : Fenêtre de spécifications de contrôle.

IV.7.4. Exécutions de simulation

Les simulations constituent le principal moyen de calcul des résultats dans HEC-HMS. Chaque simulation repose sur la combinaison d'un modèle météorologique, d'un

modèle de bassin versant et d'une spécification de contrôle. Les résultats peuvent être consultés sous forme de graphiques, de tableaux récapitulatifs ou de tableaux chronologiques, accessibles soit depuis la carte du bassin, soit via l'explorateur de bassins versants. En plus de la sélection des composants météorologiques, hydrologiques et de contrôle, des fonctionnalités avancées sont disponibles pour affiner les paramètres d'exécution de la simulation.[19]

IV.7.4.1. Créer et calculer une simulation

Toutes les données nécessaires à la création du modèle (Azazga, Hamiz et Oued Zeboudj) dans HEC-HMS ont désormais été saisies. La dernière étape consiste à lancer l'exécution du modèle. Pour cela, accédez à "Compute" → "Simulation Run Manager". Acceptez le nom par défaut de la simulation (Run1), puis cliquez sur Suivant pour passer les différentes étapes, et enfin sur Terminer pour finaliser la configuration.

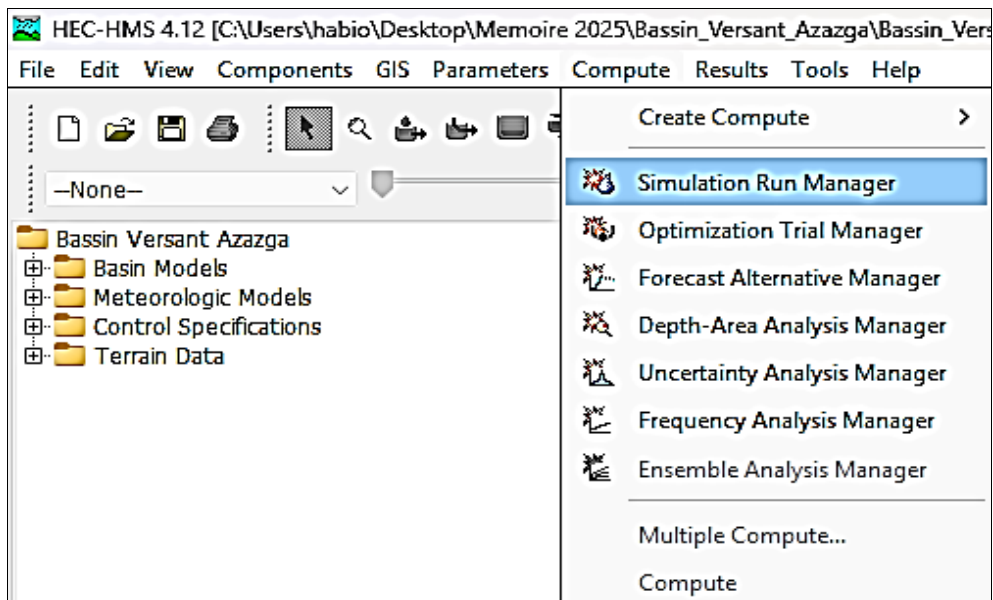


Figure IV. 22: Créer une simulation.

Ensuite, dans la barre de menu, sélectionnez Compute → Compute [Run 1], pour lancer l'exécution. Vous pouvez également cliquer directement sur l'icône d'exécution dans la barre d'outils. (Voir Figure IV.24)

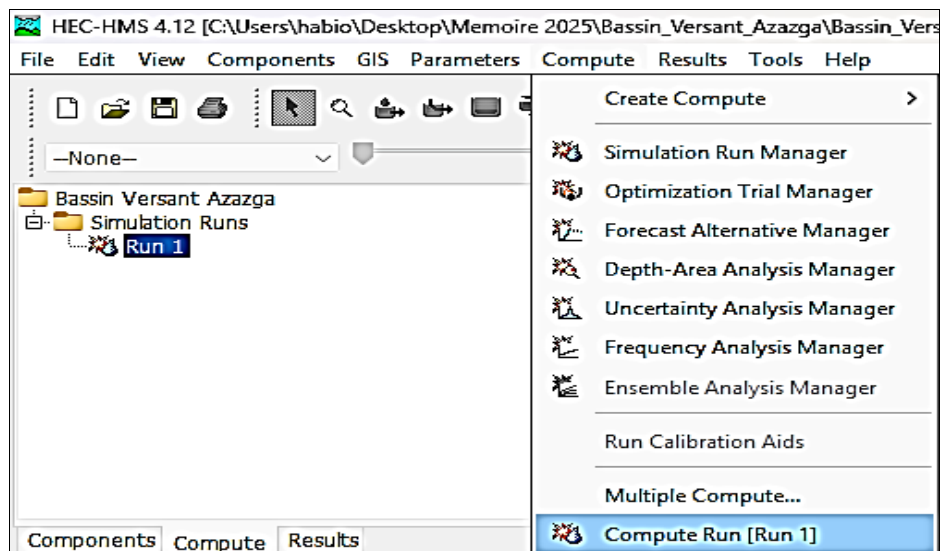


Figure IV. 23: Calculer une simulation.

IV.7.4.2. Visualisation des résultats

Les résultats de simulation peuvent être consultés sous forme de tableaux ou de graphiques depuis l'interface des modèles de bassin.

- ✓ Tableau global : Ce tableau présente les principales informations relatives au débit de pointe d'une simulation, notamment sa valeur, le volume écoulé, ainsi que le temps où il se produit.
- ✓ Résultats de la simulation : Ces résultats peuvent être affichés de trois manières :
 - Graphique (Graph) : Représentation des résultats pour chaque composant du bassin versant.
 - Tableau récapitulatif (Summary Table) : Donne un aperçu des débits de pointe et des volumes écoulés pour chaque élément du modèle
 - Tableau chronologique (Time Series Table) : Affiche les valeurs calculées à chaque pas de temps tout au long de la simulation.[19]

IV.7.5. Essais d'optimisation

L'estimation des paramètres consiste à adapter un modèle hydrologique à un bassin versant spécifique. Certains paramètres peuvent être mesurés directement sur le terrain (ex. : superficie), tandis que d'autres sont estimés indirectement à partir d'observations (ex. : texture du sol liée à la conductivité hydraulique). Certains paramètres, en revanche, ne peuvent être ajustés qu'en comparant les résultats simulés aux données observées, comme le débit. En raison des incertitudes, même les paramètres mesurés nécessitent souvent des ajustements pour affiner le modèle. Les essais d'optimisation, composés d'un modèle de

bassin, d'un modèle météorologique et de paramètres de contrôle temporel, permettent d'automatiser ces ajustements en utilisant des fonctions objectives, des méthodes de recherche et des analyses graphiques pour évaluer la qualité des résultats.[19]

IV.7.5.1. Créer un essai d'optimisation

On va dans "Compute "→ "Optimization Trial Manager», Cliquez sur New pour créer un nouvel essai, Donner un nom à l'essai, Sélectionnez : le bassin versant concerné, le modèle météorologique, la spécification de contrôle.

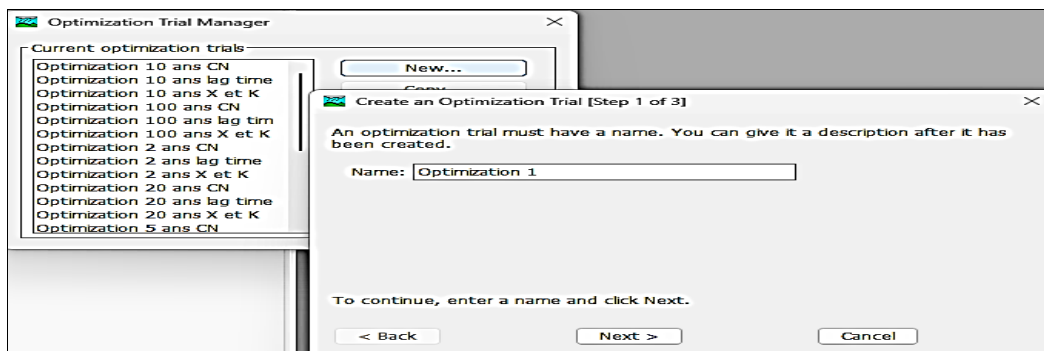


Figure IV. 24: crée une optimisation.

En bas dans "Optimization Trial" on introduit le pas de temps ainsi que la date (mêmes dates que celles données à contrôle Spécification).

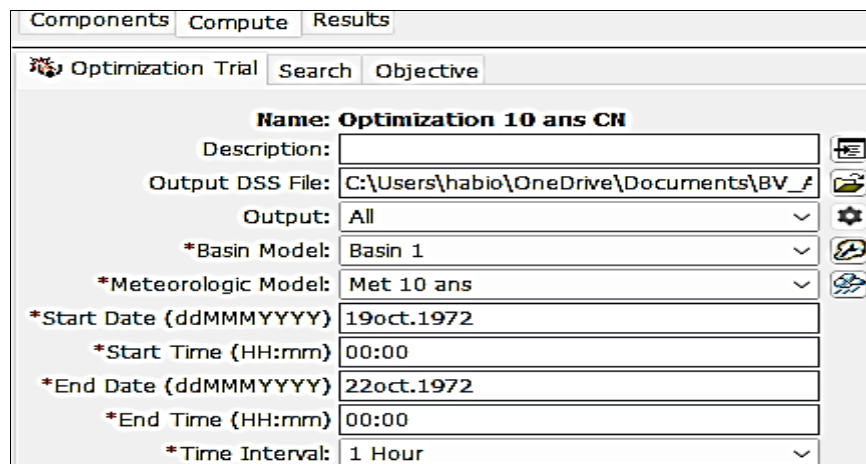


Figure IV. 25: Les données d'essais d'optimisation.

Ensuite, choisir la méthode de recherche (dans ce cas en utilise la méthode Simplex), dans l'option Search, car elle est largement répandue pour l'optimisation. Le nombre maximal d'itérations est fixé à 100, afin de garantir un équilibre entre précision et temps de calcul. Une tolérance de 0,01 est définie comme critère d'arrêt de l'algorithme d'optimisation.

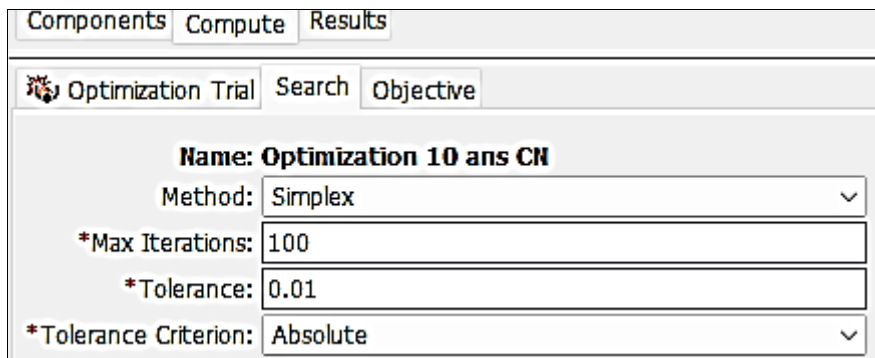


Figure IV. 26: La méthode de recherche pour l’essai d’optimisation.

Dans le champ Objective, le paramètre Goal est défini sur Maximization, car l’objectif est de maximiser l’indice de performance pour rapprocher au mieux les deux hydrographes. Dans la section Time-Series, on sélectionne Discharge (Débit) afin de comparer les débits simulés aux données observées. Pour le champ Statistics, on choisit Peak Discharge, afin de cibler spécifiquement le débit de pointe dans l’évaluation.

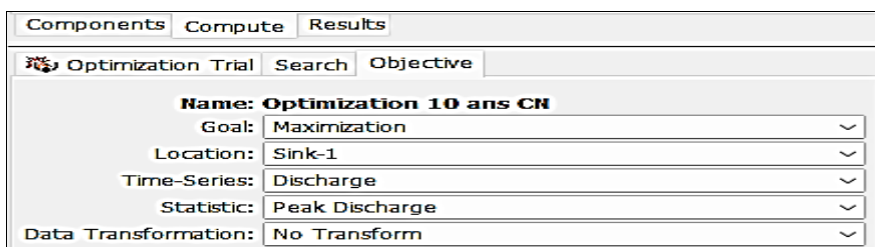


Figure IV. 27: Objectif pour un essai d'optimisation avec l'objectif défini sur Maximisation.

Pour une bonne calibration, il est nécessaire d’ajouter d’autres paramètres. Pour cela, faites un clic droit sur Optimization1, puis sélectionnez Add Parameters.

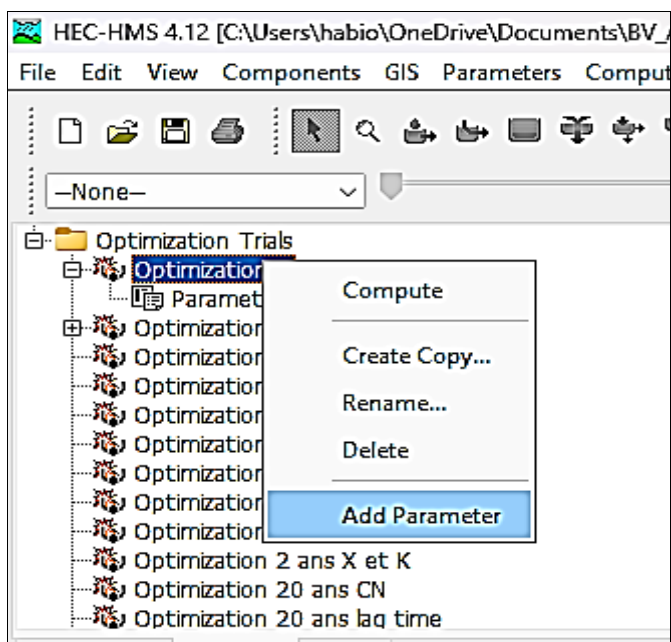


Figure IV. 28: Fenêtre d’ajout des paramètres.

Dans le cadre de la calibration du modèle, plusieurs essais d'optimisation ont été réalisés pour affiner les paramètres hydrologiques et hydrauliques sur l'ensemble des bassins versants étudiés (Azazga, Hamiz et Oued Zeboudj), et ce pour toutes les périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans). À titre d'exemple, les étapes suivantes sont illustrées à partir du bassin versant d'Azazga.

La première optimisation a porté sur le Curve Number, appliqué à tous les sous-bassins, à travers le paramètre SCS Curve Number – Curve Number. La valeur initiale utilisée était de 87,18, avec une valeur minimale fixée à 70 et une valeur maximale à 95, afin d'évaluer l'influence de ce paramètre sur la performance du modèle.

La deuxième optimisation a concerné le Lag Time, également appliqué à tous les sous-bassins, via le paramètre SCS Unit Hydrograph – Lag Time, avec une plage de variation allant de 60 à 360 minutes.

La troisième optimisation s'est concentrée sur les paramètres Muskingum K et Muskingum X, appliqués à tous les tronçons de cours d'eau (Reachs). Les paramètres utilisés sont respectivement Muskingum – K (avec des valeurs comprises entre 0,5 et 6) et Muskingum – X (avec des valeurs allant de 0 à 0,5).

Enfin, une quatrième optimisation a été effectuée en combinant l'ensemble de ces paramètres (SCS Curve Number – Curve Number, SCS Unit Hydrograph – Lag Time, Muskingum – K et Muskingum – X) afin d'évaluer leur interaction et d'atteindre une calibration optimale du modèle.

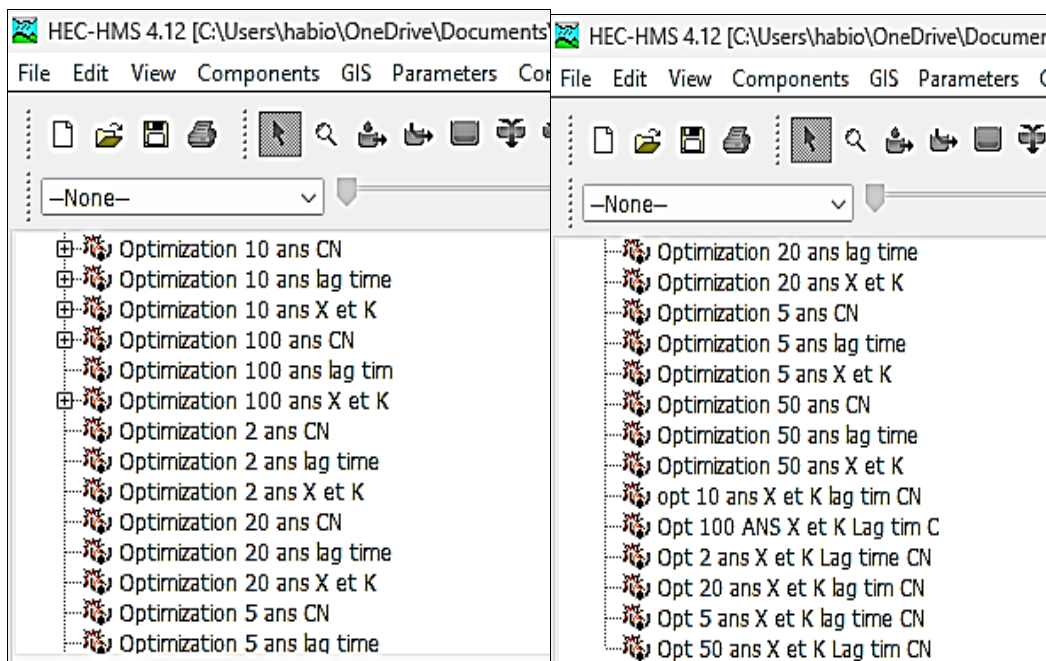


Figure IV. 29: les essais d'optimisations.

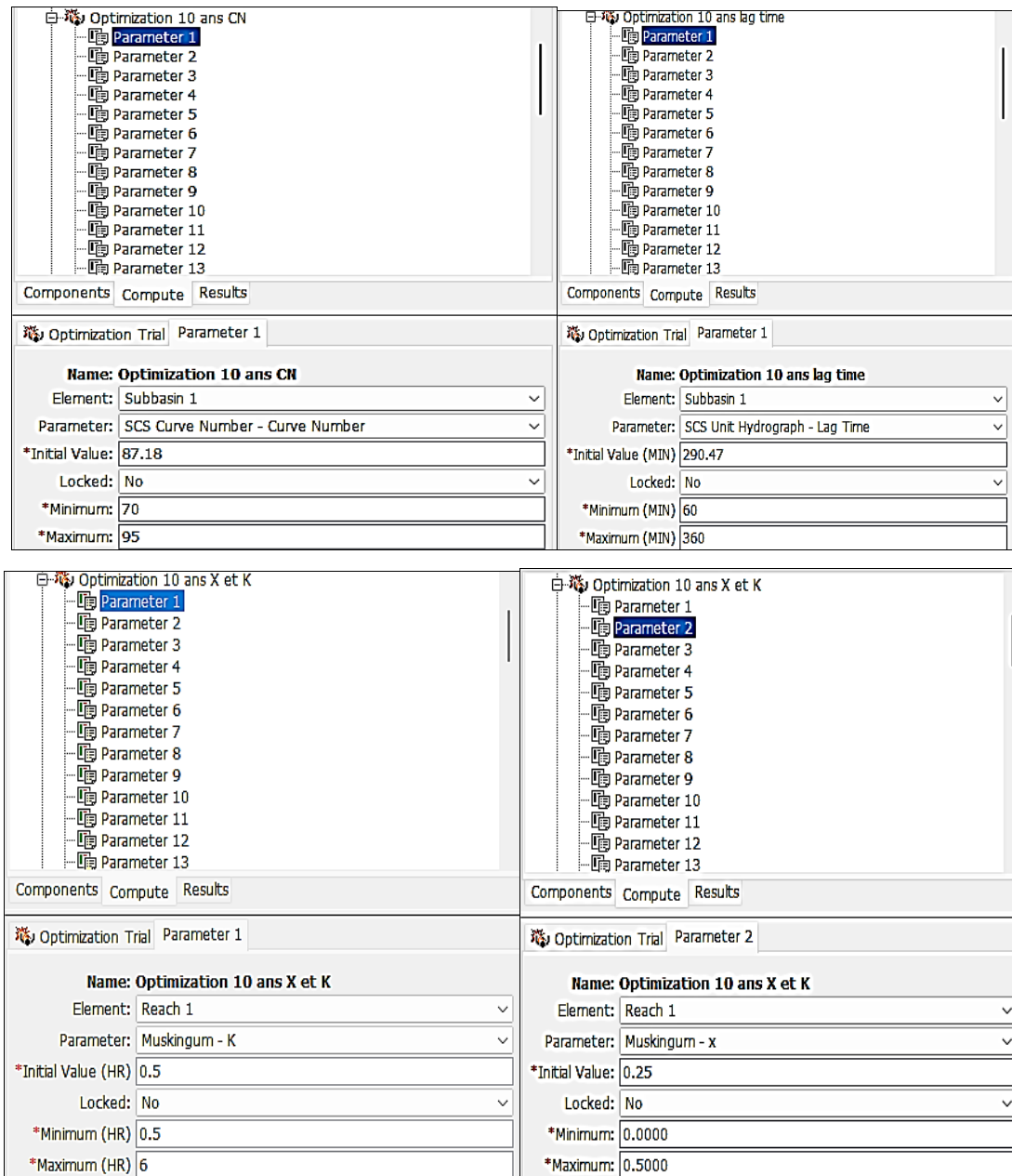


Figure IV. 30: les essais d’optimisations.

Ensuite, dans la barre de menu, sélectionnez Compute → Compute Trial [Optimization ex : 10 ans X et K], pour lancer l’optimisation. Vous pouvez également cliquer directement sur l’icône d’optimisation dans la barre d’outils. (Voir Figure IV.32)

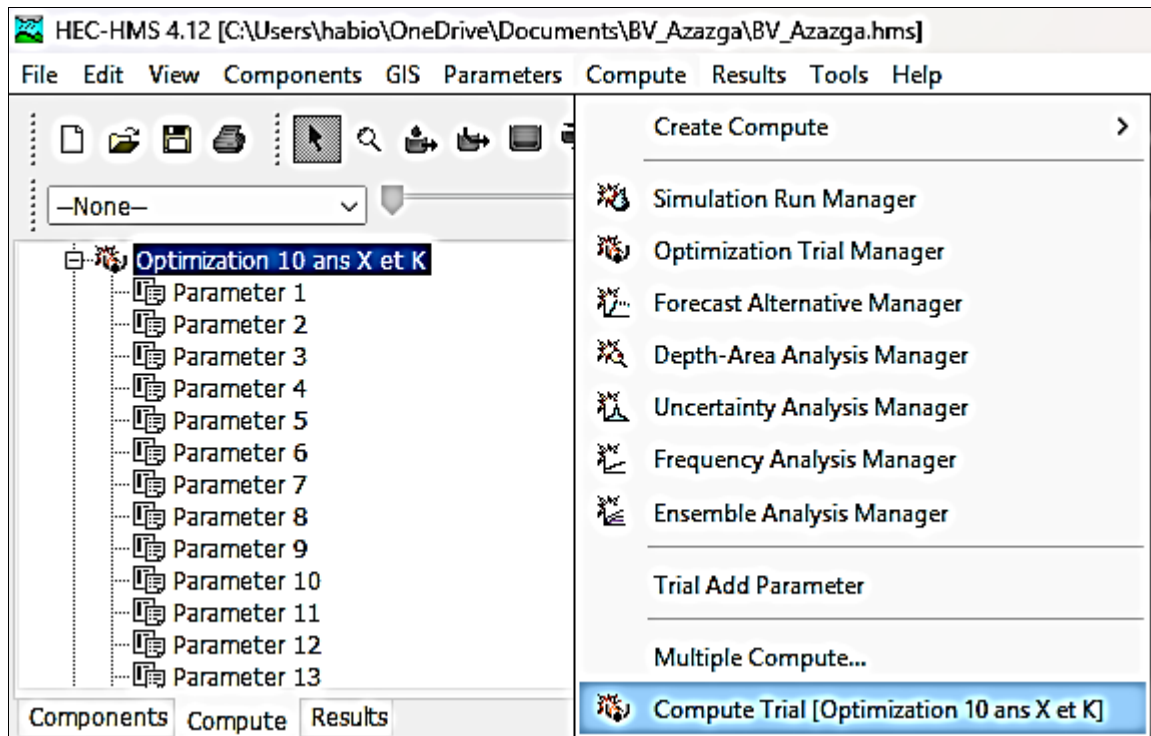


Figure IV. 31: calculer une optimisation.

IV.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'application du modèle HEC-HMS aux bassins versants d'Azazga, Hamiz et Oued Zeboudj. Toutes les étapes de construction du modèle, de l'intégration des données à la calibration par optimisation, ont été menées à bien. Ce travail constitue une base essentielle.

Pour le chapitre suivant, qui sera consacré à l'analyse et à la discussion des résultats issus des simulations et des optimisations.

CHAPITRE V
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

V.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats de la simulation hydrologique du bassin versant à l'aide de HEC-HMS, ainsi que les effets de l'optimisation des paramètres du modèle. Il vise à évaluer les débits ruisselés à partir des données de pluie, en analysant la réponse du bassin aux événements pluvieux. D'abord, les résultats de simulation sont exposés à travers les hydrogrammes, les débits de pointe et les volumes. Ensuite, une optimisation des paramètres clés (Curve Number, Lag Time et muskingum x et k) afin d'améliorer la représentation du comportement réel du bassin. L'objectif est d'affiner la modélisation du ruissellement à l'exutoire et de mieux comprendre la dynamique hydrologique du bassin.

V.2. Résultats de simulation hydrologique

Afin d'évaluer le comportement hydrologique des trois bassins versants étudiés, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel HEC-HMS pour différentes précipitations associées à des périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans. Chaque simulation a permis de générer un hydrogramme de débit à l'exutoire correspondant au scénario de pluie retenu.

Les résultats obtenus sont présentés et analysés ci-dessous

V.2.1. Simulation du bassin versant d'Azazga

V.2.1.1. Résultat au niveau de sous bassin

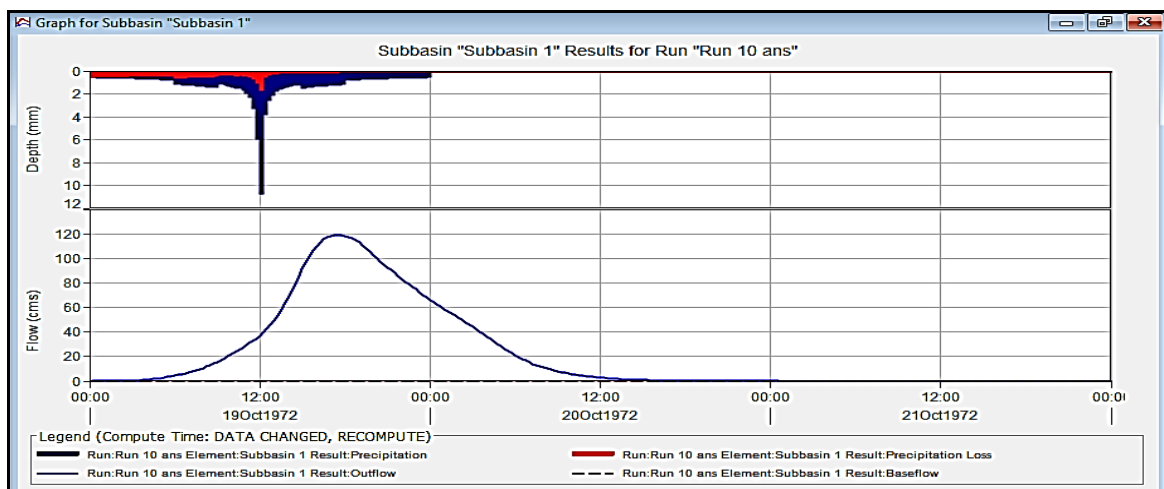


Figure V. 1: hydrogramme simulé au sous-bassin période de retour de 10 ans

Le graphique illustre un épisode de précipitation intense et brève, atteignant son maximum vers midi le 19 octobre 1972, caractéristique d'une pluie décennale. Cette pluie soudaine déclenche une réponse rapide du bassin, visible par l'augmentation immédiate du débit de ruissellement. Les pertes hydriques (infiltration, interception) restent faibles, ce qui

signifie que la majeure partie de l'eau s'est transformée en ruissellement de surface. Le débit de sortie atteint environ 120 m³/s peu de temps après le pic de pluie, suivi d'une décroissance progressive traduisant la vidange naturelle du bassin. L'absence de débit de base indique que l'écoulement provient exclusivement du ruissellement de surface.

V.2.1.2. Résultats au niveau de reach

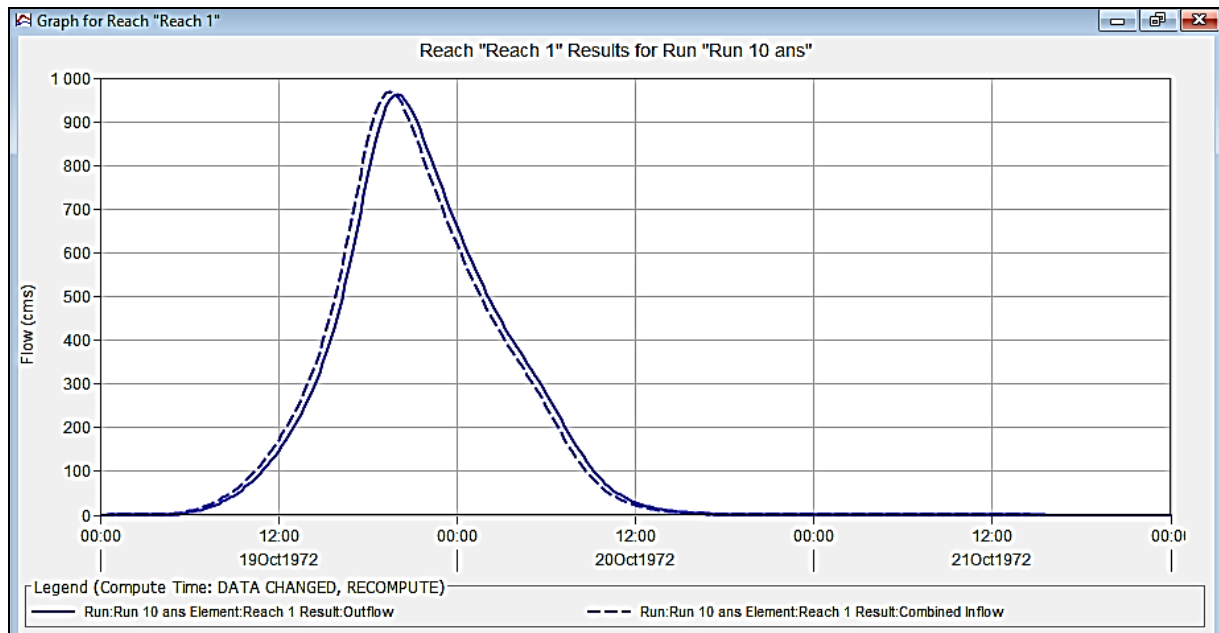


Figure V. 2: hydrogramme simulé au reach période de retour de 10 ans

Le graphique présente l'évolution du débit au niveau du Reach 1 du bassin versant simulé dans HEC-HMS. L'axe des abscisses correspond à la période temporelle de la simulation, s'étendant du 18 au 21 octobre 1972. L'axe des ordonnées représente le débit en mètres cubes par seconde (m³/s). Aux débuts La courbe de sortie (ligne continue) représente les débits de sortie est légèrement inférieure retardée par rapport à la courbe d'entrée (pointillée) qui représente les débits à l'entrée, indiquant un léger amortissement du débit par le Reach.

La courbe indique un pic de débit qui survient aux alentours de midi le 19 octobre 1972, atteignant une valeur maximale proche de 900 m³/s. Cette valeur élevée témoigne d'un événement hydrologique significatif. Après ce pic, le débit diminue graduellement jusqu'à se stabiliser à une valeur proche de zéro vers midi le 20 octobre.

V.2.1.3. Résultats au niveau du sink

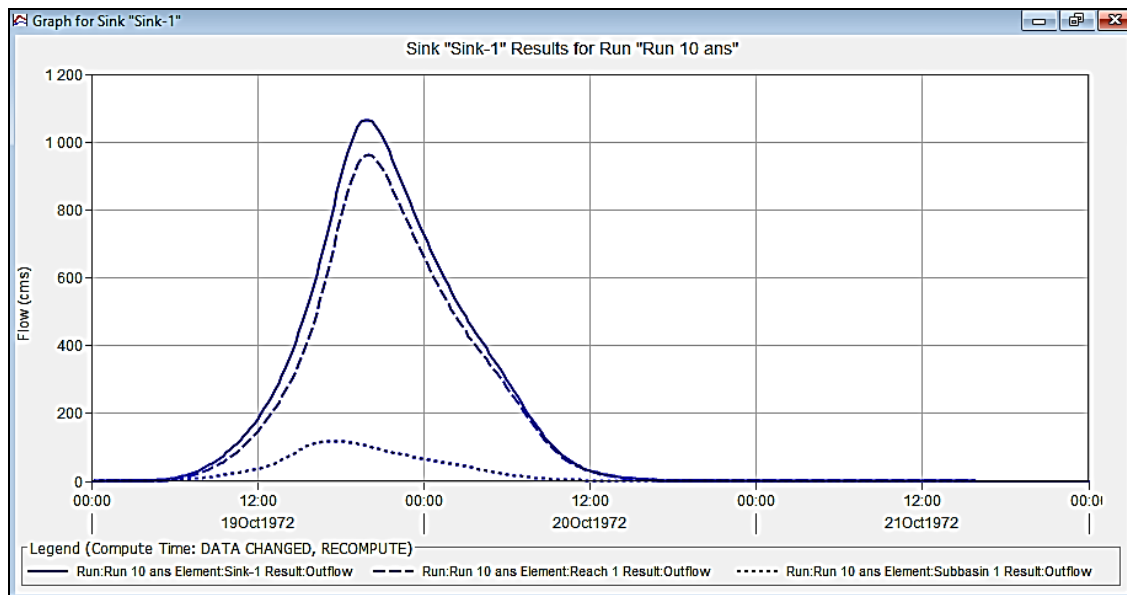


Figure V. 3: hydrogramme simulé au sink période de retour de 10 ans

Le graphique illustre l'évolution du débit (en m^3/s) au cours du temps, en réponse à un événement pluvieux d'occurrence décennale. Il met en évidence une montée rapide des débits, culminant avec un pic d'environ $1\,100\ \text{m}^3/\text{s}$ enregistré au niveau de l'exutoire Sink-1, aux alentours de 20 h le 19 octobre 1972. Trois courbes sont affichées, correspondant respectivement aux débits de sortie :

La courbe pointillée représente (Sous bassin 1) montre que l'écoulement commence rapidement après le début de l'événement, atteignant un petit pic environ $150\ \text{m}^3/\text{s}$. Cela reflète le ruissellement direct du sous bassin dû à l'intensité des précipitations. La courbe en tirets qui est le (Reach 1) suit ensuite, avec un débit plus élevé mais étalé dans le temps, en raison du routage des eaux à travers le tronçon de rivière. Ce processus ralentit légèrement le pic et lisse la forme de la crue. Enfin, la courbe pleine (Sink-1) montre l'effet cumulé de tous les écoulements, avec un débit de crue plus intense, atteignant le pic principal du système.

Les résultats des débits maximaux pour chaque période de retour à l'exutoire lors de la simulation du bassin versant Azazga

Tableau V. 1: Débits de pointe simulés à l'exutoire du bassin versant d'Azazga pour différentes périodes de retour

Période de retour	Débit Q (m^3/s)	Volume (MM)	Temps de pic (h)
2	613.1	44.08	20h
5	887.4	68.93	20h
10	1065	86.26	19h45min
20	1232.4	103.35	19h45min
50	1444.6	126.10	19h45min
100	1601.4	143.64	19h45min

V.2.2. simulation du Bassin versant Hamiz

V.2.2.1. Résultat au niveau de sous bassin

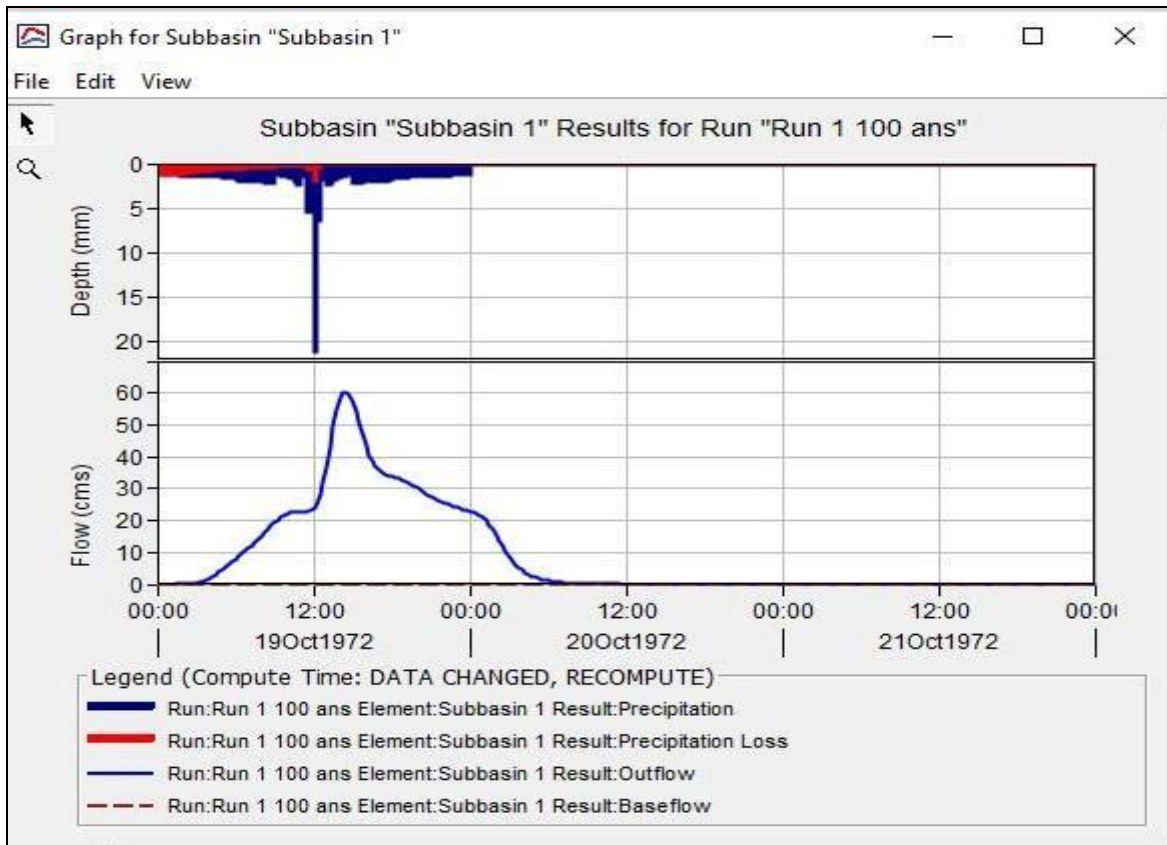


Figure V. 4: hydrogramme simulé au sous-bassin periode de retour de 100 ans

La simulation hydrologique du sous-bassin Subbasin 1 pour un événement centennal met en évidence une réponse rapide et marquée du bassin face à une pluie extrême. Le débit de ruissellement augmente brusquement, atteignant un pic d'environ 45 m³/s en un temps relativement court, ce qui traduit une réactivité élevée du bassin. Cette réaction rapide

indique que les paramètres initiaux du modèle induisent un écoulement direct, avec peu de rétention ou de retard. Le temps au pic reste pratiquement constant au cours de la simulation, ce qui montre que la dynamique des écoulements est largement contrôlée par la morphologie du bassin, notamment sa pente, sa forme et la densité de son réseau hydrographique. Cette stabilité temporelle, indépendamment de l'intensité de la pluie, souligne l'importance des caractéristiques géomorphologiques dans le comportement hydrologique du bassin. Le débit de base est très faible voire négligeable, ce qui confirme que le ruissellement est principalement de type superficiel et direct.

Les éléments graphiques du modèle HEC-HMS illustrent ces dynamiques :

- La courbe bleue foncée représente l'évolution du débit de ruissellement (Outflow) dans le temps.
- La courbe rouge correspond à l'intensité de la pluie (Précipitation) en entrée du modèle.
- La zone bleue claire inversée indique les pertes par infiltration (Précipitation Loss).
- La courbe violette pointillée traduit le débit de base (Baseflow), quasi inexistant dans ce cas.

V.2.2.2. Résultats au niveau de reach

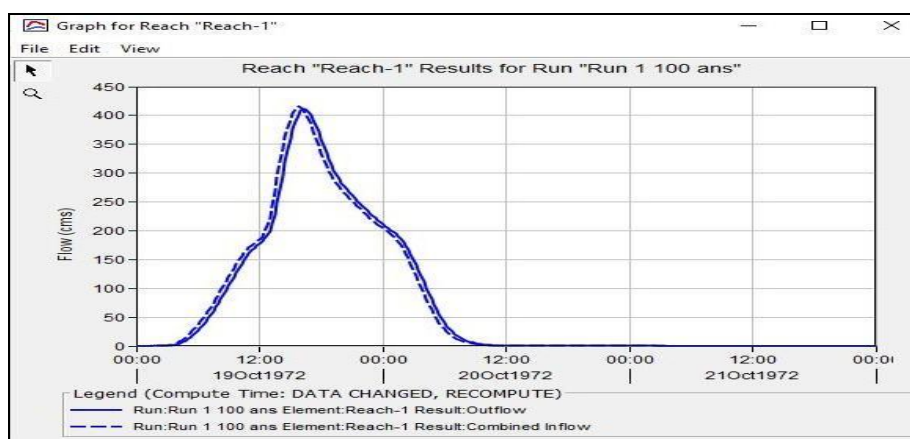


Figure V. 5: hydrogramme simulé au reach période de retour de 100 ans

Ce graphique montre que le débit en sortie du Reach-1 (ligne pleine) montre le débit qui transite dans le tronçon de rivière principal avant d'atteindre l'exutoire. Suit de très près le débit entrant combiné (ligne pointillée), avec un léger décalage temporel. Les deux courbes ont une forme très similaire, en cloche, avec une montée rapide vers un débit 470

m³/set un pic vers 12h le 19 octobre 1972 et un débit les environs de 16 h, suivie d'une décrue progressive.

V.2.2.3. Résultats au niveau du sink

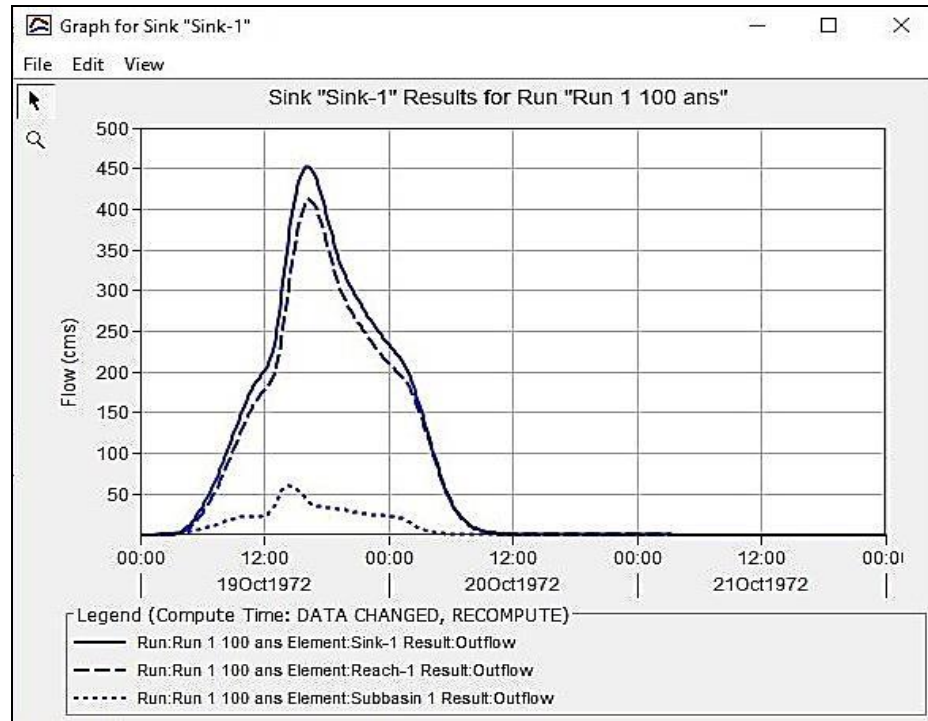


Figure V. 6: hydrogramme simulé au sink période de retour de 100 ans

La courbe principale (ligne pleine) montre un pic de débit d'environ 460 m³/s atteint vers 16h, le 19 octobre 1972. La montée du débit est rapide, indiquant une réponse hydrologique intense à une précipitation probablement très forte et soudaine, typique d'un événement centennal.

La courbe pointillée (Subbasin 1) montre que l'écoulement commence rapidement après le début de l'événement, atteignant un petit pic environ 50 m³/s. Cela reflète le ruissellement direct du sous-bassin dû à l'intensité des précipitations. La courbe en tirets (Reach 1) suit ensuite, avec un débit plus élevé mais étalé dans le temps, elle suit la courbe de sink légèrement en raison du routage des eaux à travers le tronçon de rivière. Ce processus ralentit légèrement le pic et lisse la forme de la crue. Enfin, la courbe pleine (Sink-1) montre l'effet cumulé de tous les écoulements, avec un débit de crue plus intense, atteignant le pic principal du système simulation du bassin versant Hamiz

Tableau V. 2:Débits de pointe simulés à l'exutoire du bassin versant Hamiz pour différentes périodes de retour

Période de retour	Débit Q (m^3/s)	Volume (MM)	Temps de pic (h)
2	122	23,29	16,5
5	216,8	48,94	16,25
10	277,7	69,37	16,25
20	333,6	91,07	16,25
50	402,5	121,98	16,25
100	452,2	147,17	16,25

V.2.3. simulation du Bassin versant Oued Zeboudj

V.2.3.1. Résultat au niveau de sous bassin

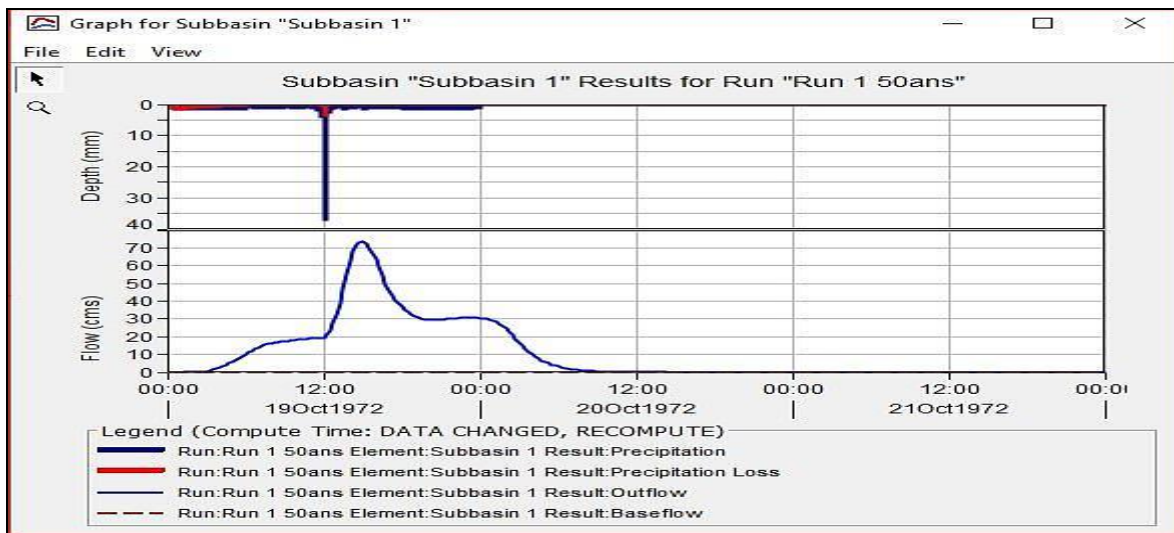


Figure V. 7: hydrogramme simulé au sous-bassin periode de retour de 50 ans

Le premier graphique montre la réponse du sous-bassin à la précipitation intense simulée. La pluie enregistrée (courbe bleue foncée) est brève mais très intense, concentrée entre 10h et 13h le 19 octobre 1972, atteignant environ 35 mm. Cette précipitation provoque une réponse hydrologique quasi immédiate. En effet, les pertes par infiltration (courbe rouge) chutent rapidement après le début de la pluie, indiquant que le sol devient rapidement saturé, ce qui réduit considérablement la capacité d'infiltration. Cela se traduit par une génération de ruissellement de surface importante (courbe bleue claire), atteignant un pic

d'environ 65 m³/s à 13h. Le baseflow (débit de base souterrain), représenté en violet, est quasi nul, soulignant que la crue est essentiellement constituée de ruissellement direct.

V.2.3.2. Résultats au niveau de reach

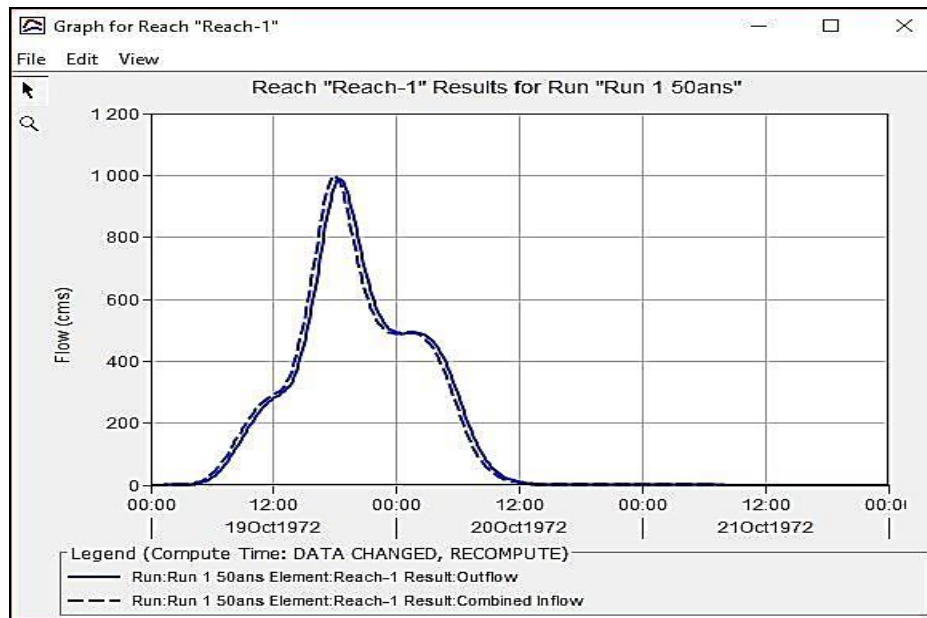


Figure V. 8: hydrogramme simulé au reach période de retour de 50 ans

La courbe en pointillés bleus représente le débit entrant dans le tronçon, alors que la courbe pleine montre le débit sortant. Cette courbe suit presque parfaitement la forme de la courbe du débit total à l'exutoire (Sink-1), avec un pic de crue d'environ 1000 m³/s enregistré vers 18h00 le 19 octobre 1972.

V.2.3.3. Résultats au niveau du sink

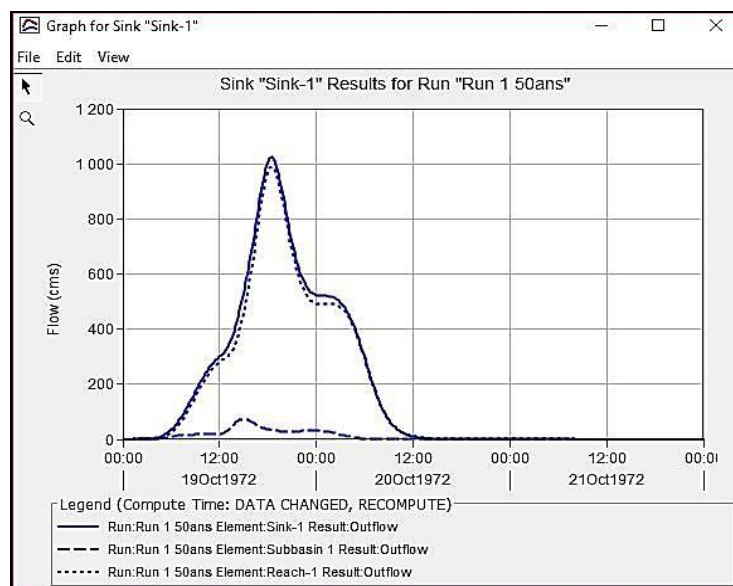


Figure V. 9: hydrogramme simulé au sink période de retour de 50 ans

Ce graphique représente l'évolution du débit (en m^3/s) à l'exutoire d'un bassin versant modélisé, suite à un événement de pluie extrême avec une période de retour de 50 ans. Trois courbes y sont représentées, toutes en bleu mais de style différent, indiquant respectivement :

Courbe continue : débit total à l'exutoire le débit à l'exutoire augmente brutalement à partir de 18h le 19 octobre 1972, atteignant un pic de l'ordre de $1050 m^3/s$ vers 18h. La montée est rapide et abrupte, Après ce pic, la décrue est progressive, et le débit revient à un niveau basal en quelques heures, indiquant un temps de concentration court.

Courbe pointillée longue Elle montre une réponse rapide à l'événement de pluie survenu le 19 octobre 1972, avec un pic de débit situé vers midi, atteignant environ $70 m^3/s$. Ce pic apparaît bien avant le pic principal à l'exutoire

Courbe pointillée courte débit à la sortie du tronçon hydraulique. Cette courbe est quasiment identique à la courbe totale de Sink-1, avec un pic légèrement inférieur $1000 m^3/s$. Cela confirme que la majeure partie du débit à l'exutoire transite par Reach-1, qui regroupe les apports des différents sous-bassins

Les résultats des débits maximaux pour chaque période de retour à l'exutoire lors de la simulation

Tableau V. 3:Débits de pointe simulés à l'exutoire du bassin versant Hamiz pour différentes périodes de retour

Période de retour	Débit (m ³ /s)	Volume (MM)	Temps de pic (h)
2	270,2	19,05	16,5
5	507	48,96	16,25
10	669,2	54,72	16,25
20	824	71,75	16,25
50	1022,5	95,27	16,25
100	1170,9	114,68	16,25

V.3. Comparaison entre la simulation et la formule Turazza

Dans le cadre de cette étude, plusieurs simulations hydrologiques ont été réalisées à l'aide du modèle HEC-HMS, aboutissant à des débits de pointe variables selon les paramètres utilisés. Pour vérifier la cohérence des résultats obtenus, ces débits simulés ont été comparés à des valeurs théoriques calculées à l'aide de la formule empirique de Turazza, appliquée à différentes périodes de retour (Q2, Q5, Q10, Q20) et pour plusieurs durées de pluie

V.3.1. Bassin versant d'Azazga

Tableau V. 4: Comparaison des débits simulés et calculés (Turazza) – Azazga

Temps (h)	0,25	0,5	1	2	3	6	12	24	Débits de Simulation (m ³ /s)
Q ₂ (m ³ /s)	94,35	156,66	232,32	327,77	397,43	563,53	809,7	1016,26	613.1
Q ₅ (m ³ /s)	133,45	211,71	305,68	424,26	508,9	712,27	1080,49	1427	887.4
Q ₁₀ (m ³ /s)	160,01	247,85	352,88	485,59	579,19	805,15	1256,55	1704,34	1065
Q ₂₀ (m ³ /s)	185,87	282,28	397,3	542,85	644,47	890,88	1423,33	1973,49	1232.4
Q ₅₀ (m ³ /s)	219,99	326,78	453,99	615,38	726,76	998,31	1637,59	2327,48	1444.6
Q ₁₀₀ (m ³ /s)	246,15	360,27	496,19	669,04	787,37	1077,02	1798,03	2598,02	1601.4

La comparaison montre que les débits simulés avec HEC-HMS s'alignent globalement bien avec les valeurs calculées selon la formule de Turazza, en particulier pour des durées

de pluie de 6 à 12 heures, ce qui est tout à fait normal compte tenu du temps de concentration de 7 h

- Le débit Q_2 simulé, estimé à 613,1 m^3/s , est très proche de la valeur calculée pour une pluie de 6 heures (563,5 m^3/s).
- Pour Q_5 , le débit simulé atteint 887,4 m^3/s , ce qui se situe entre les valeurs de Turrazza pour des durées de 6 h (712,3 m^3/s) et 12 h (1080,5 m^3/s).
- Le débit Q_{10} simulé est de 1065 m^3/s , proche de la valeur empirique pour une pluie de 12 h (1256,6 m^3/s).
- En ce qui concerne les périodes de retour plus longues, comme débits Q_{20} (1232,4 m^3/s), débits Q_{50} (1444,6 m^3/s) et Q_{100} (1601,4 m^3/s), les résultats simulés sont également bien alignés avec les débits calculés pour une pluie de 12 heures, dont les valeurs sont respectivement de 1423,3 m^3/s , 1637,6 m^3/s et 1798,0 m^3/s .

V. 3.2. Bassin versant Hamiz

Tableau V. 5: Comparaison des débits simulés et calculés (Turrazza) – Hamiz

Temps (h)	0,25	0,5	1	2	3	6	12	24	SIMULATION
Q_2 (m^3/s)	65,17	88,58	130,69	166,71	193,63	222,36	295,31	348,01	122
Q_5 (m^3/s)	345,91	224,21	165,36	101,73	80,01	48,57	35,29	23,1	216.8
Q_{10} (m^3/s)	100,27	126,81	187,02	225,8	268,56	335,74	511,29	707,36	277
Q_{20} (m^3/s)	113,31	140,39	207,03	246,08	294,67	377,35	597,41	864,96	333.6
Q_{50} (m^3/s)	130,01	157,42	232,12	271,09	327,09	430,37	711,77	1084,65	402.5
Q_{100} (m^3/s)	142,49	169,91	250,5	289,16	350,65	469,79	799,92	1261,26	452.2

Les débits simulés par HEC-HMS ont été comparés aux valeurs calculées par la formule empirique de Turrazza pour différentes périodes de retour et durées de pluie, en particulier pour des durées de pluie de 0,5 à 6 heures, ce qui est tout à fait normal compte tenu du temps de concentration de 4 h. Les résultats montrent une bonne concordance :

- Le débit Q_2 simulé (122 m^3/s) est très proche de celui d’une pluie de 1 h (130,69 m^3/s).
- Le débit à Q_5 5 ans simulé (216,8 m^3/s) correspond bien à une pluie de 0,5 h (224,21 m^3/s).

- Le débit Q_{10} simulé ($277 \text{ m}^3/\text{s}$) est très proche de celui d'une pluie de 3 h ($268,56 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Le débit Q_{20} simulé ($333,6 \text{ m}^3/\text{s}$) est relativement proche de la valeur pour une pluie de 3 h ($294,67 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Le débit Q_{50} simulé ($402,5 \text{ m}^3/\text{s}$) est cohérent avec la valeur obtenue pour une pluie de 6 h ($430,37 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Le débit Q_{100} simulé ($452,2 \text{ m}^3/\text{s}$) est proche de celui calculé pour une pluie de 6 h ($469,79 \text{ m}^3/\text{s}$)

V.3.3. Bassin versant d'oued Zeboudj

Tableau V. 6: Comparaison des débits simulés et calculés (Turrazza) – Oued Zeboudj

Temps (h)	0,25	0,5	1	2	3	6	12	24	SIMULATION
Q_2 (m^3/s)	82,42	111,17	148,21	195,9	227,97	303,9	393,56	470,65	270.2
Q_5 (m^3/s)	149,48	186,19	230,66	284,33	317,59	412,85	555,02	773,1	507
Q_{10} (m^3/s)	204,11	243,86	290,72	345,53	377,74	484,63	664,38	1002,33	669,2
Q_{20} (m^3/s)	263,97	304,71	351,92	405,86	435,9	553,2	770,74	1241,98	824
Q_{50} (m^3/s)	352,56	391,52	436,32	486,42	512,12	642,03	910,89	1580,79	1022,5
Q_{100} (m^3/s)	427,56	462,71	503,55	548,82	570,18	709,02	1018,19	1856,52	1170,9

Pour le bassin versant d'Oued Zeboudj, les débits simulés par HEC-HMS se situent entre des durées de pluie de 6 à 12 heures, ce qui est cohérent avec le temps de concentration calculé à 7 h.

- Pour une période de retour de 2 ans (Q_2) et une pluie de 6 heures, le débit simulé par HEC-HMS est de $270,2 \text{ m}^3/\text{s}$, très proche de la valeur calculée de $303,9 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Pour Q_5 , avec une pluie de 12 heures, le débit simulé est de $507 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui se rapproche particulièrement des $555,02 \text{ m}^3/\text{s}$ calculés.
- Pour Q_{10} , toujours avec une pluie de 12 heures, le débit simulé atteint $669,2 \text{ m}^3/\text{s}$, très proche de la valeur calculée de $664,38 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Pour Q_{20} , avec une pluie de 12 heures, le débit simulé est de $824 \text{ m}^3/\text{s}$, comparé à $770,74 \text{ m}^3/\text{s}$ obtenus par calcul.
- Pour Q_{50} , sous une pluie de 12 heures, le débit simulé est de $1022,5 \text{ m}^3/\text{s}$, contre $910,89 \text{ m}^3/\text{s}$ calculés.
- Enfin, pour Q_{100} , avec une pluie de 12 heures, le débit simulé par HEC-HMS est de $1170,9 \text{ m}^3/\text{s}$, se rapprochant de la valeur calculée de $1018,19 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ces comparaisons montrent que les débits simulés par HEC-HMS sont globalement cohérents avec les valeurs empiriques issues De la formule, selon les périodes de retour et les durées de pluie pour les trois bassins versant

La comparaison entre les débits simulés par HEC-HMS et ceux calculés avec la formule de Turraza montre une bonne Corrélation générale. Dans la majorité des cas, les débits simulés se rapprochent des valeurs empiriques, et aussi elle dépend principalement par les coefficients empiriques utilisés (comme les coefficients de ruissellement et les paramètres liés à la pente ou à la forme du bassin). En effet, ces coefficients, souvent définis à partir de moyennes ou de valeurs génériques, ne tiennent pas toujours compte des spécificités locales du terrain, des sols ou de l'occupation du sol, ce qui peut affecter la précision des résultats.

V.4. Résultats de l'optimisation

V.4.1. Optimisation du lagtime du bassin versant Azazga

V.4.1.1. Niveau de subbasin

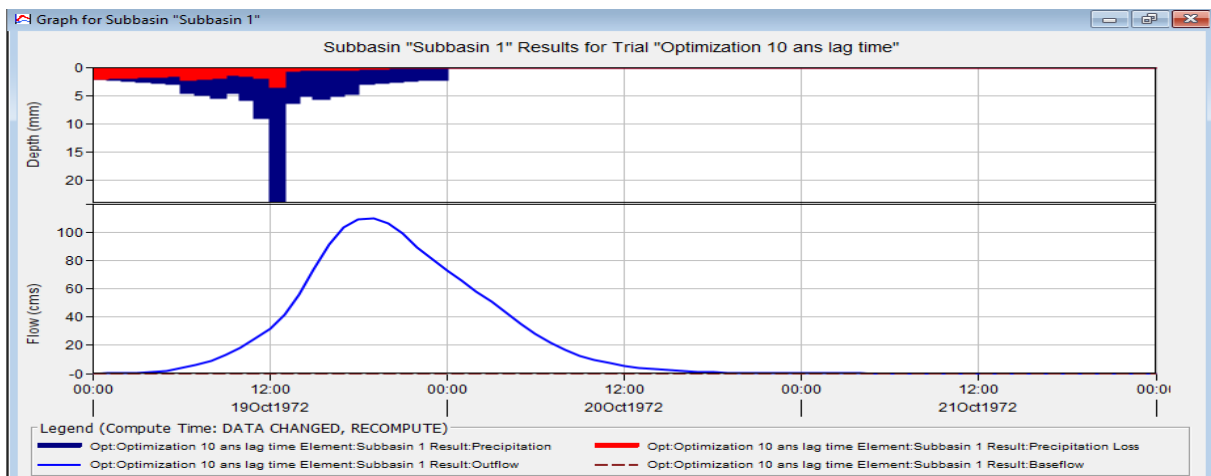


Figure V. 10: Hydrogramme du sous-bassin après optimisation du lag time (TR = 10 ans)

On observe un événement pluvieux intense et court qui atteint un maximum vers midi le 19 octobre 1972. Ce pic précipitant génère une réponse hydrologique rapide.

Le débit à l'exutoire du Subbasin 1 suit rapidement la précipitation. Le débit maximal se

situe légèrement après le pic de précipitation, traduisant un temps de réponse rapide, typique d'un petit bassin versant. Le débit dépasse les 100 m³/s, ce qui montre une concentration rapide des eaux en raison probablement d'un ruissellement important.

V.4.1.2. Niveau de reach

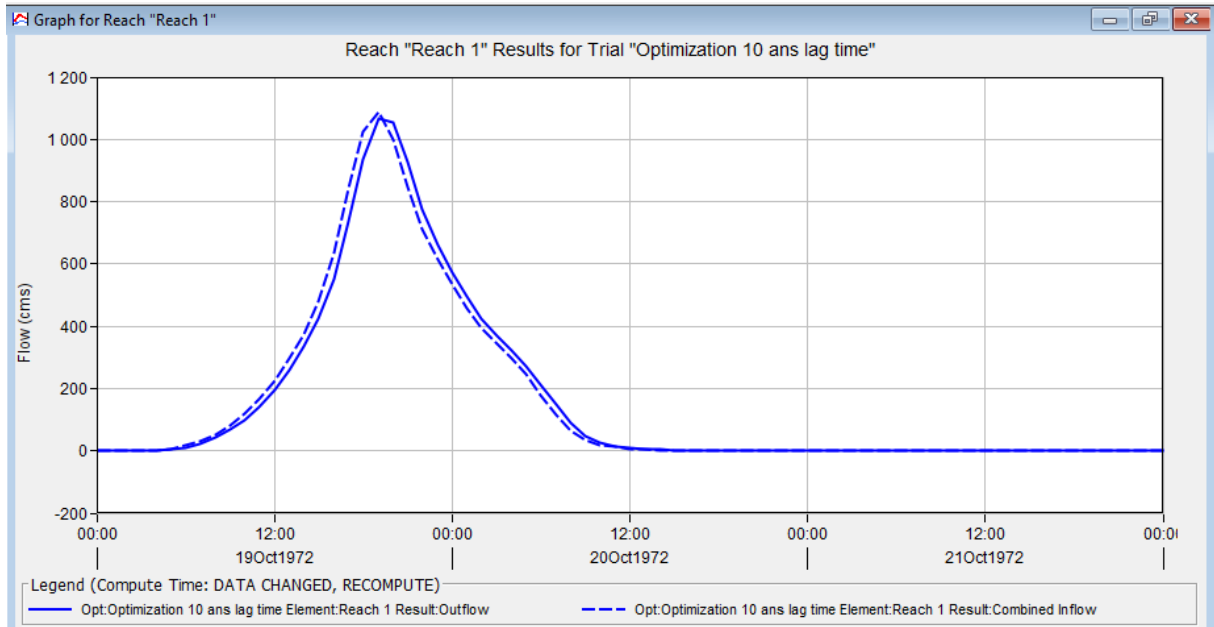


Figure V. 11: Hydrogramme du reach après optimisation du lag time (TR = 10 ans)

Le débit de pointe atteint environ 1070 m³/s, traduisant un transfert efficace du débit généré en amont. La forme symétrique de la courbe avec une montée et descente rapide indique une onde de crue abrupte et peu amortie, ce qui peut présenter un risque élevé en aval si non géré.

Le pic de débit en entrée (inflow) et sortie (outflow) est presque superposé, avec un très léger décalage. Cela indique que la propagation dans le Reach est rapide, ce qui reflète une courte durée de translation.

V.4.1.3. Niveau de sink

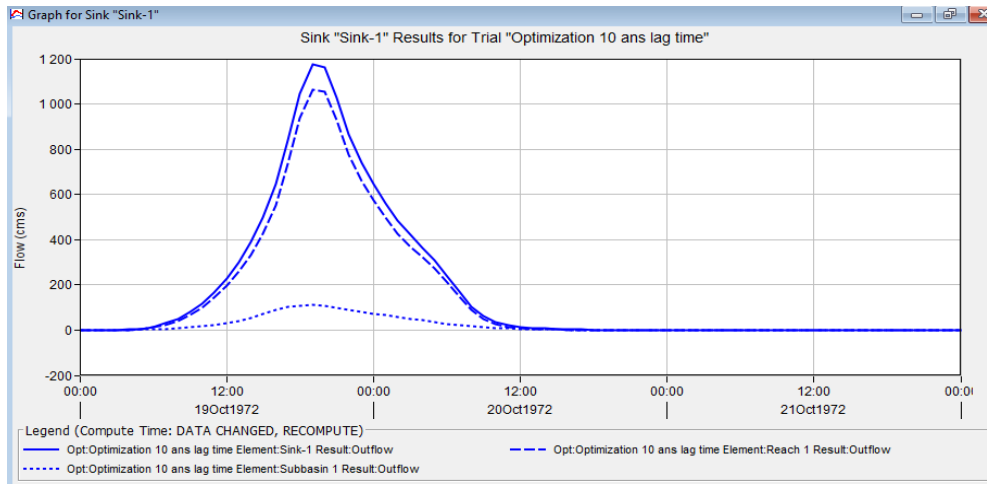


Figure V. 12: Hydrogramme du sink après optimisation du lag time (TR = 10 ans)

On observe un pic dépassant 1100 m³/s, ce qui représente la somme des débits issus du Subbasin 1 via le Reach 1. La courbe est bien synchronisée avec celle du Reach, mais le pic est légèrement supérieur en raison de l’addition des débits (effet cumulatif).

V.4.2. Optimisation du lagtime du bassin versant hamiz

V.4.2.1. Niveau de subbasin

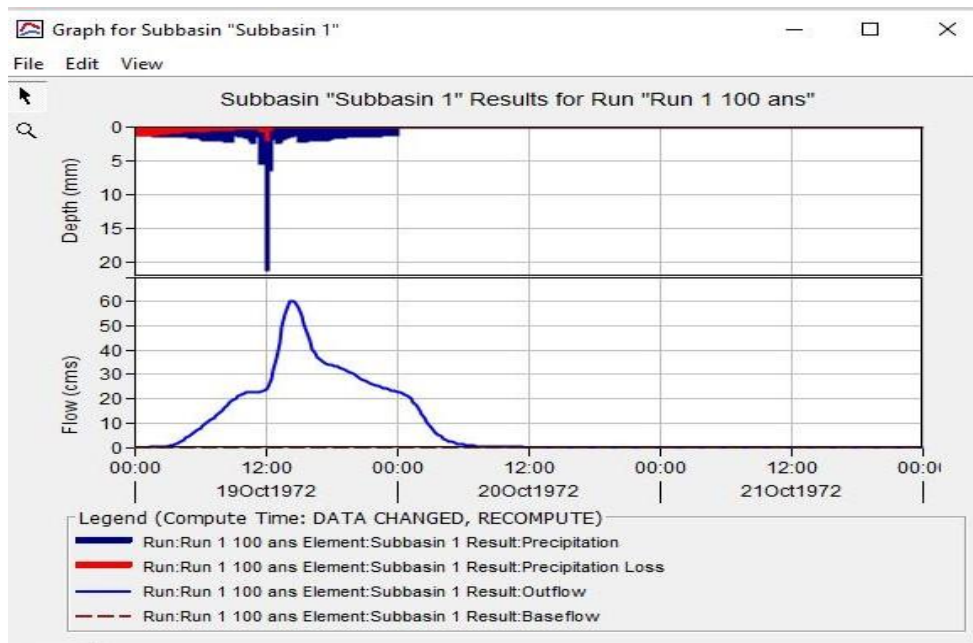


Figure V. 13: Hydrogramme du sous-bassin après optimisation du lag time (TR = 100 ans)

L’hydrogramme de sortie. Le pic de débit atteint environ 50 m³/s, avec une montée relativement rapide suivie d’une décroissance progressive. Cette forme est directement influencée par le lag time optimisé, qui régule le transfert de l’eau vers l’exutoire en

étalant la crue dans le temps. La réponse hydrologique simulée devient ainsi plus réaliste et cohérente avec le comportement attendu du bassin.

V.4.2.2. Niveau de reach

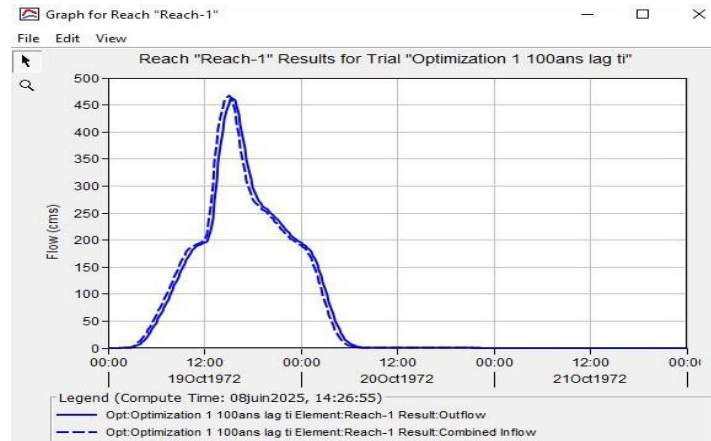


Figure V. 14: Hydrogramme du reach après optimisation du lag time (TR = 100 ans)

Le pic de débit simulé est d'environ 470 m³/s, atteint aux alentours de midi le 19 octobre 1972. Les deux courbes (débit entrant et débit sortant) sont quasiment superposées, ce qui indique un transfert rapide de l'eau dans le tronçon étudié, sans pertes notables.

Le Reach se comporte essentiellement comme un canal de transfert, sans effet significatif d'atténuation ou de stockage. L'optimisation du paramètre Lag Time permet de conserver une forme d'hydrogramme cohérente et réaliste, caractérisée par une montée et une descente rapides du débit.

Cela reflète une réponse hydrologique directe du bassin versant après l'épisode pluvieux, mettant en évidence une faible rétention et une forte réactivité du système.

V.4.2.3. Niveau de sink

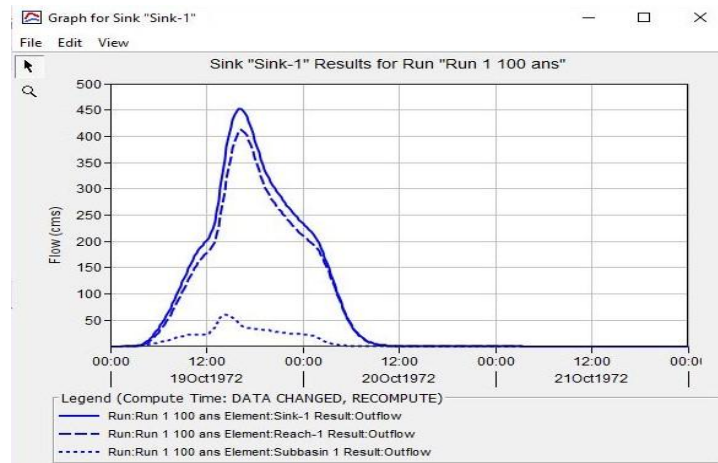


Figure V. 15: Hydrogramme du sink après optimisation du lag time (TR = 100 ans)

Les graphiques générés montrent que le débit simulé à l'exutoire (Sink-1) atteint un pic d'environ 520 m³/s, légèrement supérieur au débit de pointe observé dans le tronçon Reach-1 les environs 470 m³/s et nettement plus élevé que le débit initial du sous-bassin de 50 m³/s. Cette évolution illustre la contribution cumulée des différents éléments du bassin versant

V.4.3. Optimisation du lagtime du bassin versant oued zeboudj

V.4.3.1. Niveau de subbasin

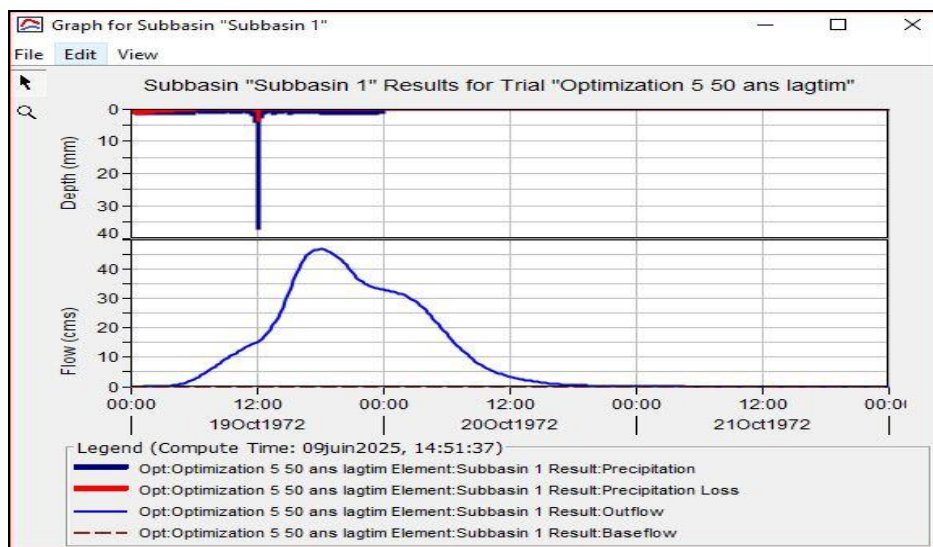


Figure V. 16: Hydrogramme du sous-bassin après optimisation du lag time (TR = 50 ans)

Le graphique montre une précipitation intense et brève vers midi le 19 octobre 1972, avec une faible infiltration (pertes en rouge), ce qui indique un ruissellement majoritaire. Le débit de sortie (en bleu) réagit rapidement à l'événement, atteignant un pic d'environ

14 m³/s, suivi d'une décrue progressive. Le débit de base est nul, ce qui suggère une absence d'écoulement souterrain.

La forme de l'hydrogramme confirme que le bassin réagit de façon rapide et concentrée, traduisant une faible capacité de rétention et une topographie favorisant l'écoulement direct. L'optimisation du lag time permet ici une meilleure synchronisation temporelle, sans modifier l'intensité de la réponse.

V.4.3.1. Niveau de reach

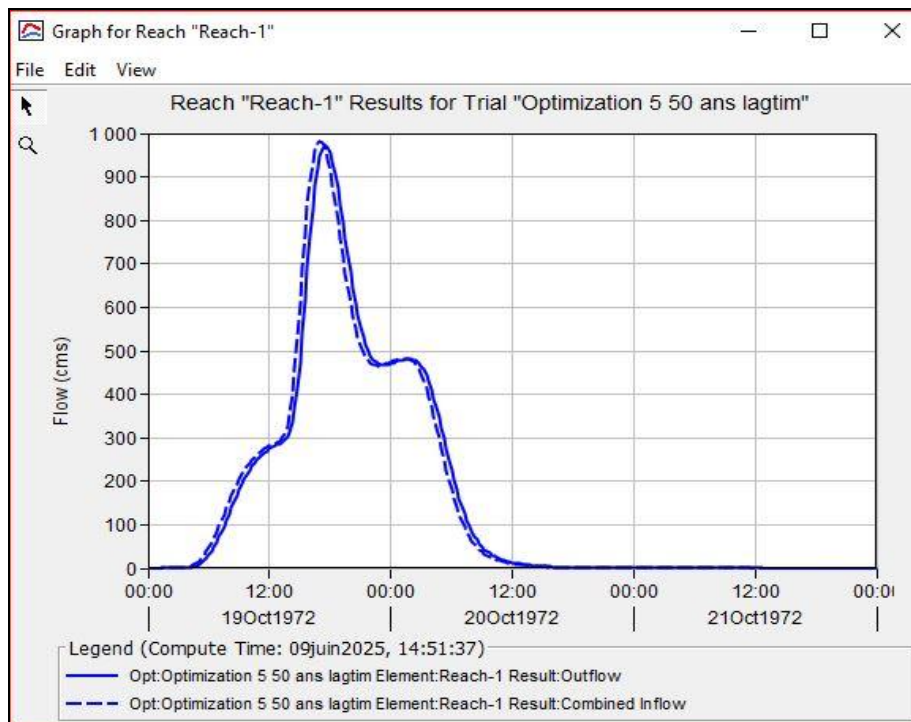


Figure V. 17: Hydrogramme du reach après optimisation du lag time (TR =50 ans)

Le graphique montre que le reach "Reach-1" agit principalement comme un canal de transfert, avec peu de stockage ou de retard. Le débit sortant suit de très près le débit entrant, avec un léger décalage temporel dû au lag time optimisé. Le pic de crue atteint environ 950 m³/s, avec une montée rapide et une décrue plus progressive. Cette forme d'hydrogramme reflète une transmission efficace de l'onde de crue, sans perte importante, et une réponse réaliste du reach grâce à l'ajustement du temps de concentration.

V.4.3.3. Niveau de sink

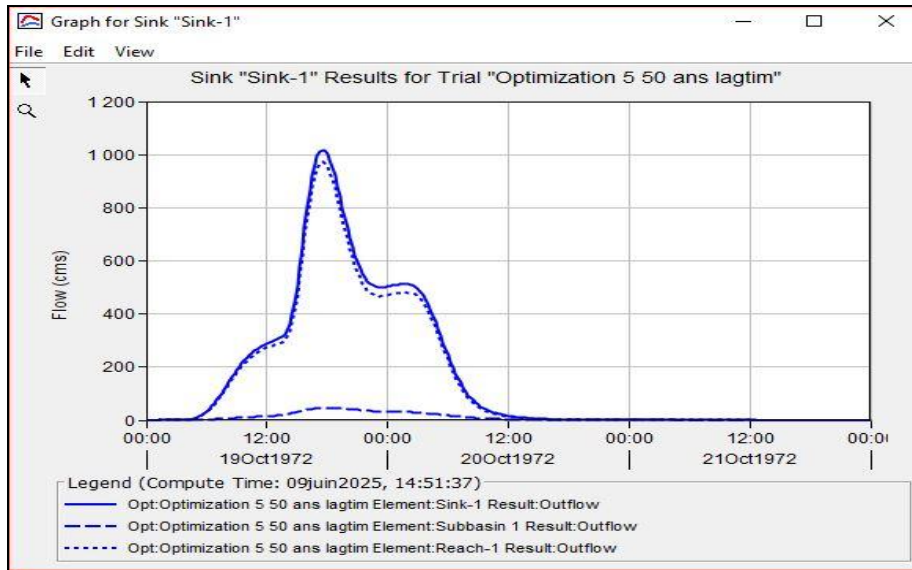


Figure V. 18: Hydrogramme sink après optimisation du lag time (TR = 50 ans)

Présente une courbe de crue nettement plus étalée dans le temps, traduisant une réponse hydrologique plus lente et plus réaliste du bassin.

On observe également un décalage du pic de débit, qui se produit légèrement plus tard dans la simulation optimisée. Cette temporalité modifiée est le reflet d'un allongement du temps de concentration, rendu possible par l'augmentation du lag time. De plus, la pente ascendante de l'hydrogramme devient moins abrupte, ce qui témoigne d'un écoulement plus progressif des eaux vers l'exutoire

V.5. Comparaison de la simulation avec les autres types d'optimisation (Muskingum, CN et lagtime)

V.5.1. Bassin azazga

Tableau V. 7: Comparaison des débits simulés selon les types d'optimisation (Lag Time, CN, Muskingum) – Bassin d'Azazga

		Muskingum X et K	Lag times	CV	X et K ET Lag time et CN
Période de retour	Simulation	Optimisation	Optimisation	Optimisation	Optimisation
	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
2 ans	613.1	267.2	685.0	590.4	123.5
5 ans	887.4	407.5	981.1	846.8	201.1

10 ans	1065	501.4	1174.9	1012.6	251.3
20 ans	1232.4	594.3	1354.9	1172.2	314.2
50 ans	1444.6	714.7	1581.5	1374.1	395.2
100 ans	1601.4	805	1748.0	1523.4	453.3

V.5.2. Bassin versant Hamiz

Tableau V. 8: Comparaison des débits simulés selon les types d’optimisation (Lag Time, CN, Muskingum) – Bassin Hamiz

		Muskingum X et K	Lag times	CV	X et K ET Lag time et CN
Période de retour	Simulation	Optimisation	Optimisation	Optimisation	Optimisation
	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
2 ans	122	90,8	249,5	8747	15
5 ans	216.8	146,4	514,4	313,4	149,6
10 ans	277	196,1	313,4	351,6	168,8
20 ans	333.6	239,3	374,8	400	229
50 ans	402.5	304,8	445,8	359,2	260,43
100 ans	452.2	351,9	514,4	502,1	295,3

V.5.3. bassin versant Oued zeboudj

Tableau V. 9: Comparaison des débits simulés selon les types d’optimisation (Lag Time, CN, Muskingum) – Bassin Oued zeboudj

		Muskingum X et K	Lag times	CV	X et K ET Lag time et CN
Période de retour	Simulation	Optimisation	Optimisation	Optimisation	Optimisation
	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
2 ans	270.2	270.2	269,5	483,5	48

5 ans	507	188,4	499,4	332,6	121,6
10 ans	669,2	249	659,7	418,8	260
20 ans	824	314,3	817,3	505,7	269,1
50 ans	1022,5	410,2	1018	652,7	514,8
100 ans	1170,9	491,8	1167,4	790,7	1170,0

Notre objectif est la maximisation du pic de crue à des fins de calibration, d'après les résultats présentés dans les tableaux pour les trois bassins étudiés (Azazga, Hamiz et Oued zeboudj), on constate systématiquement que les valeurs de débits simulés sont quasiment identiques à celles obtenues après optimisation du lag time, avec des écarts très faibles. Cela montre que le paramètre lag time agit essentiellement sur le moment d'apparition du pic de crue et sur la forme de l'hydrogramme, sans modifier significativement la valeur maximale du débit.

Contrairement à d'autres optimisations comme celles du Muskingum X et K qui atténuent fortement les pics de crue, ou du CN (Curve Number) qui influe modérément sur le pic de débit et agit davantage sur les volumes que sur le moment ou l'intensité du pic. En revanche, l'optimisation par lag time permet de conserver un débit élevé, tout en le rendant plus cohérent avec le comportement naturel du bassin versant.

Les trois bassins étudiés confirment que le lag time est un paramètre particulièrement influent pour obtenir des simulations à la fois réalistes et hydrologiquement fiables.

V.6. Discussion générale

Tableau V. 10: les résultats des débits maximaux par HEC-HMS, optimisation du lag time et méthode de Turazza

Azazga			
Période de retour	Débit Q (m^3/s) simulation	Débits Q (m^3/s) Optimisation lag time	Débits calculé par Turraza Q (m^3/s)
2	613,1	685	563,53
5	887,4	981,1	712,27
10	1065	1174,9	1256,55
20	1232,4	1354,9	1423,33
50	1444,6	1581,5	1637,59
100	1601,4	1748	1798,03

Hamiz			
2	122	249,5	130,69
5	216.8	514,4	224,21
10	277	313,4	268,56
20	333.6	374,8	294,67
50	402.5	445,8	469,79
100	452.2	514,4	430,37
2	122	249,5	130,69
Oued zeboudj			
2	270,2	269,5	303,9
5	507	499,4	555,02
10	669,2	659,7	664,38
20	824	817,3	770,74
50	1022,5	1018	910,89
100	1170,9	1167,4	1018,19

Ce tableau ci-dessous résume les débits de pointe calculés pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans) sur plusieurs sites hydrologiques, en comparant trois méthodes d'estimation la simulation par le logiciel HEC-HMS, l'optimisation du temps de retard (lag time), et la formule empirique de Turazza.

Les résultats montrent une augmentation progressive des débits avec la période de retour, ce qui est conforme au comportement attendu des crues. Les valeurs issues de la simulation et de l'optimisation sont généralement proches, reflétant une bonne calibration du modèle. Une bonne cohérence est observée entre les débits simulés et optimisés, tandis que les valeurs issues de la méthode de Turazza montrent des écarts variables selon les sites, parfois en surestimation ou en sous-estimation, ce qui dépend en grande partie des coefficients empiriques utilisés dans la formule.

Cette comparaison met en évidence la sensibilité des estimations aux méthodes utilisées et souligne l'intérêt de croiser les approches empiriques et numériques pour obtenir des résultats fiables. Elle permet également de mieux comprendre le comportement hydrologique des bassins étudiés face aux événements pluvieux extrêmes.

V.7.Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer avec précision le comportement hydrologique des trois bassins versants étudiés. Grâce au modèle HEC-HMS, les simulations ont révélé des réponses rapides et intenses aux événements extrêmes, confirmées par la comparaison avec la formule de Turrazza. L'optimisation des paramètres, et en particulier du lag time, a permis d'améliorer la cohérence temporelle des hydrogrammes sans compromettre l'amplitude des crues.

Ces résultats valident la méthodologie choisie et confirment l'efficacité du modèle HEC-HMS comme outil d'analyse et d'aide à la décision dans la gestion des crues, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et la prévention des inondations dans les bassins méditerranéens.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans un contexte où les événements hydrométéorologiques extrêmes deviennent de plus en plus fréquents et où la gestion des ressources en eau s'impose comme une priorité stratégique, ce travail s'est attaché à évaluer et comparer deux approches d'estimation des débits de crue à l'exutoire de trois bassins versants algériens : Hamiz, Azazga et Oued Zeboudj.

L'étude a d'abord permis d'estimer les débits de pointe à l'aide de la formule empirique de Turraza, qui, bien que simple et rapide à appliquer, repose sur des hypothèses globales et ne prend pas en compte les spécificités propres à chaque bassin. En parallèle, le modèle HEC-HMS a été mis en œuvre pour simuler de manière dynamique et plus réaliste le processus pluie-débit, en intégrant les paramètres hydrologiques propres aux bassins versants étudiés. Une phase d'optimisation a permis d'ajuster finement ces paramètres afin d'améliorer la cohérence des résultats simulés.

La comparaison entre les deux approches a mis en évidence une certaine concordance générale entre les valeurs de débit simulées et celles calculées par la formule de Turraza, notamment pour certaines périodes de retour et durées de pluie. Toutefois, le modèle HEC-HMS a montré une capacité plus fine à reproduire la dynamique réelle des écoulements, à travers les formes d'hydrogrammes, les débits de pointe, et les volumes ruisselés. L'optimisation a souligné l'influence marquée de certains paramètres, notamment le Lag Time, sur le pic de crue.

En définitive, cette étude souligne la complémentarité des approches empiriques et de la modélisation. L'association des deux permet de produire des estimations plus robustes, utiles à la conception d'ouvrages hydrauliques, à l'aménagement du territoire et à la prévention des risques. La modélisation hydrologique s'impose ainsi comme un outil essentiel pour comprendre, anticiper et gérer durablement les ressources en eau, notamment dans les zones exposées aux aléas climatiques

Références Bibliographiques

- [1] B. Meriem, Etude de la performance du modèle hydrologique HBV Light appliqué au bassin versant d'Oued Louza, Tlemcen : Université Aboubakr Belkaïd, 2019-2020.
- [2] O. I. d. l'Eau, «Le bassin versant,» [En ligne]. Available: https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/png/PNG%202011/1_fiche_bv_web.pdf.
- [3] B. A. BAROUDI Zoheir, MODELISATION PLUIE-DEBIT DES SOUS BASSINS VERSANTS DE L'OUED SAIDA WILAYA DE SAIDA :APPLICATION DE MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS, Oran: Université d'Oran 02 Mohamed Ben Ahmed, 2020/2021.
- [4] F. Drici, Modélisation pluie-débit par le logiciel « HEC-HMS » du sous bassin versant de Oued El Hai (wilaya de Biskra), Mila: Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila, 2022.
- [5] Y. O. C. Sidiya, Étude hydrologique d'un bassin versant à l'aide du logiciel HEC-HMS, Alger: Université USTHB, 2013.
- [6] M. H. MEHIMDA Imane, Utilisation du SIG dans l'analyse des paramètres morphométriques et hydrographiques, SIDI BEL-ABBES: UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL-ABBES, 2020/2021.
- [7] «F2School.com,» Avril 2020. [En ligne]. Available: <https://f2school.com/wp-content/uploads/2020/04/Bassin-versant-Cours-02.pdf>.
- [8] R. Lakehal, «Université de Batna 2,» [En ligne]. Available: https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/lakehal-rida/files/ch_2_le_bassin_versant_et_son_complexe.pdf.
- [9] «Université Badji Mokhtar – Annaba,» 2023. [En ligne]. Available: https://elearning-facsct.univ-annaba.dz/pluginfile.php/7146/mod_resource/content/0/Le%20bassin%20versant2023.pdf.
- [10] S. Soltani, «Effet du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin de la Medjerda (Nord-Est Algérien),» *Revue de l'Office National de la Météorologie*, vol. 3, p. 3, 2021.
- [11] A. Khelif, Chapitre III – Les précipitations, Batna: Université de Batna 2, 2021.
- [12] B. BARIZA, ETABLISSEMENT DES COURBES IDF ET DE LA PLUIE DE PROJET POUR LE BASSIN DE GUELMA, Guelma: l'Université de Guelma, 2015.
- [13] A. Hocine, Estimation des débits de crues de différents temps de retour à l'aide de plusieurs méthodes n bassin versant MEDJEZ ELBGAR –Guelma, Annaba: UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA , 2019.
- [14] Chapitre 4 – Étude des débits de crues, Mila: Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila, 2025.
- [15] [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Azazga>.
- [16] B. A. OUKOCHIH Abderrahim, Utilisation de L'Application ARCGIS dans L'etude Des Paramètres Morphométriques Des Bassins Versants De L'Algérois :Beni Amrane,Hamiz et Keddara, Blida: Université Saad DAHLAB-BLIDA 1, 2016 - 2017.
- [17] A. Afker, «Wikimedia Commons,» 28 Mars 2014. [En ligne]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AOued_Zeboudj_%D9%88%D8%A7%D8%AF_%D8%A7%D9%84%D8%B2%D8%A8%D9%88%D8%AC_-_panoramio.jpg#Summary.
- [18] [En ligne]. Available: https://planificateur.a-contresens.net/afrique/algerie/alger/el_hamiz/2498118.html.
- [19] M. Abdelkader, MODELISATION PLUIE-DEBIT DES BASSINS VERSANTS DE L'OUED MINA : APPLICATION DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS, Oran: Université des Sciences et de la Technologies d'Oran .
- [20] [En ligne]. Available: <https://chatgpt.com/c/684f0f2b-a7ac-8004-a479-450c240e7a68>.

Références Bibliographiques

- [21] N. ELASRI, Application du Modèle Hydrologique HEC-HMS Pour la Prévission des Crues Sur le Bassin Versant de SEBAOU, Alger: ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, 2005 - 2006.
- [22] [En ligne]. Available: <https://help.autodesk.com/view/INFDS/FRA/?guid=GUID-C4440586-A317-4B7A-9C62-69264B27B91A>.
- [23] [En ligne]. Available: <https://i.origin.unimedias.fr/2020/09/16/le-cycle-de-l-eau.jpg>.
- [24] A. Abdellah, cours L2 Hydraulique, université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou.
- [25] A. Abedellah, Cours L3 hydraulique, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.