

Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE)

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

Mme YOUNCI Yasmine

Mme MEROUANE Maria

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Ouvrages et aménagements hydrauliques.**

INTITULE :

Simulation hydrodynamique de l'écoulement dans l'Oued Soummam.

Soutenu le 29 /06 /2025 devant le jury composé de :

Président : **Mr CHENAFI Azzeddine.**

Encadrant : **Mr HAMMOUCHE Abderrahmane.**

Examinateur : **Mr SELLAOUI Adel.**

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : Meronane

Prénom : Fatima

Matricule : 202033020943

Spécialité et/ou Option : OUVRAGES ET AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES

Département : d'hydraulique

Faculté : Technologie

Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Simulation hydrodynamique et
l'économie dans le cadre communautaire

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
08/01/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

Vu, pour réalisation de signalement
M 2024/2025
Pièce d'identité présentée (CNI/PC)
N° 414 601 Délivré le 03/01/2024 à l'Assassinat
par 31 Officier de l'Etat Civil
BEJAIA, LE 08 JUIL 2025
Pour l'Officier de l'Etat Civil
et par Délégation
WAHID FERDJOUKH HABIBI Achour

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/information (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom :YOUNCI.....

Prénom :YASMINA.....

Matricule : 202033020946.....

Spécialité et/ou Option: ...Génierie et aménagements Hydrauliques

Département:Hydraulique.....

Faculté:Technologie.....

Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : ...Master...

Intitulé:Simulation hydraulique de
.....établement dans l'oued Soummam.....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.



(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Remerciements

Avant toute chose, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. C'est par Sa grâce que nous avons pu franchir les différentes étapes de ce mémoire, malgré les difficultés rencontrées. Qu'Il soit loué pour nous avoir guidés, inspirés et soutenus jusqu'à l'aboutissement de ce projet.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nous remercions tout d'abord Monsieur Hammouche Abderrahmane, notre encadrant.

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur Chenafi Azzeddine, président du jury, ainsi qu'à Monsieur Sellaoui Adel, examinateur, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail.

Nous exprimons également notre reconnaissance à Monsieur Oulebsir Rafik, qui nous a accueillies au sein de son service pour effectuer notre stage de fin d'études, ainsi qu'à Messieurs Lahouari Farid et Berreksi Ali pour leur aide précieuse, leurs conseils et leur soutien.

Enfin, nous adressons nos remerciements à l'ensemble des enseignants que nous avons eus tout au long de notre parcours universitaire.

Je dédie ce modeste travail À :

Mon père, dont la présence spirituelle demeure un guide précieux. Ton amour, tes valeurs et tes encouragements imprègnent chacune de mes actions.

Ma mère, pilier indéfectible de ma vie, je dois tant à ta tendresse, ta détermination et ton soutien sans faille.

Mes cinq sœurs, Sylia, Nawal, Yasmine, Lysa et Dana, je vous remercie du fond du cœur : vos rires, vos doutes partagés et vos espoirs communs ont illuminé ce parcours. Vous êtes des sources constantes d'inspiration.

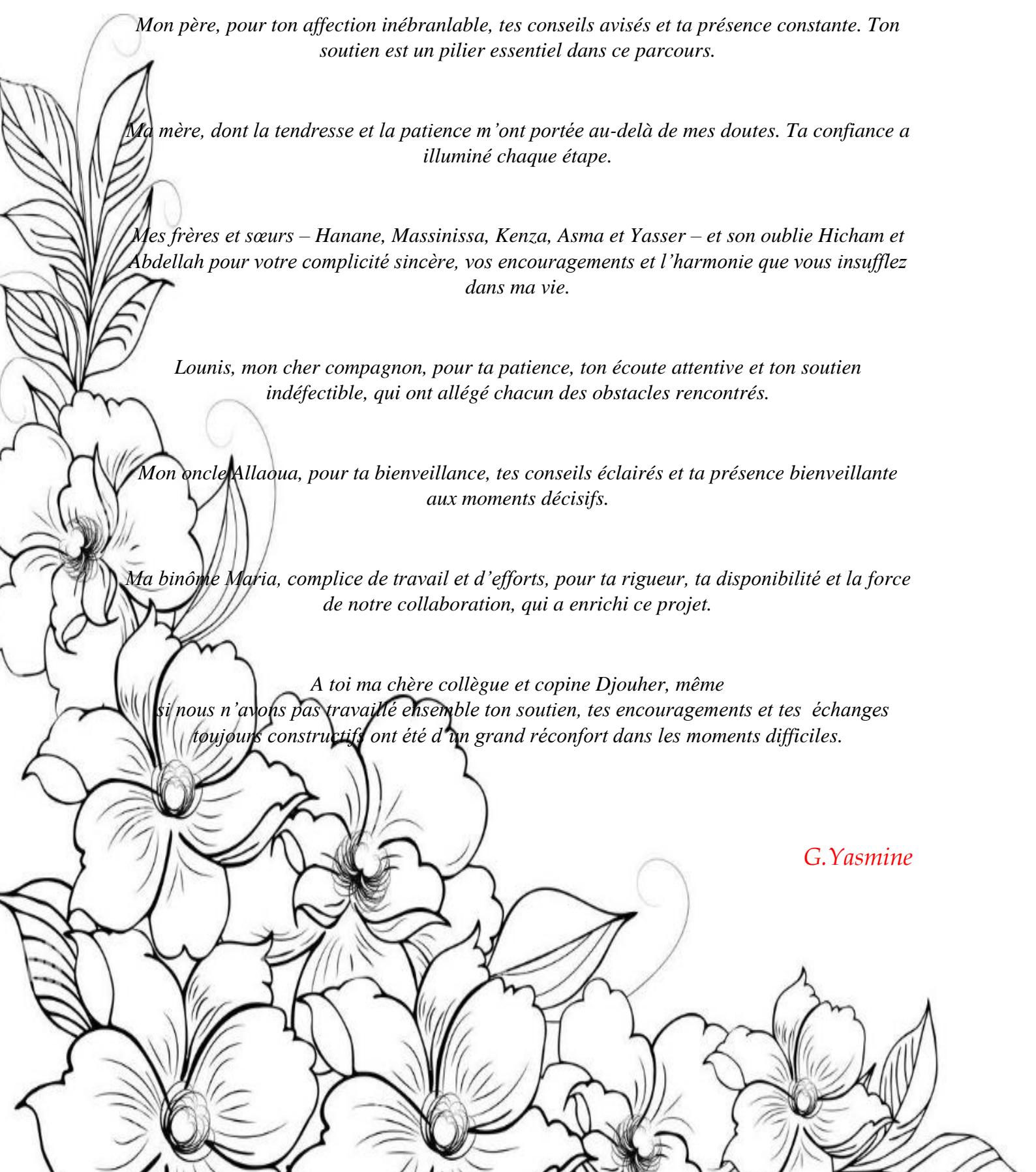
Matoub, mon cher compagnon, je suis profondément reconnaissante pour ta présence protectrice, ta patience et ton soutien éclairé dans les moments de doute. Ta confiance m'a portée plus loin que je n'aurais osé l'espérer.

Ma binôme, Yasmine Younci, partenaire de recherche et de travail acharné, pour ton écoute attentive, la pertinence de tes idées et ta persévérance. Ta présence a été précieuse et vitale.

Mon amie, Ryma, je te remercie pour ta bienveillance constante, tes encouragements sûrs et ces instants précieux de complicité qui ont su adoucir les moments de concentration intense.

Ce mémoire est le fruit de notre union des étoiles tissées ensemble dans la constellation de mes accomplissements

M.Maria



Je dédie ce modeste travail À :

Mon père, pour ton affection inébranlable, tes conseils avisés et ta présence constante. Ton soutien est un pilier essentiel dans ce parcours.

Ma mère, dont la tendresse et la patience m'ont portée au-delà de mes doutes. Ta confiance a illuminé chaque étape.

Mes frères et sœurs – Hanane, Massinissa, Kenza, Asma et Yasser – et son oublie Hicham et Abdellah pour votre complicité sincère, vos encouragements et l'harmonie que vous insufflez dans ma vie.

Lounis, mon cher compagnon, pour ta patience, ton écoute attentive et ton soutien indéfectible, qui ont allégé chacun des obstacles rencontrés.

Mon oncle Allaoua, pour ta bienveillance, tes conseils éclairés et ta présence bienveillante aux moments décisifs.

Ma binôme Maria, complice de travail et d'efforts, pour ta rigueur, ta disponibilité et la force de notre collaboration, qui a enrichi ce projet.

A toi ma chère collègue et copine Djouher, même si nous n'avons pas travaillé ensemble ton soutien, tes encouragements et tes échanges toujours constructifs ont été d'un grand réconfort dans les moments difficiles.

G.Yasmine

Table des matières

Table des Matières

Liste des symboles	I
Liste des tableaux.....	III
Liste des figures	V
Introduction générale	1
Chapitre I: Analyse des caractéristiques de la zone d'étude	
<i>I.1</i> <i>Introduction :</i>	2
<i>I.2</i> <i>Situation géographique :</i>	2
<i>I.3</i> <i>Présentation du cadre général de l'étude :</i>	3
I.3.1 Définition du bassin versant :.....	3
I.3.2 Bassin versant de la Soummam :.....	3
<i>I.4</i> <i>Situation climatique :</i>	4
<i>I.5</i> <i>La Géologie</i>	5
<i>I.6</i> <i>Les sols</i> :	6
<i>I.7</i> <i>Paramètres Physiographiques</i>	7
<i>I.8</i> <i>Caractéristiques du bassin versant de la Soummam :</i>	7
I.8.1 Caractéristiques géométriques :	7
I.8.2 Paramètres de formes :	7
I.8.2.1 Indice de compacité de GRAVELIUS KC (1914) :.....	7
I.8.2.2 Rectangle équivalent :	7
I.8.2.3 Coefficient d'allongement :.....	8
I.8.2.4 Indice de forme de Horton :	8
I.8.3 Caractéristiques du relief :.....	9
I.8.3.1 Courbe hypsométrique :.....	9
❖ Pour le bassin versant de la Soummam :.....	10
❖ Pour les sous bassins versant de la Soummam :.....	11
❖ Pour les bassins versants des trois barrages :	12
I.8.3.2 Hauteurs caractéristiques :.....	13
I.8.3.2.1 Altitudes maximale et minimale :.....	13
I.8.3.2.2 Altitude moyenne du bassin versant :	13
❖ Altitude médiane :	14
❖ Altitudes H95% et H5%	14
❖ La dénivélée	14

I.8.3.3	Pente moyenne :.....	14
I.8.3.3.1	Indice de pente moyenne « <i>Imoy</i> » :	14
I.8.3.3.2	Indice de pente globale « <i>Ig</i> » :	15
I.8.3.3.3	Pente moyenne du bassin versant :.....	15
I.8.4	Caractéristiques hydrographiques du bassin versant :.....	16
I.8.4.1	Chevelu hydrographique :	17
I.8.4.2	Densité de drainage :.....	18
I.8.4.3	Fréquence de talweds d'ordre 1 :.....	18
I.8.4.4	Coefficient de torrentialité :.....	18
I.8.4.5	Temps de concentration du bassin versant " <i>Tc</i> " :	18
I.8.4.5.1	Longueur du cours d'eau (talweg) principal " <i>Lp</i> " :	19
I.8.4.5.2	Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principal :.....	19
a.	Formule de GIANDOTTI :.....	20
b.	Formule de KIRPICH :.....	20
c.	Formule de BEFFANI A.N :	20
d.	Formule de TURAZZA-PASSINI :.....	20
e.	Formule de TEMEZ :.....	20
f.	Formule de SCS :	21
I.8.4.6	Vitesse de ruissellement :.....	21
I.9	<i>Récapitulatif des caractéristiques morpho-métriques et hydrographiques du bassins versants</i> :.....	22
❖	Pour le bassin versant et les sous bassins versants de la Soummam :.....	22
❖	Pour les bassins versant des trois barrages de la Soummam :.....	23
I.10	<i>Conclusion</i> :.....	24

CHAPITRE II : ETUDE HYDROLOGIQUE.

II.1	<i>Introduction</i> :	25
II.2	<i>Séries pluviométriques</i> :.....	25
II.2.1	Les stations pluviométriques prises :	25
II.2.2	Traitement des données pluviométriques :.....	26
II.2.3	Présentation des caractéristiques des séries pluviométriques :	27
II.2.4	Choix de la loi d'ajustement :	28
II.2.4.1	Ajustement des séries pluviométriques à la loi de Gumbel :	28
II.2.4.1.1	Test d'adéquation de la loi de Gumbel :.....	30
II.2.4.2	Ajustement des séries pluviométriques à la loi log-normale :	30

II.2.4.2.1	Test d'adéquation de la loi log-normale :.....	32
II.2.4.2.2	Comparaison des résultats d'ajustement :.....	33
II.3	<i>Pluies de courte durée :</i>	33
II.4	<i>Apport annuel :</i>	36
II.4.1	Estimation de l'apport moyen annuel :	37
II.4.1.1	Relations de COUTAGNE (1948) :.....	37
II.4.1.2	Formule de L'ANRH :	37
II.4.2	Analyse des résultats :.....	38
II.5	<i>Caractéristiques de l'écoulement :</i>	38
II.5.1	Module d'écoulement :.....	38
II.5.2	Module d'écoulement spécifique :	38
II.5.3	Lame d'eau écoulée :.....	39
II.5.4	Coefficient d'écoulement :	39
II.5.5	Coefficient de variation :.....	39
a)	Formule de l'Antonov :.....	39
b)	Formule d'OURKGUIP-ROVODKHOZ :	39
c)	Formule de SOKOLOVSKY :	39
d)	Formule de KRISTEKLÝ MENKEL :	40
II.6	<i>Transport solide :</i>	40
II.6.1	Formule de SOGREAH :.....	41
II.6.2	Formule de TIXERONT :	41
II.7	<i>Différentes méthodes d'évaluation des crues :</i>	42
II.7.1	Formule de GIANDOTTI :	42
II.7.2	Formule de MAILLET-GAUTHIER :	42
II.7.3	Formule de FULLER 2 :	42
II.7.4	Formule de SOKOLOVSKY :	43
II.7.5	Formule de l'ANARH-SOGREAH :	43
II.8	<i>Hydrogrammes de crue :</i>	45
II.9	<i>Conclusion :</i>	48

CHAP III : Simulation Hydraulique.

III.1	<i>Introduction :</i>	49
III.2	<i>Généralités sur les écoulements à surface libre :</i>	49
III.2.1	Canaux :.....	49

III.2.1.1	Canaux naturels :	49
III.2.1.2	Canaux artificiels :	49
III.2.2	Géométrie des canaux :	49
III.2.3	Type d'écoulement :	50
III.2.3.1	Variabilité dans le temps :	50
III.2.3.2	Variabilité dans l'espace :	50
III.2.4	Régime d'écoulement :	51
III.2.4.1	Nombre de Froude :	51
III.2.4.2	Nombre de Reynolds :	51
III.2.4.3	<i>Formulations de Chézy et de Manning-Strickler</i> :	52
a.	Équation de Chézy :	52
b.	Formule de Manning :	52
c.	Formule de Manning - Strickler :	52
III.3	<i>Présentation du logiciel HEC-RAS</i> :	52
III.3.1	Équations utilisées par le logiciel HEC-RAS :	53
III.3.2	Subdivision d'une section en travers pour le calcul du débit :	54
III.3.3	Mode de fonctionnement de HEC-RAS :	55
III.3.3.1	Données géométriques :	55
III.3.3.2	Données d'écoulement :	55
III.3.4	Démarche de la modélisation :	55
a)	Modélisation de la géométrie :	55
b)	Modélisation de l'écoulement :	58
c)	Lancement de la simulation :	59
d)	Visualisation des résultats :	60
e)	Résultats de la simulation :	63
III.4	Conclusion générale	65

Liste des symboles

Liste des symboles

Symbol	Définition	Unité
S	Surface	m ²
P	Périmètre	m
Lp	Longueur du Talweg principal	m
Kc	Indice de compacité	m/Km
lr	Largeur du rectangle équivalent	
Lr	Longueur du rectangle équivalent	Km
E	Coefficient d'allongement	/
Hmax	Altitude maximale	m
Hmoy	Altitude moyenne	m
Hmin	Altitude minimale	m
H50%	Médiane 50%	m
H95%	Altitude 95%	m
H5%	Altitude 5%	m
Ig	Indice de pente globale	m/Km
Ds	Dénivelé spécifique	m
Pmoy	Pente moyenne du BV	m/m
Dd	Densité de drainage	Km/Km ²
F1	Fréquence de talwegs d'ordre1	Km ⁻³
Ct	Coefficient de torrentialité	Km ²
I	Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principale	m/m
Tc	Temps de concentration	H
Vr	Vitesse de ruissellement	Km/h
m	Rang de précipitation	/
n	Taille de la série (nombre d'observations)	/
Pj.max	Pluies journalières maximales	mm
β	Exposant climatique	/
It	Intensité maximale	mm/h
Ptc	Pluie de courte durée	Mm
Le	Lame d'eau	m
Pa	Pluies annuelles	m
Pmin	Pluie minimale	m
λ	Coefficient des zones géographiques et des pluies annuelles	/
K	Paramètre de Chaumont	/
Q	Volume d'écoulement	Hm ³
qs	Débit spécifique	l/s/km ²
Pmoy	Pluie moyenne annuelle	m
Me	Module de l'écoulement	l/s
Ao	Apport moyen annuel	m ³
Ce	Module de l'écoulement spécifique	l/s/km ²
Cc	Coefficient d'écoulement	/

α	Paramètre de SOKOLOVSKY	/
Mo	Module de l'écoulement relatif	$l/s/km^2$
Es	Apport solide moyen annuel	$t/km^2.an$
Q_{max}	Débit maximum de la crue	m^3/s
C	Coefficient topographique	/
K	Paramètre régional	/
QT	Débit de pointe	m^3/s
T	Période de retour	ans
P_0	Pertes maximales	mm
H_0	Pertes initiales	mm
F	Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue	/
TB	Temps de base	h
TBO	Constante régionale	h
Q_m	Débit instantané au moment de la montée	m^3/s
Q_d	Débit instantané au moment de la décrue	m^3/s
$Q_{max-p\%}$	Débit maximum de crue (de pointe)	m^3/s
m, n	Exposant de la parabole	/
t_m	Temps de montée	h
t_d	Temps de décrue	h
CR	Paramètre de ruissellement	km^2/h
P_0	Seuil de ruissellement journalier statistique	mm
CV	Coefficient de variation	/
R_h	Rayon hydraulique	m
D_h	La profondeur hydraulique	m
I	Pente du fond du canal	m/m
J_f	Pente de la surface libre	m/m
Fr	Nombre de Froude	/
Re	Nombre de Reynolds	/
C	Coefficient de résistance selon Chezy	$m^{0.5}/s$
n	Coefficient de frottement de Manning	/
K_s	Coefficient de Manning Strickler	$m^{1/3}/s$
H_1, H_2	Profondeur de l'eau au niveau des sections	m
Z_1, Z_2	Côte du canal principal	m
α_1, α_2	Coefficient de pondération de la vitesse	/
ΔH	Perte de charge	m
S_f	La pente de la ligne d'énergie	m/m
m	Fruit du talus du canal	/
b	Largeur au radier	m
S_m	Section mouillée	m^2
P_m	Périmètre mouillée	m
K	Flux pour la subdivision	/
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
ν	Viscosité cinématique	m^2/s
μ	Viscosité dynamique	$Kg/m.s$

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Les caractéristiques géométriques du bassin versant de la Soummam.	7
Tableau I-2: Récapitulatif des paramètres de formes du sous bassin versant de la Soummam.	8
Tableau I-3 : Répartition hypsométrique du bassin versant de la Soummam.	10
Tableau I-4 : Répartition hypsométrique des sous bassins versants de la Soummam.	11
Tableau I-5 : Répartition hypsométrique des bassins versants des trois barrages.	12
Tableau I-6 : Résultats de calcul de l'altitude moyenne.	14
Tableau I-7: Classification du relief d'après O.R.S.T.O.M. (selon <i>Ig</i>).[4].....	15
Tableau : I.9 : Résultats de calcul de la pente moyenne du B.V. de la Soummam selon Carlier et Leclerc.	16
Tableau I-10 : Les longueurs des cours d'eau (des talwegs) du bassin versant de l'Oued Soummam à partir de logiciel Map-info.	18
Tableau I-11:Comparaison des résultats des formules.....	21
Tableau I-12 : Récapitulatif des caractéristiques morpho-métriques et hydrographiques du bassin versant de la Soummam et des sous bassins versants de la Soummam.	22
Tableau I-13 : Récapitulatif des caractéristiques morpho-métriques et hydrographiques des bassins versant des trois Barrages.	23
Tableau II-1 : Les différentes stations pluviométriques prises.	25
Tableau II-2 : Série des pluies maximales journalières de la station pluviométrique d'Ighil-Ali.[5]	26
Tableau II-3 : Caractéristiques des séries pluviométriques des 5 stations prises.....	27
Tableau II-4 : Les paramètres de la loi de Gumbel pour chaque station pluviométrique.	29
Tableau II-5 : Quantiles théoriques de la loi de Gumbel pour la station de Ighil Ali.	30
Tableau II-6 : Test d'adéquation de X^2 pour la loi de Gumbel sur les séries pluviométriques de chaque station.	30
Tableau II-7: Les paramètres de la loi log-normale pour chaque station pluviométrique.	31
Tableau II-8 : Quantiles théoriques de la loi log-normale pour la station d'Ighil Ali.	32
Tableau II-9: Test d'adéquation de X^2 et Shapiro-wilk pour la loi log-normale sur les séries pluviométriques de chaque station.	32
Tableau II-10:Tableau représentatif des lois statistiques choisies pour chaque station.	33
Tableau II-11 : La moyenne des pluies maximales journalières théoriques des périodes de retour pour chaque station pluviométrique.....	34
Tableau II-12 :Pluies de courte durée et intensités maximales de durée $t(h)$ et de période de retour $T(\text{ans})$ pour le B.V de sahel.	35
Tableau II-13:L'estimation des apports annuels des sous bassins versants par différentes relations.	38
Tableau II-14 : Résultats des paramètres d'écoulement pour le b.v sahel.	40
Tableau II-15 : Récapitulatif des résultats des calculs du transport solide pour le sous bassin versant de l'oued sahel.	41
Tableau II-16 : Paramètre régional dépendant du climat.	42
Tableau II-17 : Paramètre régional du relief.	43
Tableau II-18 : Valeurs du paramètre γ en fonction du type du bassin versant.	43

Tableau II-19 : Tableau récapitulatif des débits de crues de différentes périodes de retour pour le bassin versant d'oued sahel.	44
Tableau II-20 PDR (ans) SAHEL	44
Tableau II-21 : Coefficients de forme de l'hydrogramme de crue.	46
Tableau II-22 : Temps de monté et de décrue de tous les sous bassins versants.	46
Tableau II-23 : Les débits de crues du B.V. de l'Oued sahel pour les différentes périodes de retour.	46

Liste des figures

Figure I-1 : Situation géographique du bassin de la Soummam.	3
Figure I-2 : Délimitation de bassin versant de la Soummam d'après QGIS.	4
Figure I-3: Délimitation des bassins versant des trois barrages.	4
Figure I-4: Délimitation des 3 grands sous bassin versant de la Soummam.	4
Figure I-5 : Étages bioclimatiques du bassin de la Soummam.	5
Figure I-6: Carte géologique du bassin versant de la Soummam.....	5
Figure I-7: Carte des sols du bassin de la Soummam.	6
Figure I-8 : Les courbes de niveau du bassin versant de la Soummam.	9
Figure I-9 : Courbe hypsométrique en fonction du degré d'érosion associé à l'âge du bassin.	10
Figure I-10 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la Soummam.....	11
Figure I-11 Les courbes hypsométriques des 3 grands sous bassin versant de la Soummam.	12
Figure I-12 : Les courbes hypsométriques des bassins versants des trois barrages.	13
Figure I-13 : Ordre du bassin à partir de QGIS.	17
Figure I-14: Représentation schématique d'un bassin versant.....	19
Figure II-1:La situation des stations pluviométrique prises avec Google Earth.	26
Figure II-2 : Représentation graphique de l'ajustement à la loi de Gumbel pour la station d'Ighil Ali.	29
Figure II-3:Représentation graphique de l'ajustement à la loi log-normale pour la station d'Ighil Ali.	31
Figure II-4:Courbes de pluies fréquentielles pour la station pluviométrique d'Ighil Ali.....	36
Figure II-5 :Courbes d'intensité pour différentes durées et fréquences pour la station pluviométrique d'Ighil Ali.	36
Figure II-6 : L'hydrogramme de crue du bassin versant du sahel.	47
Figure III-1 : Caractéristiques géométriques d'un canal.	50
Figure III-2 : Conservation de la charge entre deux points.....	54
Figure III-3: Levé topographique de oued Soummam dans le logiciel d'AutoCAD.	56
Figure III-4:Les points topographiques (X, Y et Z) dans le logiciel COVADIS.	56
Figure III-5 : Les points topographiques dans le logiciel Global Mapper.	57
Figure III-6 : Exportation de ce fichier sous l'extension DEM vers HEC-RAS.....	57
Figure III-7 :Création d'un nouveau projet ".prj" sur HEC-RAS	58
Figure III-8: Illustration d'un profil en travers sur HEC-RAS (avant simulation).	58
Figure III-9 :Insère le nombre des débit.....	59
Figure III-10 : Les conditions aux limites de l'écoulement.	59
Figure III-11 : Insertion des défirer débit.	59
Figure III-12 : choix de régime d'écoulement mix (fluvial et torrentiel).....	60
Figure III-13 : Lancement de la simulation.....	60
Figure III-14 : Fenêtre principale du HEC-RAS et visualisation des coupes transversales....	61
Figure III-15 :illustration d'un profil en travers sur HEC-RAS (après simulation).....	61

Figure III-16 : Fenêtre principale du HEC-RAS et visualisation des profils en long.	61
Figure III-17 : Le profil en long d'Oued à l'état naturel pour les débit de 100 ans donnée par le modèle HEC-RAS.	62

Introduction générale

Introduction générale

L'analyse hydrodynamique des cours d'eau est aujourd'hui un levier essentiel pour comprendre les phénomènes naturels d'écoulement et anticiper les risques liés aux crues. Dans les régions où l'aménagement reste limité, la simulation numérique constitue une approche pertinente pour explorer le comportement hydraulique des oueds et des rivières, même en l'absence de données exhaustives ou d'infrastructures hydrauliques.

L'Oued Soummam, situé dans le nord-est algérien, traverse plusieurs communes de la wilaya de Béjaïa. Ce cours d'eau d'importance régionale se distingue par un bassin versant vaste, une topographie contrastée et un régime hydrologique influencé par des précipitations parfois intenses. Ces caractéristiques naturelles, conjuguées à la croissance urbaine en bordure du lit majeur, posent des enjeux croissants en matière de gestion des eaux et de prévention des inondations. Toutefois, dans ce travail, aucun aménagement hydraulique ni ouvrage (ponts, buses, digues) n'a été pris en compte, et les zones inondables n'ont pas été délimitées, l'objectif étant de modéliser uniquement le comportement naturel de l'écoulement.

Dans ce contexte, une question essentielle émerge : Comment peut-on analyser et simuler le comportement hydraulique naturel de l'Oued Soummam, en l'absence d'ouvrages modélisés, d'aménagements, et sans cartographie des zones inondables ? Ce mémoire vise à répondre à cette problématique en adoptant une approche progressive fondée sur l'exploitation de données géographiques, hydrologiques et numériques.

Ainsi, le travail est structuré en trois grandes parties :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude du bassin versant de la Soummam avec ses 6 sous bassins versants, avec une analyse géographique, topographique et morphologique de la zone d'étude. Cette phase s'appuie sur plusieurs outils et logiciels SIG tels que Global Mapper, Google Earth, QGIS, MapInfo, AutoCAD, Excel et d'autres traitements de données spatiales.
- Le deuxième chapitre porte sur l'étude hydrologique, visant à estimer les débits de crue pour différentes périodes de retour. Les traitements statistiques et les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel HYFRAN et de Microsoft Excel, afin de définir les apports hydriques servant d'entrée à la modélisation hydraulique.
- Le troisième chapitre est dédié à la simulation hydrodynamique de l'écoulement, effectuée avec le logiciel HEC-RAS, qui permet de modéliser l'écoulement à surface libre en régime permanent. À partir des données hydrologiques et géométriques précédemment établies, cette simulation vise à visualiser la ligne d'eau, les hauteurs et les vitesses d'écoulement dans le lit naturel de l'Oued Soummam.

Ce mémoire constitue ainsi une première étape dans la compréhension hydraulique du tronçon étudié de l'Oued Soummam. Les résultats obtenus, bien qu'établis sans prise en compte d'ouvrages ou d'aménagements, offrent une base d'analyse utile pour des études futures plus approfondies et pour la planification d'éventuelles interventions de gestion ou de protection.

Chapitre I

**Analyse des caractéristiques de la
Zone d'étude**

I.1 Introduction :

L'étude hydrologique, est un ensemble de démarches et de calculs ayant pour objectifs de bien comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant tout en identifiant ses caractéristiques morpho-métriques et hydrologiques. L'analyse des paramètres morpho-métriques permet de caractériser la géométrie et la structure physique du bassin ; qui influe sur la vitesse de ruissellement, le temps de concentration des eaux, la durée de ruissellement et enfin le régime des crues. Par ailleurs, l'analyse des paramètres hydrologiques permet d'interpréter l'écoulement des eaux dans le bassin versant.

En ce premier chapitre, on aura comme objectif de présenter la zone d'étude et de déterminer les paramètres morpho-métriques et hydrologiques du bassin de la Soummam ainsi que de ces sous bassins ; qui interviennent dans la bonne compréhension du comportement de notre bassin par rapport aux apports d'eaux principalement en période de crue.

I.2 Situation géographique : [1]

Oued Soummam, est un cours d'eau situé dans le Nord de l'Algérie, en Kabylie plus précisément dans la Wilaya de Bejaïa et à mi-chemin entre Alger et Constantine. La plaine inondable et les zones montagneuses longent la vallée de l'oued. Cette dernière connaît une forte polarisation humaine et urbaine notamment en zones de plaines où se manifeste l'essentielle population.

Notre zone d'étude s'étend :

De l'amont : à partir de la confluence de l'oued Bousselam et oued Sahel, à environ 2 Km au Sud-Ouest de l'amont d'Akbou à la longitude $4^{\circ}32'45$ Est et la latitude $36^{\circ}47'16$ Nord.

A l'aval : jusqu'à l'embouchure de la Soummam en périphérie de la ville de Bejaïa à une longitude de $4^{\circ}32'45$ Est et une latitude de $36^{\circ}47'16$ Nord.

Notre oued traverse plusieurs agglomérations, notamment Akbou, Sidi Aich, El-Kseur, et Bejaïa et reçoit plusieurs affluents causant des flots tumultueux comme en rive gauche et rive droite.

En rive gauche

- Oued Illoula situé au Nord – Ouest et à proximité de la ville d'Akbou ;
- Oued Bousselam situé au Sud-Est de la confluence avec Illoula et Sahel ;
- Oued Ighzer Amokrane situé au Nord-Est et limitrophe de l'agglomération Ighzer Amokrane Mellala ;
- Oued Roumila situé à l'Est de la ville Sidi Aich et traverse une partie cette ville et déverse dans oued Soummam ;
- Oued El-Kseur est situé au Nord –Ouest de la ville d'El-Kseur et traverse en partie le centre de l'agglomération d'El-Kseur pour rejoindre oued Soummam ;
- Oued Ghir est situé au Nord et traverse quelques agglomérations telles que Foukam et la Réunion puis déverse dans oued Soummam.

En rive droite

- Oued Seddouk situé à l'Est de d'Oued Soummam et limitrophe de l'agglomération de Seddouk et se confluence avec oued Soummam aux environs de Bled Ziguemoun ;
- Oued Immoula situé au Sud -Est du Soummam et limitrophe des agglomérations de : Himmel, Akabiou et Amssioun ;
- Oued Amizour.
- Oued Amassine.

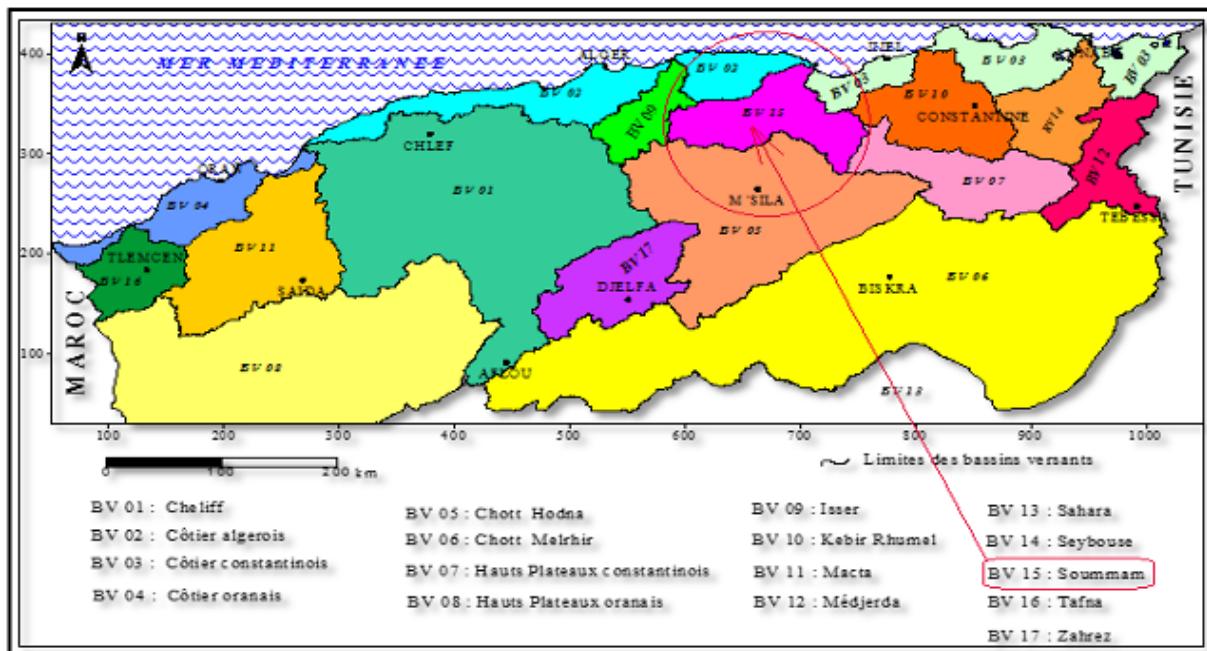


Figure I-1 : Situation géographique du bassin de la Soummam.[2]

I.3 Présentation du cadre général de l'étude :

I.3.1 Définition du bassin versant :

Un bassin versant est un territoire géographique bien défini : il correspond à l'ensemble de la surface recevant les eaux qui circulent naturellement vers un même cours d'eau ou vers une même nappe d'eau souterraine. Il se délimite par des lignes de partage des eaux entre les différents bassins. Ces lignes sont des frontières naturelles dessinées par le relief : elles correspondent aux lignes de crête. Les gouttes de pluie tombant d'un côté ou de l'autre de cette ligne de partage des eaux alimenteront deux bassins versants situés côte à côte. A l'image des poupées gigognes ; le bassin versant d'un fleuve est composé par l'assemblage des sous-bassins versants de ses affluents.

Le bassin versant est constitué d'un cours d'eau principal qui prend sa source le plus souvent sur les hauteurs en amont, au niveau de ce qu'on appelle la « tête de bassin ». Sur son chemin le cours d'eau collecte l'eau provenant de tous les points du bassin versant : l'eau de ses affluents, l'eau de la pluie ; la fonte des glaciers, l'eau d'origine souterraine... Ce cours d'eau principal s'écoule dans le fond de la vallée pour rejoindre la mer ou se jeter dans un fleuve, en aval, à l'exutoire du bassin versant. En amont du bassin se produit principalement le phénomène d'érosion et en aval, dans les zones plus calmes, les particules se déposent : c'est la sédimentation.

Chaque bassin versant est unique par sa taille, sa forme, son orientation, la densité de son réseau hydrographique, le relief, la nature du sol, l'occupation du sol (cultures, haies, forêts, plans d'eau...), son climat..., mais également l'urbanisation et les activités humaines.

I.3.2 Bassin versant de la Soummam :

Le bassin versant de la Soummam est l'un des 17 plus grands bassins hydrographiques en Algérie dont le numéro est 15 dans le répertoire de l'Agence des Barrages Hydrographiques, situé dans la partie Nord-Est de l'Algérie entre les longitudes $3^{\circ}38'$ et $5^{\circ}38'$ et $35^{\circ}45'$ et $36^{\circ}45'$ de latitude. Il est subdivisé en 10 sous bassins versants et il couvre une superficie de 9055.59 km². Le bassin de la Soummam s'étend dans les directions Nord-Est, Sud-Ouest et vers le Sud-Est. Il se compose de trois régions principales : les plateaux de Sétif, les plateaux de Bouira et les plateaux de Bordj Bou Arreridj et de la vallée de la Soummam. Il est limité au nord par les montagnes de la grande Kabylie (massif de Djurdjura), à l'est par

les montagnes de la petite Kabylie, au sud par les montagnes de Bibans et de Mansourah, au sud-est par le contrefort des monts Hodna et à l'ouest, il est limité par les cours de l'Isser, et du Sébaou. Il présente donc une forme très irrégulière, et c'est dans cela que réside toute l'originalité de ses caractères physiques nettement contrastés : en quelques dizaines de km à vol d'oiseau, on passe d'un secteur relativement plat et dénudé à un secteur montagneux à très forte pente, et d'un domaine semi-aride à un domaine humide Méditerranéen.

Dans le cadre de notre étude, nous allons nous intéresser à l'étude du bassin versant de la Soummam que nous avons subdivisé en 3 grands sous bassins (Oued Sahel, Oued Bousselam, Oued Soummam) tenant en compte 3 bassins versants de barrages se trouvant sur le grand bassin versant (Tilesdit, Ain Zada, Tichy-haf) essentiels à notre étude.

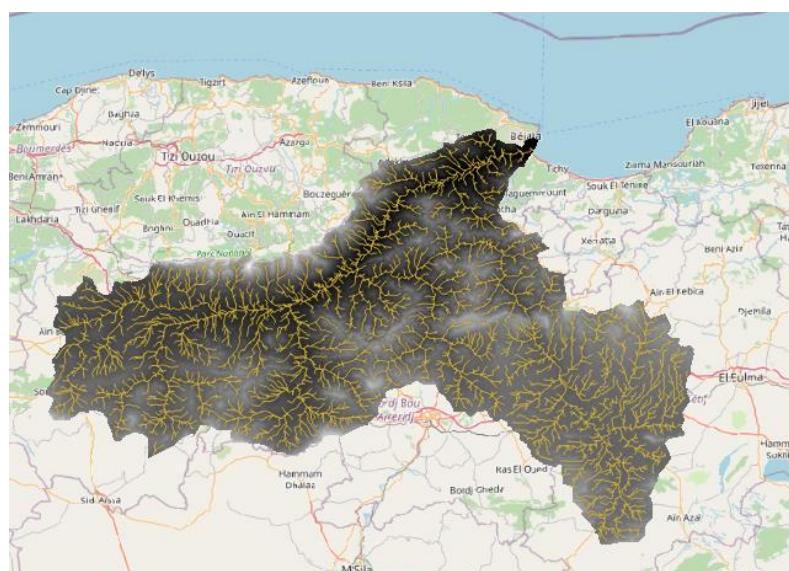


Figure I-2 : Délimitation de bassin versant de la Soummam d'après QGIS.

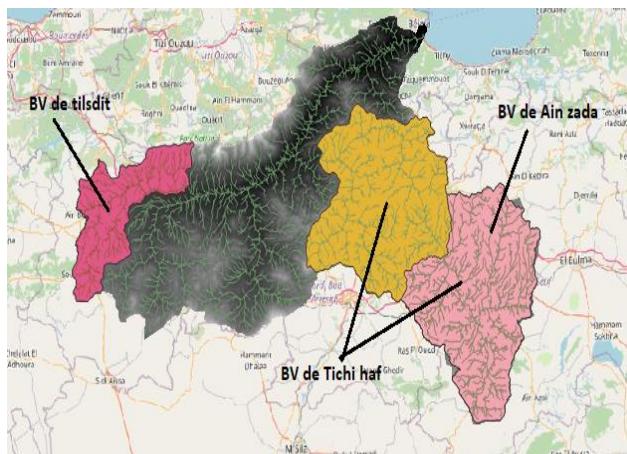


Figure I-3: Délimitation des bassins versant des trois barrages.

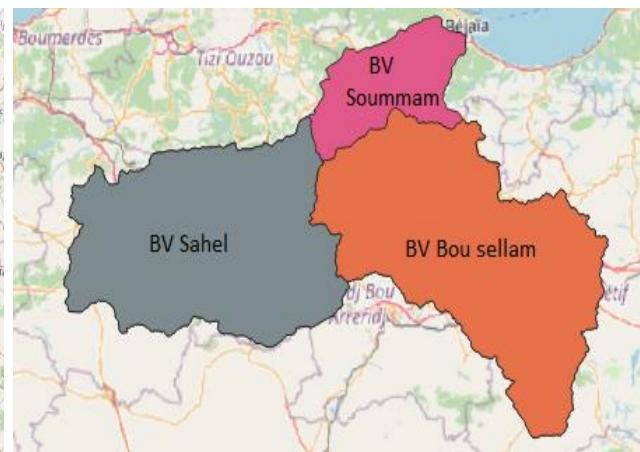


Figure I-4: Délimitation des 3 grands sous bassins versants de la Soummam.

I.4 Situation climatique :

Au niveau de Bejaïa, le climat est méditerranéen typique (hiver tempéré et été chaud). En continuant vers l'intérieur du bassin versant, les températures annuelles diminuent graduellement et le climat subit des modifications. Ceci est dû à plusieurs facteurs dont les plus remarquables sont le relief et la distance à la mer. Ces facteurs ont fait que dans certaines zones du bassin se sont créées des conditions climatiques spécifiques, comme celle de la région

de Bouira. L'étage bioclimatique dans lequel se situe le bassin versant de la Soummam correspond au climat humide dans la partie située au Nord (région de Bejaïa), le subhumide dans la vallée de la Soummam et le semi-aride sur les deux plateaux (Bouira et Sétif) à hiver froid, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers frais à froids avec des précipitations modérées, parfois sous forme de neige dans les zones d'altitude. Donc, on trouve au niveau du ce bassin versant un gradient d'aridité Nord-Sud croissant. Le nord du bassin (région de Bejaïa) a une pluvirosité annuelle élevée (757mm) qui décroît progressivement en allant vers le sud. Elle passe jusqu'à 477mm pour la région de Bouira. La température décroît graduellement aussi du nord vers le sud et avec l'altitude. Elle passe de 18°C de la station de Bejaïa aux environs de 16°C dans la station de Bouira (ZOUGGAGHE, 2010).

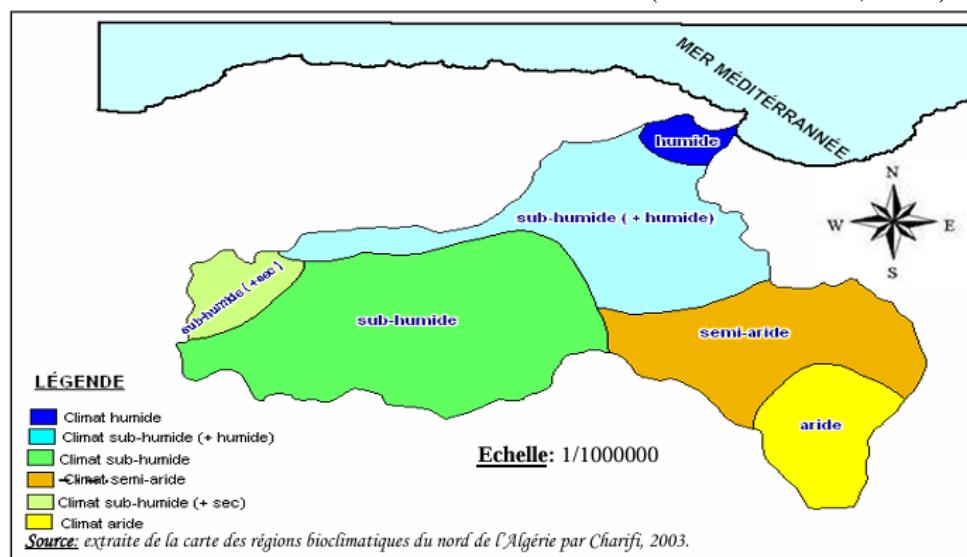


Figure I-5 : Étages bioclimatiques du bassin de la Soummam.

I.5 La Géologie : [3]

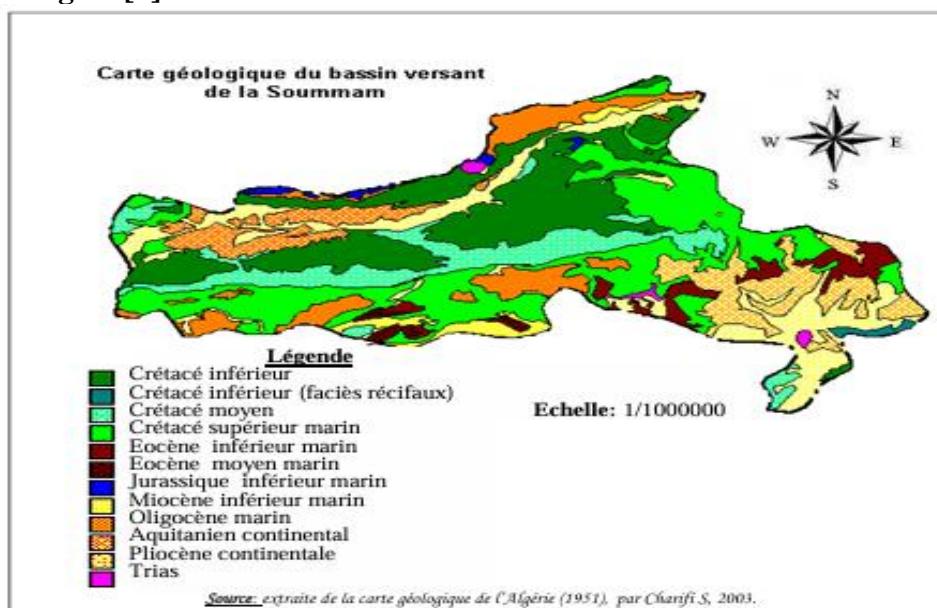


Figure I-6: Carte géologique du bassin versant de la Soummam.

La figure, représente les différentes formations géologiques de la région de la Soummam :
Les éléments de la légende :

- Le Quaternaire : représenté par des alluvions le long des oueds et au niveau des hautes plaines.
- Le Pliocène Continental : le coteau du Sahel est couronné par des graviers siliceux et fluviaux. Ailleurs, il est conglomératique sinon caillouteux.
- Le Miocène ; il s'agit essentiellement du Miocène inférieur. Il est continu depuis l'ouest de Bejaia jusqu'aux environs de Sidi-Aich. Il affleure également du côté de Dj. Mansourah sous forme de grés.
- L'Oligocène : il est généralement argilo-gréseux. Il affleure en abondance à partir de Tazmalt et de part et d'autre de la vallée de la Soummam, en allant vers l'ouest. On note également sa présence au niveau de la chaîne de Gouraya et de la région de Béni-Mansour.
- L'Eocène : il est quasiment marneux, parfois calcaro-marneux. Il affleure surtout au niveau des hautes plaines.
- Le Crétacé : se présente, en général, sous forme de flysch. Il est étendu, continu depuis la chaîne des Bibans jusqu'aux montagnes de la petite Kabylie. Le faciès est marneux au Crétacé supérieur (Sénonien). Il est schisteux, sous forme de bancs de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur avec quelques intercalations de grès au crétacé moyen (Albien) et apparaît dans la région de Béni-Mansour et la chaîne des Bibans. Il est gréso-pélitique, parfois carbonaté-gréseux au crétacé inférieur.
- Le Jurassique : il affleure surtout au niveau de la chaîne calcaire et le long de sa continuité vers l'est. Il est principalement calcaro-dolomitique.
- Le Trias : il est de faciès gypso-salin et apparaît le long de contacts anormaux (contact des nappes de charriage) dans le Tell méridional et est présenté par des conglomérats et des grés rougeâtres dans le Tell septentrional.

I.6 Les sols :[3]

La carte des sols du bassin de la Soummam a été extraite de la carte des sols de l'Algérie au 1/500.000e. La numérisation de cette carte est présentée dans la figure suivante :

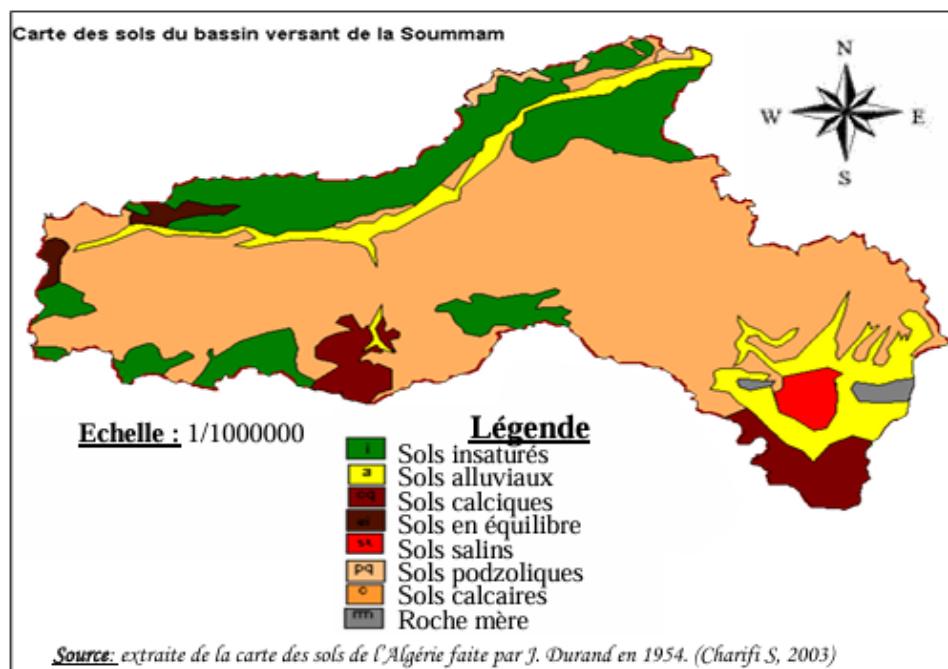


Figure I-7: Carte des sols du bassin de la Soummam.

La majorité des sols dans le bassin de la Soummam sont des sols calcaires (riches en calcaire). L'action de l'eau modifie le complexe absorbant de ces sols, de sorte qu'ils peuvent retenir une hauteur d'eau correspondant à 20% de leur capacité totale. Ces sols ont

généralement une texture légère et sont donc perméables. Lorsque les matières organiques atteignent 25%, on est en présence de la variété humifère de ces sols, qui peuvent présenter alors une texture relativement lourde allégée par la présence des matières organiques.

Au nord du bassin, on rencontre des sols insaturés qui ne contiennent pas de calcaire dont l'argile peut être plus abondante en surface qu'en profondeur ; leurs roches mères sont généralement imperméables ou donnent des produits de décomposition imperméables. Le long des oueds, les sols existants sont des dépôts alluviaux appelés sols alluviaux à profil indifférencié ou présentent une simple accumulation de matières organiques en surface. En outre on rencontre, en petites quantités, des sols calciques et des sols en équilibre peu épais, plus ou moins riches en calcaire et très pauvres en sels solubles.

I.7 Paramètres Physiographiques

La végétation du bassin versant de la Soummam est de type Méditerranéen et est très variée. Les régions alluvionnaires de la haute Soummam sont occupées par des chênaies. La basse et moyenne Soummam sont occupées par des oliveraies et des vignobles. Dans la région de la moyenne Soummam, le couvert végétal est moins dense.

I.8 Caractéristiques du bassin versant de la Soummam :

I.8.1 Caractéristiques géométriques :

Pour tout notre travail, nous avons travaillé avec différents logiciels tels que MapInfo, Global-mapper et AutoCAD, QGIS ainsi que l'application Google Earth, les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I-1 : Les caractéristiques géométriques du bassin versant de la Soummam.

Surface (Km ²)	Périmètre (Km)	Côte maximale (m)	Côte minimale (m)
9055.59	613.19	2200	0

I.8.2 Paramètres de formes :

I.8.2.1 Indice de compacité de GRAVELIUS KC (1914) :

Les hydrologues ont été tentés de caractériser la morphologie du bassin versant par des indices simples calculables. L'idée la plus simple est de comparer le bassin étudié à un bassin de forme standard. C'est ainsi que Gravelius (1861-1938), professeur à l'Université de Dresde (Allemagne), a proposé en 1914 le coefficient de compacité ("compactness coefficient") défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface (Wisler & Brater, 1959 ; Roche, 1963 ; Ward, 1975 ; OMM, 1996). Si le périmètre du bassin est noté P en (km) et sa surface S en (km²), le coefficient de compacité s'exprime par :

$$KC = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (I-1)$$

- Si : $Kc = 1$: le bassin est de forme circulaire ;
- Si : $Kc = 1.12$: le bassin a une forme carrée ;
- Si : $Kc > 1.12$: le bassin a une forme allongée.
- Pour notre bassin versant : $Kc = 1.80$; le bassin est de forme allongée.

L'indice de compacité renseigne sur la forme du bassin versant qui a une influence sur le débit de crue et donc sur l'allure de l'hydrogramme, résultant d'une pluie donnée. Plus le bassin versant est allongé, plus le temps de concentration augmente et vice-versa.

I.8.2.2 Rectangle équivalent :

La notion du rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par Roche (1963), permet de comparer facilement des bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique.

Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle.

Les formules de la longueur et de la largeur du rectangle équivalent sont données comme suit :

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

$$L = \frac{Kc * \sqrt{S}}{1.128} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right] \quad (I-3)$$

Soit :

- L et l : représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent en [Km]
- P : Le périmètre du bassin versant en [Km] ;
- S : L'aire du bassin versant en [Km²].
- Kc : Le coefficient de compacité de Gravelius.

I.8.2.3 Coefficient d'allongement :

Rapport (E) entre le plus long parcours de l'eau (L) sur un bassin versant et la racine carrée de la surface (A) de ce bassin versant :

$$E = \frac{L}{\sqrt{S}} \quad (I-4)$$

Le coefficient d'allongement conditionne la réponse d'un bassin versant à une pluie. Cette notion est utilisée explicitement dans la méthode de Caquot-Desbordes sous la forme d'un coefficient de correction du débit donné par la formule ci-dessus. Pour notre cas E= 0.23.

I.8.2.4 Indice de forme de Horton :

Il est utilisé pour prédire l'intensité de l'écoulement à l'exutoire d'un bassin versant, un facteur de forme élevé (> 0.5) indique un bassin versant de forme plutôt circulaire, et un débit de pointe élevé d'une durée relativement courte, il exprime le rapport de la surface du bassin versant à la longueur du cours d'eau (talweg) principal (Horton, 1932).

$$KH = \frac{S}{Lp^2} \quad (I-5)$$

- KH : Indice de forme de Horton adimensionnel ;
- S : Surface du bassin versant en [km²] ;
- Lp : Longueur de cours d'eau (talweg) principal en [km].
- Si KH < 1 : Bassin de forme allongée ;
- Si KH > 1 : Bassin de forme ramassée.
- Pour notre cas KH= 0.37 donc c'est un bassin versant de forme allongée.

Tableau I-2: Récapitulatif des paramètres de formes du sous bassin versant de la Soummam.

Paramètres de forme	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)	Indice de Gravelius	Lr (km)	lr (km)	Forme du BV
B.V de la Soummam	9055.59	613.19	1.8	212.37	94.23	Allongée

I.8.3 Caractéristiques du relief :

I.8.3.1 Courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique constitue un outil essentiel pour caractériser le relief d'un bassin versant. Elle représente la répartition des surfaces en fonction de l'altitude, offrant ainsi une vue d'ensemble sur la pente générale et le modelé du terrain. Cette courbe, où l'axe des abscisses correspond au pourcentage cumulé des surfaces situées au-dessus d'une altitude donnée, et l'axe des ordonnées à l'altitude. L'interprétation de sa forme renseigne sur l'évolution du relief : les bassins anciens, à topographie plane, présentent une faible variation d'altitude et un potentiel érosif réduit ; les bassins matures, proches de l'état d'équilibre, affichent un potentiel érosif modéré ; enfin, les bassins jeunes se distinguent par des pentes abruptes, une surface relativement restreinte par rapport aux variations d'altitude, et un potentiel érosif élevé.

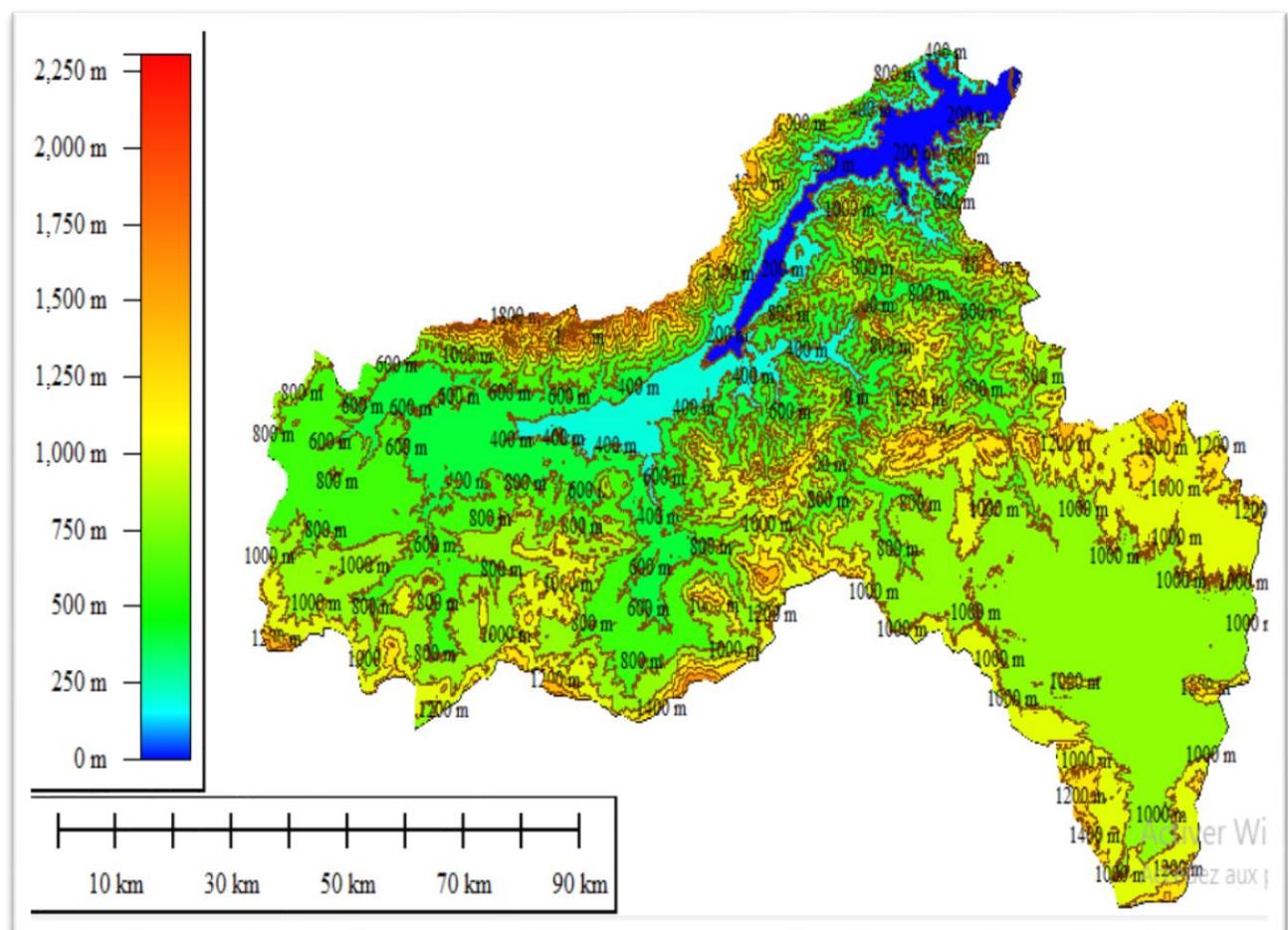


Figure I-8 : Les courbes de niveau du bassin versant de la Soummam a partir de logiciel Global-mapper.

L'interprétation de l'aspect de la courbe hypsométrique est donnée en fonction du degré d'érosion associé à l'âge du bassin (figure (I.9)) :

Remarque : Le travail a été fait pour le grand bassin de la Soummam, ses 3 grands sous bassins ainsi que pour les 3 bassins versants des barrages de la Soummam à l'aide du Logiciel QGis.

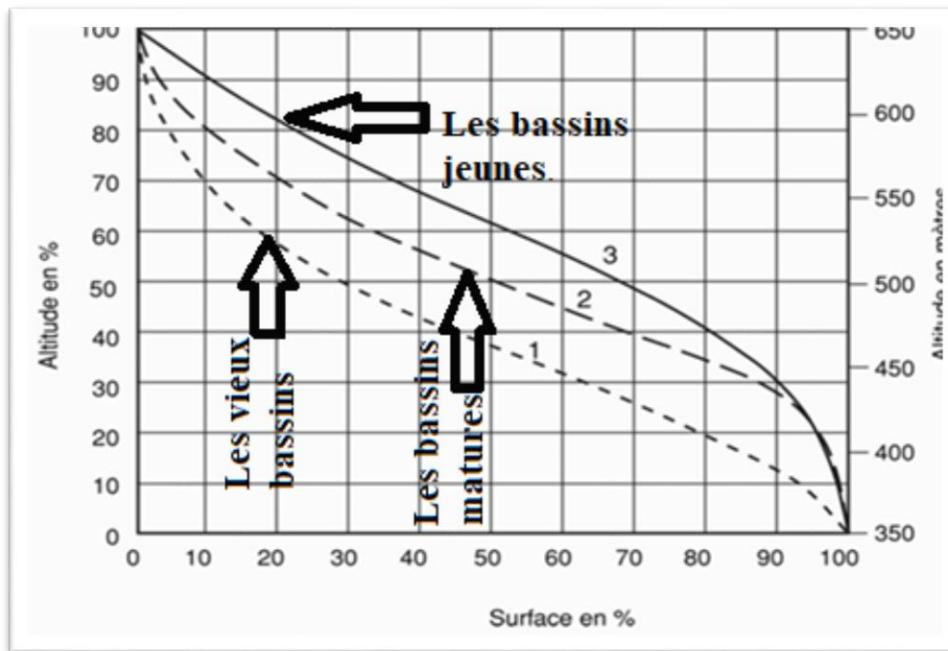


Figure I-9 : Courbe hypsométrique en fonction du degré d'érosion associé à l'âge du bassin.[4]

❖ Pour le bassin versant de la Soummam :

Tableau I-3 : Répartition hypsométrique du bassin versant de la Soummam.

N	Classe d'altitude (m)	Altitude moyenne (m)	Surface élémentaire (Km ²)	Surface élémentaire (%)	Surface cumulée (Km ²)	Surface cumulée (%)
1	—	0	282.93	3.12	9055.59	100
2	0-200	100	587.04	6.48	8772.66	96.88
3	200-400	300	1170.14	12.92	8185.62	90.39
4	400-600	500	1775.35	19.61	7015.48	77.47
5	600-800	700	3031.94	33.48	5240.13	57.87
6	800-1000	900	1589.11	17.55	2208.19	24.38
7	1000-1200	1100	440.98	4.87	619.08	6.84
8	1200-1400	1300	122.27	1.35	178.1	1.97
9	1400-1600	1500	39.75	0.44	55.83	0.62
10	1600-1800	1700	10.56	0.12	16.08	0.18
11	1800-2000	1900	5.40	0.06	5.52	0.06
12	2000-2200	2100	0.12	0.00	0.12	0.00
		Somme	9055.59	100		

La forme de la courbe hypsométrique ressemble à celle d'un vieux bassin. Donc, ce bassin versant présente une faible variation d'altitude et un potentiel érosif réduit.

❖ Pour les sous bassins versants de la Soummam :

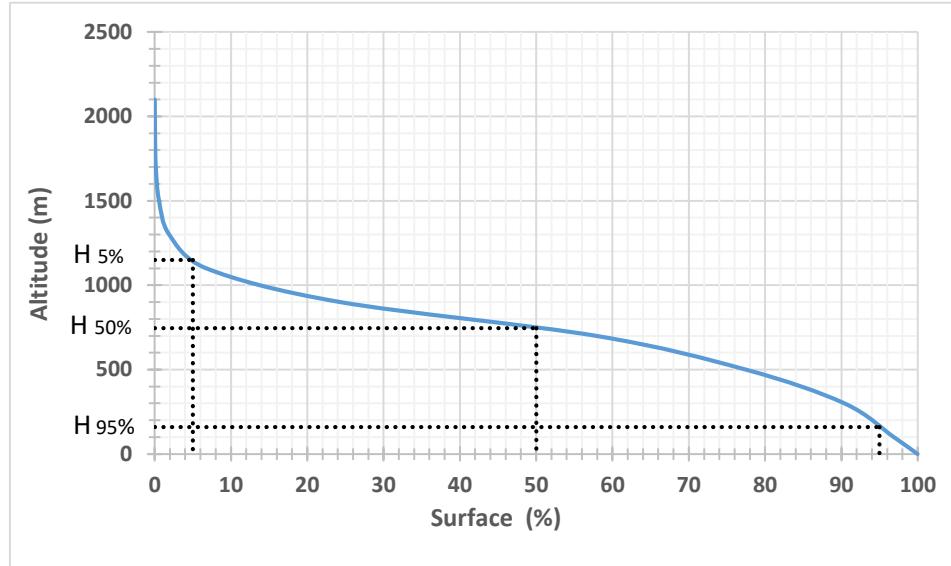


Figure I-10 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la Soummam.

Tableau I-4 : Répartition hypsométrique des sous bassins versants de la Soummam.

Altitude moyenne (m)	Surface cumulée (%)		
	SAHEL	BOUSSELAM	OUED SOUMMAM
100	100.00	-	100.00
300	99.72	100.00	75.39
500	93.51	98.22	50.73
700	73.95	92.71	32.50
900	43.64	82.81	18.92
1100	19.20	33.14	8.80
1300	6.90	7.40	3.97
1500	3.04	1.03	1.27
1700	1.23	0.10	0.02
1900	0.33		
2100	0.08		

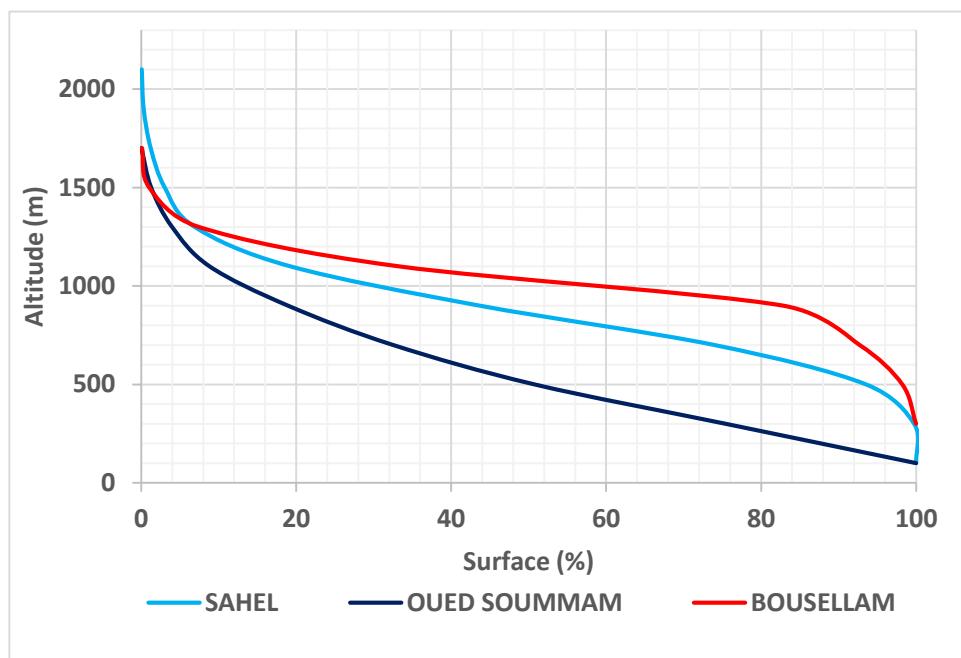


Figure I-11 *Les courbes hypsométriques des 3 grands sous bassin versant de la Soummam.*

La forme de la courbe hypsométrique de l'oued Sahel ressemble à celle d'un jeune bassin qui se distingue par des pentes abruptes, une surface relativement restreinte par rapport aux variations d'altitude, et un potentiel érosif élevé.

- La forme de la courbe hypsométrique de l'oued Bousselam ressemble à celle d'un vieux bassin. Donc, ce bassin versant présente une faible variation d'altitude et un potentiel érosif réduit.
- La forme de la courbe hypsométrique de l'oued Soummam ressemble à celle d'un bassin mature qui est proche de l'état d'équilibre et affiche un potentiel érosif modéré.

❖ **Pour les bassins versants des trois barrages :**

Tableau I-5 : Répartition hypsométrique des bassins versants des trois barrages.

Altitude moyenne (m)	surface cumulée (%)		
	Tichy-haf	Ain zada	Tilesdit
300	98.99		100.00
500	95.00		79.10
700	86.01	100.00	31.55
900	34.49	43.02	12.35
1100	7.70	8.84	5.60
1300	1.10	1.11	3.15
1500	0.10	0.19	1.46
1700			0.45
1900			0.11

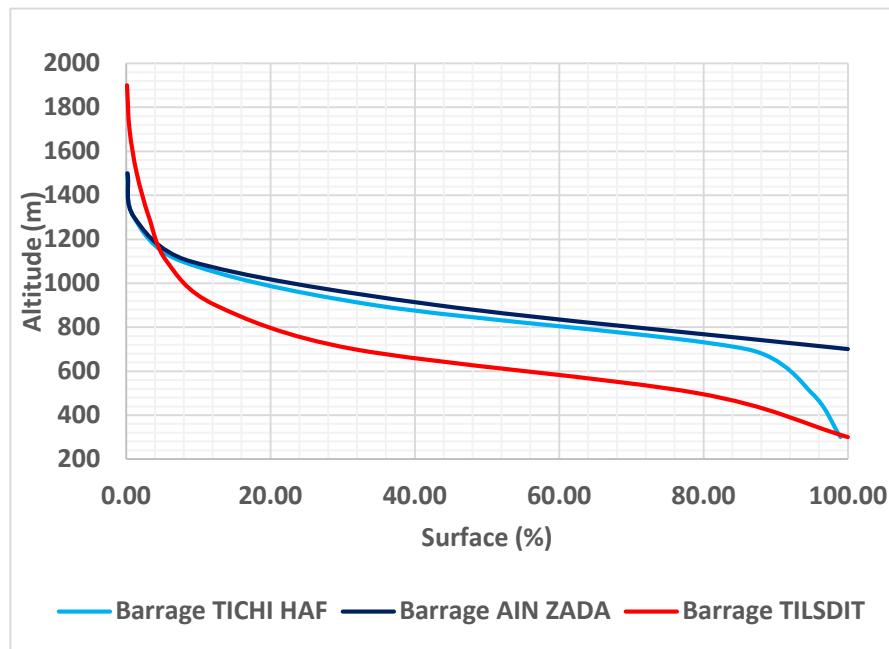


Figure I-12 : Les courbes hypsométriques des *bassins versants* des trois barrages.

La forme de la courbe hypsométrique du bassin versant du barrage de Tichy-haf ressemble à celle d'un bassin mature qui est proche de l'état d'équilibre et affiche un potentiel érosif modéré.

- La forme de la courbe hypsométrique du bassin versant du barrage de Ain Zada ressemble à celle d'un bassin mature qui est proche de l'état d'équilibre et affiche un potentiel érosif modéré.
- La forme de la courbe hypsométrique du bassin versant du barrage de Tilesdit ressemble à celle d'un jeune bassin qui se distingue par des pentes abruptes, une surface relativement restreinte par rapport aux variations d'altitude, et un potentiel érosif élevé.

I.8.3.2 Hauteurs caractéristiques :

I.8.3.2.1 Altitudes maximale et minimale :

Elles sont obtenues directement à partir de Global Mapper.

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

L'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire.

- $H_{max} = 2200\text{m}$;
- $H_{min} = 0\text{ m}$;
- $\Delta H = 2200\text{ m}$.

I.8.3.2.2 Altitude moyenne du bassin versant :

Elle reflète l'influence de la zonalité climatique verticale ; elle est parfois utilisée pour évaluer certains paramètres hydro-climatiques où la mise en place des modèles hydrologiques, et se calcule par la relation suivante :

$$Alt_{moy} = \frac{\sum [S_i * (Alt_i + Alt_{i-1})]}{2S} \quad (\text{I-6})$$

- Alt_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant [m] ;
- Alt_i : Altitude de la courbe de niveau i [m] ;
- Alt_{i-1} : Altitude de la courbe de niveau i-1 [m] ;
- S : Surface totale du bassin versant en $[Km^2]$;

- S_i : Surface partielle comprise entre deux courbes de niveau consécutives n et n-1 en $[Km^2]$.

Tableau I-6 : Résultats de calcul de l'altitude moyenne.

N	Altitude (m)	$(Alt_i + Alt_{i-1})$ (m)	Surface S_i (Km^2)	$(Alt_i + Alt_{i-1}) \times S_i$ ($m \times Km^2$)
1	2200	—	0.12	—
2	2000	4200	5.4	22680
3	1800	3800	10.56	40128
4	1600	3400	39.75	135150
5	1400	3000	122.27	366810
6	1200	2600	440.98	11465448
7	1000	2200	1589.11	3496042
8	800	1800	3031.94	5457492
9	600	1400	1775.35	2485490
10	400	1000	1170.14	1170140
11	200	600	587.04	352224
12	0	200	282.93	56586
Somme			9055.59	14729290
2S (Km^2)		18111.18	Alt_{moy} (m)	813.27

❖ Altitude médiane :

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique, cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne si la pente de la courbe est régulière.

- $H_{50\%} = 745$ m

❖ Altitudes $H_{95\%}$ et $H_{5\%}$

Les altitudes $H_{95\%}$ et $H_{5\%}$ sont obtenues depuis la courbe hypsométrique.

- $H_{95\%} = 160$ m.
- $H_{5\%} = 1150$ m.

❖ La dénivélée

La dénivélée "d" est la différence d'altitudes entre deux points de la surface terrestre, donc c'est la différence entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$. Ceci dit que 90% de la superficie s'étend entre ces altitudes.

$$d = H_{5\%} - H_{95\%} \quad (I-7)$$

- $d = 990$ m.

I.8.3.3 Pente moyenne :

Est un indice important, elle donne l'aperçu sur la topographie du bassin versant. Elle influe directement sur le temps de concentration et le débit de pointe lors d'une averse.

I.8.3.3.1 Indice de pente moyenne « I_{moy} » :

C'est le rapport entre la différence ($H_{max} - H_{min}$) et la longueur Le du rectangle équivalent, il est exprimé en mètre de dénivélée par Km de longueur.

$$I_{moy} = \frac{\Delta h}{L_e} \quad (I-8)$$

- I_{moy} : Indice de pente moyenne en [m/km] ;
- Δh : Dénivelée totale ($H_{max} - H_{min}$) en [m] ;
- L_e : Longueur du rectangle équivalent en [km].

- $I_{moy} = 10.36$ m/km.

I.8.3.3.2 Indice de pente globale « I_g » :

Il est donné par le rapport de la dénivelée utile (d) ; estimée à partir de la courbe hypsométrique ; à la longueur du rectangle équivalent (L_e)

$$I_g = \frac{d}{L_e} \quad (I-9)$$

- I_g : Indice de pente globale en [m/km] ;
- d : Dénivelée entre les altitudes en [m], elle est déterminée à partir de la courbe hypsométrique.
- Tel que : $d = H_{5\%} - H_{95\%}$;
- L_e : Longueur du rectangle équivalent en [km]

- $I_g = 4.66$ m/km.
-

Tableau I-7: Classification du relief d'après O.R.S.T.O.M. (selon I_g).[5]

Classe de relief	Type de relief	I_g (m/km)
R1	Très faible	< 2
R2	Faible	2 - 5
R3	Assez faible	5 - 10
R4	Modéré	10 - 20
R5	Assez fort	20 - 50
R6	Fort	50 - 100
R7	Très fort	>100

La pente globale nous donne un relief faible ce qui signifie que, dans l'ensemble, le bassin versant présente des pentes douces et des variations d'altitudes moins prononcées.

I.8.3.3.3 Pente moyenne du bassin versant :

Diverses méthodes ont été élaborées pour estimer la pente moyenne d'un bassin versant, généralement à partir d'une carte topographique, qu'elle soit précise ou approximative. La méthode proposée par Carlier et Leclerc (1964) consiste à calculer une moyenne pondérée des pentes des surfaces élémentaires situées entre deux courbes de niveau. Une approximation de la pente moyenne peut alors être obtenue grâce à la formule suivante :

$$P_{moy} = \frac{L_{cn} \times \Delta h}{S} \quad (I-10)$$

- P_{moy} : Pente moyenne [m/km] ;
- L_{cn} : Longueur totale des courbes de niveau [km] ;
- Δh : Équidistance entre deux courbes de niveau [m] ;
- S : Surface du bassin versant

La pente est une caractéristique essentielle de la topographie d'un bassin. Elle est souvent utilisée comme une variable indépendante, car elle donne une bonne indication du temps de

concentration du ruissellement direct (temps noté " T_c ") et influence également le débit de pointe généré par une averse.

Aujourd'hui, le calcul de la pente moyenne est souvent automatisé à l'aide de données numériques issues de modèles numériques de terrain (MNT). Ces outils permettent une estimation rapide et fiable de la pente à partir des données disponibles et des méthodes associées. Elle est ensuite déterminée dans le tableau suivant :

Tableau : I.8 : Résultats de calcul de la pente moyenne du B.V. de la Soummam selon Carlier et Leclerc.

N°	Courbes de niveaux (m)	L_{cn} (km)
1	0	4.35
2	200	385.50
3	400	831.65
4	600	1632.06
5	800	2087.01
6	1000	2440.30
7	1200	1035.86
8	1400	328.23
9	1600	117.81
10	1800	44.82
11	2000	16.87
12	2200	1.26
L_{cn} (km)		8925.72
S (Bassin versant) (km ²)		9055.59
Δh (Équidistance) (m)		200.00
P_{moy} (Carlier et Leclerc) (m/km)		197.13

La pente moyenne trouvée, nous indique une inclinaison générale relativement importante du terrain. Elle suggère que les eaux de ruissellement s'écoulent rapidement à travers le bassin, ce qui peut contribuer à des temps de concentration courts et une réponse hydrologique vive lors des épisodes de pluie. Il est probable que cette forte pente influence également l'intensité de l'érosion dans le bassin et la dynamique des crues, en favorisant des montées rapides des eaux.

I.8.4 Caractéristiques hydrographiques du bassin versant :

Le réseau hydrographique désigne l'ensemble des cours d'eau, qu'ils soient naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, assurant le drainage des eaux vers l'exutoire d'un bassin versant. La caractérisation de ce réseau repose sur la détermination de plusieurs paramètres hydro-géomorphologies, dont la hiérarchisation des tronçons fluviaux. Cette hiérarchisation est réalisée à l'aide d'un système de numérotation attribué à chaque segment du réseau en fonction de son importance relative. Dans le cadre de cette étude, l'analyse du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Soummam a été effectuée à partir de données topographiques, en utilisant le logiciel QGIS.

Le bassin versant de l'Oued Soummam présente une structure hydrographique dense et bien développée. Il est constitué de trois principales rivières formant l'ossature du réseau : l'oued Sahel, affluent provenant du nord-ouest ; l'oued Bousselam, affluent issu du sud-est ; et l'oued Soummam, cours d'eau principal résultant de la confluence du Sahel et du Bousselam à Akbou. L'oued Soummam s'écoule ensuite en direction du nord-est, se jetant finalement dans la mer Méditerranée

I.8.4.1 Chevelu hydrographique :

De nombreuses études se sont intéressées à la classification des cours d'eau d'un réseau hydrographique, dans le but de donner une information synthétique de la morphologie du bassin d'alimentation. Plusieurs classifications ont été proposées dont les deux plus usuelles sont celles de Horton (1945) et de Strahler (1952). Ces deux classifications utilisent le terme de bief, qui correspond à la fraction du réseau hydrographique comprise soit entre deux confluences soit entre une source et une confluence. Le bief est dit bief intérieur dans le premier cas et bief extérieur s'il est issu d'une source. Comme la classification de Horton (1945) se définit par des règles d'indexation des biefs à partir de la notion de cours d'eau le plus long, on lui préfère la classification de Strahler 1952) régie par les trois règles suivantes (figure I.13)

Tout bief sans affluent est d'ordre 1.

Quand deux biefs d'ordre i et j différents ; avec $i > j$; convergent, le bief aval est d'ordre i

Quand deux biefs de même ordre i convergent, le bief aval est d'ordre $i+1$.

A partir du QGIS, nous avions trouvé que le bassin versant de la Soummam est d'ordre 7 comme la figure ci-dessous le démontre.

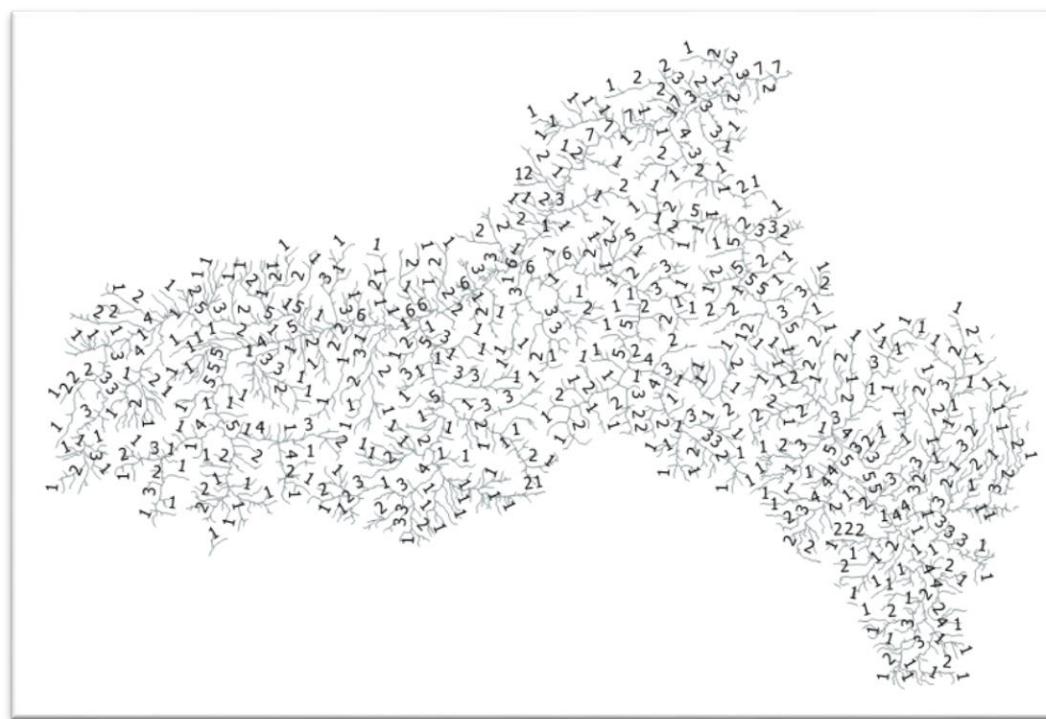


Figure I-3 : Ordre du bassin à partir de QGIS.

Les valeurs de nombres et de longueurs, pour différents talwegs classifiés par leurs ordres sont tirées à partir du logiciel MapInfo, sont figurées dans le tableau suivant :

Tableau I-9 : Les longueurs des cours d'eau (des talwags) du bassin versant de l'Oued Soummam à partir de logiciel Map-info.

Ordre	1	2	3	4	5	6	7	La somme
Nombres des chevelu	1650.00	758.00	432.00	1129.00	182.00	59.00	69.00	4279.00
Longueur (km)	2869.97	1389.41	725.70	199.05	263.71	86.63	91.80	5626.27

I.8.4.2 Densité de drainage :

Le drainage du bassin est habituellement caractérisé par la densité de drainage, définie comme le rapport entre la longueur cumulée des drains du bassin et sa superficie.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (I-11)$$

- D_d : Densité du drainage en [km/km²] ;
- L_i : Longueur de talweg i en [km] ;
- S : Surface du bassin versant en [km²] ;
- $D_d = 0.62$ km/km².

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. Plus sa valeur est élevée plus elle traduit l'existence de terrains impériaux favorisant le ruissellement. En pratique, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé ; elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Selon Schumm, la valeur inverse de la densité de drainage, $C=1/D_d$, s'appelle « constante de stabilité du cours d'eau ».

Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau).

I.8.4.3 Fréquence de talwags d'ordre 1 :

La fréquence de talwags d'ordre 1 est le rapport de nombre de talwags d'ordre 1 à la surface. Elle est exprimée par la relation :

$$F_1 = \frac{N_1}{S} \quad (I-12)$$

- F_1 : Fréquence des talwags d'ordre 1 ;
- N_1 : Nombre de talwags d'ordre 1 ;
- S : Surface du bassin versant en [km²] ;
- $F_1 = 0.18$ km⁻²

I.8.4.4 Coefficient de torrentialité :

Il désigne le produit de la densité de drainage par la fréquence de cours d'eau (talwags) d'ordre élémentaire (d'ordre 1). Il se calcule comme suit :

$$Ct = Dd \times F_1 \quad (I-13)$$

- Ct : Coefficient de torrentialité [Km⁻³] ;
- Dd : Densité de drainage en [km/km²] ;
- F_1 : Fréquence des talwags d'ordre 1 ;
- $Ct = 0.11$ km⁻³

I.8.4.5 Temps de concentration du bassin versant " Tc" :

Sur un bassin versant, temps mis par l'eau pour parcourir la distance entre le point le plus éloigné de l'exutoire et ce dernier (Figure I.14).

Pour l'estimation du temps de concentration des bassins-versants ruraux ou naturels, les bureaux d'études recourent généralement à un grand nombre de formulations, telles que, par exemple, celles de GIANDOTTI, de TURAZZA-PASSINI, de VENTURA, de BEFFANI A.N, de KIRPICH, de TEMEZ, de la méthode SCS, etc. La grande disparité des résultats sur lesquels débouchent ces méthodes les conduit alors souvent à en faire une moyenne (moyenne dont ne sont généralement même pas écartées les valeurs les plus extrêmes, très faibles et/ou très fortes), qui servira ensuite à calculer l'intensité permettant la détermination du débit de pointe Q_p .

Nous allons opter pour les formulations qui ne font pas intervenir les caractéristiques de la pluviométrie.

- Le temps de concentration est le temps nécessaire pour aller de ce point jusqu'à l'exutoire.

I.8.4.5.1 Longueur du cours d'eau (talweg) principal " L_p " :

Est représentée par la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

La longueur totale du cours d'eau principal (talweg) " L_p " est obtenue à l'aide du logiciel AutoCAD.

$$L_p = 157.04 \text{ km.}$$

I.8.4.5.2 Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principal :

La pente moyenne du cours d'eau (talweg) détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infilttrer, entièrement ou en partie, dans le sol.

Le calcul des pentes moyennes et partielles des cours d'eau repose sur l'analyse du profil longitudinal du cours d'eau principal ainsi que ses affluents. La méthode la plus couramment employée pour déterminer la pente longitudinale consiste à rapporter la différence d'altitude entre les deux extrémités du cours d'eau à sa longueur totale.

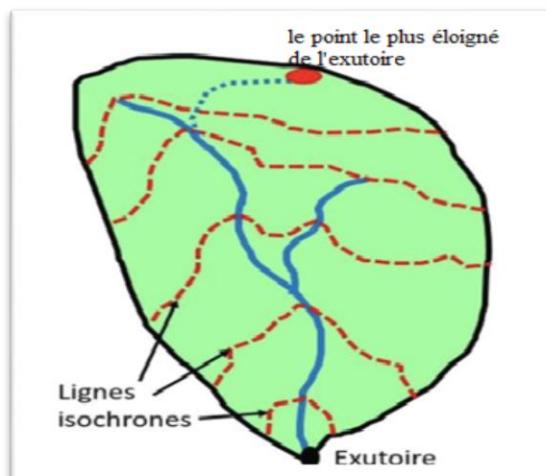


Figure I-14: Représentation schématique d'un bassin versant.

$$I = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_p} \quad (I-14)$$

- $I = 0.01 \text{ m/m}$.
- Plusieurs formules sont utilisées pour calculer le temps de concentration, parmi lesquelles on trouve :

a. Formule de GIANDOTTI :

Cette relation a été développée en 1937, elle est exprimée par la formule :

$$T_c = \frac{a * \sqrt{S} + b * L_p}{C * \sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (I-15)$$

- $a = 4$; $b = 1.5$; $c = 0.8$ (pour les grands et moyens bassins d'Afrique du Nord) ;
- T_c : Temps de concentration [h] ;
- S : Surface du bassin versant [km^2] ;
- L_p : Longueur du cours d'eau (talweg) principal [km] ;
- H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant [m] ;
- H_{min} : Altitude minimale du bassin versant [m].

- $T_c = 27.02 \text{ h}$.

b. Formule de KIRPICH :

$$T_c = \frac{0.0195}{60} * L_p^{0.77} * I^{-0.385} \quad (I-16)$$

- T_c : Temps de concentration [h] ;
- L_p : Longueur du cours d'eau (talweg) principal [m] ;
- I : Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principal [m/m] ;

- $T_c = 16.85 \text{ h}$.

c. Formule de BEFFANI A.N :

$$T_c = \frac{L_p}{0.75 * S^{1/5} * I^{1/3}} \quad (I-17)$$

- T_c : Temps de concentration [h] ;
- L_p : Longueur du cours d'eau (talweg) principal [km] ;
- S : Surface du bassin versant [km^2] ;
- I : Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principal [m/km] ;

- $T_c = 14.04 \text{ h}$.

d. Formule de TURAZZA-PASSINI :

$$T_c = \frac{6.48}{60} * \frac{\sqrt[3]{S * L_p}}{\sqrt{I}} \quad (I-18)$$

- T_c : Temps de concentration [h] ;
- S : Surface du bassin versant [km^2] ;
- L_p : Longueur du cours d'eau (talweg) principal [km] ;
- I : Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principal [%] ;

- $T_c = 10.264 \text{ h}$.

e. Formule de TEMEZ :

$$T_c = 0.3 * \left(\frac{L_p}{I^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (I-19)$$

- T_c : Temps de concentration [h] ;
- L_p : Longueur du cours d'eau (talweg) principal [km] ;

- I : Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principal [m/m] ;

- $T_c = 31.50$ h

f. Formule de SCS :

$$T_c = (0.868 * \frac{L_p^2}{I})^{0.385} \quad (I-20)$$

- T_c : Temps de concentration [h] ;

- L_p : Longueur du cours d'eau (talweg) principal [km] ;

- I : Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principal [%] ;

• $T_c = 16.82$ h

Le comparatif des résultats de différentes formules de tous les bassins versants sont insérés dans le tableau suivant :

Tableau I-10:Comparaison des résultats des formules.

TC (h)	Sahel	Bousselam	Oued Soummam	SOUMMAM	Tilesdit	Ain zada	Tichy-haf
GIANDOTI	25.41	32.59	18.41	27.02	12.8	23.57	17.19
KIRPICHE	7.79	17.38	8.64	16.84	5.58	7.3	13.24
BIFFANI	6.88	16.17	9.41	14.04	6.11	6.48	12.13
TURAZZA	4.39	8.97	3.47	10.26	2.23	4.24	7.02
TEMEZ	16.7	30.52	17.17	31.5	12.19	13.94	24.82
SCS	7.78	17.36	8.63	16.82	5.57	7.29	13.23
Moyenne des trois formules	7.48	16.97	8.89	15.9	5.76	7.02	12.87

Pour l'estimation du temps de concentration de chaque sous bassin versant, on a opté pour la moyenne de ces 3 formules : KIRPICHE, BIFFANI, SCS. Ces formules nous ont donné des résultats proches, qu'on peut considérer comme fiables pour mener à bien notre étude.

I.8.4.6 Vitesse de ruissellement :

C'est l'écoulement par gravité à la surface du sol, suivant la pente du terrain, et dans le micro réseau hydrographique, des eaux météoriques qui ont échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage superficiel.

Pour notre bassin versant de la Soummam, la vitesse de ruissellement " V_r " s'exprime par la formule :

$$V_r = \frac{L_p}{T_c} \quad (I-21)$$

- V_r : la vitesse du ruissellement [km/h]
- L_p : Longueur du cours d'eau (talweg) principal [Km] ;
- T_c : Temps de concentration [h] ;
- $V_r = 7.25$ km/h ou (2.01 m/s).

I.9 Récapitulatif des caractéristiques morpho-métriques et hydrographiques des bassins versants :

❖ Pour le bassin versant et les sous bassins versants de la Soummam :

Tableau I-11 : Récapitulatif des caractéristiques morpho-métriques et hydrographiques du bassin versant de la Soummam et des sous bassins versants de la Soummam.

Désignation	Symbole	Unité	Les sous B.V. de la Soummam			B.V SOUMMAM
			Sahel	Bousselam	Oued Soummam	
Superficie	S	km ²	3752.39	4175.56	1101.25	9055.59
Périmètre	P	km	318.97	346.84	173.69	613.19
Longueur du Talweg principale	Lp	km	80.55	138.80	75.75	157.04
Indice de compacité	Kc		1.46	1.50	1.47	1.80
Rectangle équivalent	Longueur	km	129.34	142.99	70.64	271.01
	Largeur	km	29.01	29.20	15.59	33.41
Altitudes	maximale	m	2200	1600	1600	2200
	moyenne	m	323.87	520.48	479.86	812.62
	minimale	m	0	200	200	0
	5%	m	1350	1220	1250	1150
	50%	m	850	940	500	745
	95%	m	470	515	130	160
Indice de pente globale	Ig	m/km	6.80	4.93	15.85	3.65
Indice de pente moyenne	Imoy	m/km	17.01	9.79	19.82	8.12
Pente moyenne de B.V.	Pmoy	m/km	196.43	188.48	257.49	197.13
Densité de drainage	Dd	km/km ²	0.60	0.63	0.57	0.62
Fréquence de talwegs d'ordre 1	F1	km ²	0.17	0.18	0.18	0.18
Coefficient de torrentialité	Ct	km ⁻³	0.10	0.11	0.10	0.11
Pente moyenne du cours d'eau principale	I	m/m	0.03	0.01	0.02	0.01
Temps de concentration	Tc	h	7.48	16.97	8.89	15.90
Vitesse de ruissèlement	Vr	m/s	10.76	8.18	8.52	9.88

❖ Pour les bassins versant des trois barrages de la Soummam :

Les mêmes calculs que nous avions fait pour le bassin de la Soummam et ces 3 grands sous bassins, nous les avons refaits pour les bassins des 3 barrages et avons rassemblé le tout dans ce tableau :

Tableau I-12 : Récapitulatif des caractéristiques morpho-métriques et hydrographiques des bassins versant des trois Barrages.

Désignation	Symbole	Unité	Les B.V. des barragères		
			Tilesdit	Ain zada	Tichy-haf
Superficie	S	km ²	824.89	1990.37	3941.53
Périmètre	P	km	179.60	222.54	342.87
Longueur du Talweg principale	Lp	km	54.26	54.37	114.68
Indice de compacité	Kc		1.75	1.40	1.53
Rectangle équivalent	Longueur	km	78.68	87.81	142.57
	Largeur	km	10.48	22.67	27.84
Altitudes	Maximale	m	2000	1600	1600
	Moyenne	m	767.57	990.19	946.78
	Minimale	m	400	800	0
	5%	m	1350	1350	1350
	50%	m	810	1070	1040
	95%	m	575	905	700
Indice de pente globale	Ig	m/km	9.85	5.07	4.56
Indice de pente moyenne	Imoy	m/km	20.34	9.11	11.22
Pente moyenne de B.V.	Pmoy	m/km	161.64	110.28	179.44
Densité de drainage	Dd	km/km ²	0.64	0.70	0.63
Fréquence de talwegs d'ordre 1	F1	km ²	0.17	0.18	0.18
Coefficient de torrentialité	Ct	km ⁻³	0.11	0.13	0.11
Pente moyenne du cours d'eau principale	I	m/m	0.03	0.01	0.01
Temps de concentration	Tc	h	5.76	7.02	12.87
Vitesse de ruissèlement	Vr	m/s	9.43	7.74	8.91

I.10 Conclusion :

Dans le cadre de clôturer ce présent chapitre, traitant les caractéristiques du grand bassin versant de la Soummam avec les subdivisions auxquelles nous avions eu recours pour une bonne analyse hydrologique. En effet, ces caractéristiques peuvent être utilisées pour une prévention hydrologique surtout dans les temps actuels marqués par les changements climatiques. Nous avions pu tirer les caractéristiques morpho-métriques et hydrologiques de chaque subdivision en se servant du logiciel QGIS et MapInfo, et avions parlé sur la situation climatique, la géologie, types des sols et le couvert végétal de la région.

La situation climatique du grand bassin versant de la Soummam qui indique une variation significative du climat, passant d'un climat humide avec une pluviosité annuelle de 757mm dans la région de Béjaïa à un climat semi-aride avec 477mm à Bouira. La diversité géologique et pédologique, avec une prédominance de sols calcaires, contribue également à la complexité du comportement hydrologique.

L'analyse des paramètres morphométriques de notre bassin versant de la Soummam qui se situe au Nord-Est de l'Algérie d'une étendue de 9055.57 km² a révélé une forme allongée du bassin (Indice de compacité de Gravelius =1.80), une altitude variant de 0m à 2200m, un indice de pente globale, reflétant un relief faible qui influence significativement la dynamique de l'écoulement des eaux, et un temps de concentration de 21.65 h. L'analyse de drainage a révélé que le réseau hydrographique de la zone d'étude est d'ordre 7 selon la classification de Strahler avec une densité de drainage de 0.62 km/km².

Les résultats obtenus peuvent nous servir à bien mener notre travail et nous permettre de modéliser le fonctionnement hydrologique de notre bassin avec tous ses sous bassins versants.

Chapitre II

ETUDE HYDROLOGIQUE

II.1 Introduction :

L'hydrologie est une science qui étudie le cycle de l'eau, sa répartition, sa circulation à la surface et dans les sous-sols, ainsi que ses interactions avec les milieux naturels et les activités humaines. Elle constitue un domaine essentiel pour la gestion durable des ressources en eau, la prévention des risques hydrologiques (comme les crues ou les sécheresses), et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Parmi les paramètres fondamentaux de l'hydrologie, la pluviométrie occupe une place centrale. Elle permet de mesurer et d'analyser les précipitations, en particulier leurs moyennes interannuelles, leur répartition mensuelle et les intensités maximales journalières. Ces données sont indispensables pour estimer les apports en eau, évaluer les débits de crue, modéliser les écoulements.

La qualité de l'analyse pluviométrique dépend des données disponibles : elles peuvent être représentatives, partiellement fiables, ou inexistantes selon les sites. En fonction de cette disponibilité, différentes méthodes sont utilisées, comme les relations empiriques, les modèles hydrologiques ou l'analogie avec d'autres bassins similaires.

L'étude de la pluviométrie permet de mieux comprendre le fonctionnement des bassins versants, et d'analyser les processus de transport solide. Elle constitue ainsi une base incontournable dans toute démarche hydrologique rigoureuse.

II.2 Séries pluviométriques :

Dans notre projet d'étude, l'analyse des données pluviométriques disponibles est la première étape à considérer. Pour notre cas, notre analyse s'est basée sur l'étude des données enregistrées au niveau de 5 stations pluviométriques représentatives pour chaque bassin versant auxquelles nous avions eu accès.

II.2.1 Les stations pluviométriques prises :

Tableau II-1 : Les différentes stations pluviométriques prises.

Bassin versant	Nom de la station	Code de la station	Années d'observations
Oued Sahel	IGHIL ALI	15 05 03	1967-1990
Oued Soummam	AEROPORT	15 10 -	1987-2011
Oued Bousselam	BOUBIREK	15 07 03	1968-2000
Barrage Tichy-Haf			
Barrage Ain Zada	BOUIRA COLOGNY	15 06 08	1911-1998
Barrage Tilesdit	BOUIRA	15 01 05	1904-1978

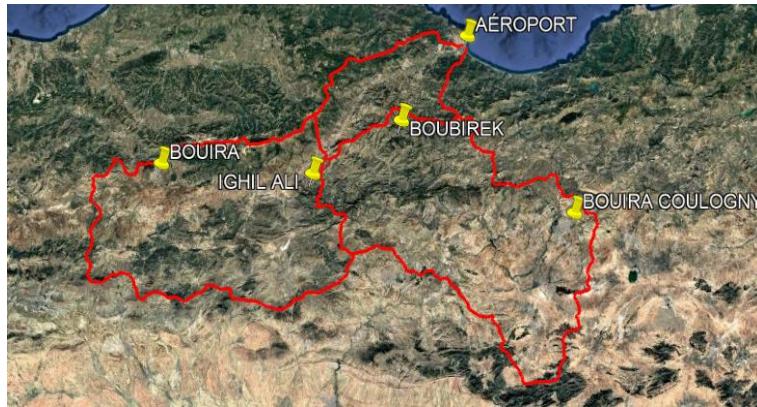


Figure II-1: La situation des stations pluviométrique prises avec Google Earth.

Remarque :

Le manque du nombre d'observations revient à notre non accès à la totalité des données. Les cases en couleur jaune représentent des lacunes qu'on a comblées en faisant la moyenne de l'ensemble des observations.

Tableau II-2 : Série des pluies maximales journalières de la station pluviométrique d'Ighil-Ali.[6]

IGHIL ALI				15 05 03			
Année	P _{jmax}	Année	P _{jmax}	Année	P _{jmax}	Année	P _{jmax}
1967	62	1975	122.3	1983	89	1991	95.5
1968	82.2	1976	96.1	1984	130.5	1992	59.2
1969	294.5	1977	67.4	1985	56	1993	97
1970	101	1978	71.8	1986	155.5	1994	157
1971	158	1979	102.69	1987	75.2	1995	36.6
1972	109.6	1980	141.7	1988	113	1996	14.6
1973	113.4	1981	130	1989	96.5	1997	19.7
1974	82.7	1982	134.5	1990	94	1998	127

- La même procédure a été faites pour les autres stations pluviométriques. Voir l'annexe 01

II.2.2 Traitement des données pluviométriques :

Le traitement statistique des séries pluviométriques constitue une étape primordiale pour l'analyse hydrologique, notamment dans le cadre de l'évaluation des événements extrêmes. Il permet de déterminer la probabilité d'occurrence des pluies rares, appelées aussi pluies extrêmes, qui sont souvent responsables des crues importantes.

Ce traitement repose sur une série d'étapes rigoureuses visant à transformer les données brutes en indicateurs statistiques exploitables. La première étape consiste à collecter une série homogène de hauteurs de précipitations, généralement annuelles maximales, et à vérifier leur qualité (absence de données manquantes, valeurs aberrantes, etc.).

Les données sont ensuite classées par ordre décroissant ou croissant, et chaque valeur se voit attribuer une fréquence empirique d'occurrence selon une formule statistique, généralement on utilise la loi de Hazen :

$$f(x) = \frac{m - 0.5}{n} \quad (II-1)$$

- m : est le rang de la valeur dans la série classée, et n : le nombre total d'observations.

À partir de ces fréquences, on procède à l'ajustement des données à une ou plusieurs lois de probabilité, telles que la loi de Gumbel, la loi log-normale ou encore la loi normale. Le choix de la loi la plus représentative se fait à l'aide de tests statistiques d'adéquation, comme le test de Kolmogorov-Smirnov ou le test du Chi², permettant de juger la compatibilité entre les données observées et les modèles théoriques.

Une fois la loi retenue, il devient possible de déterminer les quantiles de pluie associés à différentes périodes de retour.

Enfin, des intervalles de confiance sont calculés autour de ces valeurs extrêmes, permettant de prendre en compte l'incertitude inhérente à toute estimation statistique. Cette approche apporte une meilleure robustesse aux décisions prises en matière d'aménagement.

On a travaillé avec le logiciel HYFRAN qui est couramment utilisé pour effectuer ce type d'analyse. Il permet d'automatiser l'ensemble de ces étapes, de tester plusieurs lois d'ajustement et de produire les quantiles et courbes de fréquence avec leurs intervalles de confiance.

II.2.3 Présentation des caractéristiques des séries pluviométriques :

Ce tableau représente les différentes caractéristiques de chaque série pluviométrique correspondante à chaque station représentative pour chacun des bassins versants, avec le logiciel Hyfran.

Tableau II-3 : Caractéristiques des séries pluviométriques des 5 stations prises.

Caractéristiques	BOUIRA	IGHIL ALI	BOUIRA COULOGNY	AEROPORT	BOUBIREK
Nombre d'observation	75	32	88	25	33
Minimum (mm)	7	14,6	41,1	31,2	50,2
Maximum (mm)	308	295	240	137	257
Moyenne (mm)	128	103	105	64,8	139
L'écart type (mm)	64,2	50,7	34,2	23,4	50,3
Médiane (mm)	111	96,8	103	60,7	140
Coeff de variation (C_v)	0,502	0,494	0,327	0,361	0,361
Coeff d'asymétrie (C_s)	0,779	1,52	0,867	1,5	0,131
Coeff d'aplatissement (C_k)	3,1	7,19	4,53	4,74	2,07

❖ Coefficient de variation :

Mesure la variabilité relative des précipitations par rapport à leur moyenne.

- Bouira et Ighil Ali ont les pluies les plus variables, tandis que Bouira Coulogny montre une répartition plus homogène.

❖ Coefficient d'asymétrie :

Indique si la distribution est symétrique, étalée vers la droite ou vers la gauche.

Les stations Ighil Ali et Aéroport présentent une forte asymétrie, indiquant que les précipitations sont souvent faibles avec quelques épisodes très intenses. Boubirek se distingue par une distribution presque symétrique.

❖ Coefficient d'aplatissement :

Indique si la distribution est aplatie ou concentrée.

- Ighil Ali a une distribution extrêmement concentrée avec une forte occurrence d'événements extrêmes.
- Boubirek, à l'inverse, présente une répartition plus répartie et régulière.

II.2.4 Choix de la loi d'ajustement :

Les pluies maximales journalières bien qu'elles soient rares, sont souvent à l'origine de crues importantes susceptibles d'endommager les infrastructures. Il est donc essentiel de les analyser afin de déterminer leur probabilité d'occurrence. L'analyse fréquentielle de ces événements extrêmes permet d'estimer les quantiles associés à différentes périodes de retour, et ainsi de mieux anticiper les risques hydrologiques.

Dans ce contexte, l'ajustement statistique des données a été réalisé à l'aide du logiciel Hyfran, un outil reconnu pour l'analyse des extrêmes hydrologiques. Ce logiciel permet de tester plusieurs lois de probabilité (telles que les lois de Gumbel et de Galton) et d'identifier celle qui représente le mieux le comportement des précipitations maximales. L'ajustement aux lois de Gumbel et Galton a été effectué pour chaque poste pluviométrique représentatif à chacun des bassins versants.

II.2.4.1 Ajustement des séries pluviométriques à la loi de Gumbel : [7]

Cette loi a une fonction de répartition à double exponentiel, dite aussi loi doublement exponentielle ou loi des valeurs extrêmes qui s'exprime selon la formule :

$$f(x) = e^{-e^{-y}} \quad (II-2)$$

- $F(x)$: Fréquence au non dépassement de la valeur de x ;
- Y : Est la variable réduite de Gumbel, elle est exprimée par la formule suivante :

$$y = a(x - x_0) \quad (II-3)$$

- x : Valeur de la variable étudiée (pluie maximale journalière) ;
- x_0 : Paramètre de position (mode) ;
- a : Paramètre d'échelle différent de zéro et positif ;
- L'équation de la droite de Gumbel est donnée par l'expression suivante :

$$x = \frac{1}{a}y + x_0 \quad (II-4)$$

" $\frac{1}{a}$ " La pente de la droite d'ajustement de Gumbel et, " x_0 " qui est l'ordonnée à l'origine, ils sont exprimés par les équations suivantes :

$$\frac{1}{a} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma_x \quad (II-5)$$

$$x_0 = x_{moy} - \frac{1}{a} y_{moy} \quad (II-6)$$

Et l'écart type donné par la formule suivante :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{moy}})^2}{n-1}}. \quad (\text{II-7})$$

Les résultats de calculs de la loi de Gumbel donnés par HYFRAN pour la station d'Ighil Ali sont présentés dans le graphique et tableau ci-dessous :

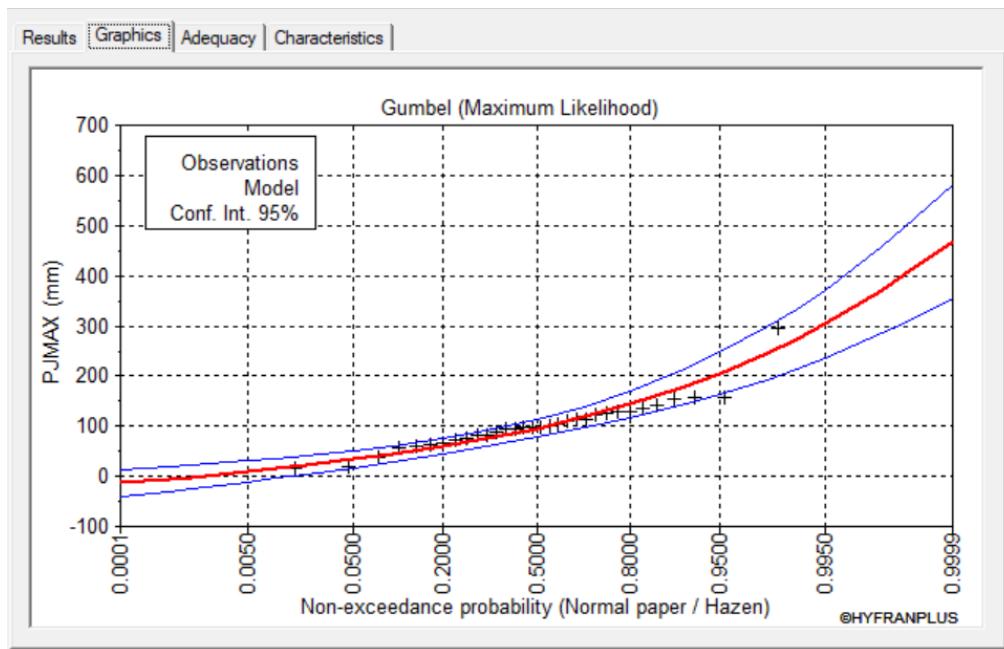


Figure II-2 : Représentation graphique de l'ajustement à la loi de Gumbel pour la station d'Ighil Ali.

Tableau II-4 : Les paramètres de la loi de Gumbel pour chaque station pluviométrique.

Stations pluviométriques	Paramètres de la loi de Gumbel	Gumbel
BOUIRA	u	98,2839
	α	51,99
IGHIL ALI	u	79,96
	α	42,19
BOUIRA COULOGNY	u	88,66
	α	28,73
AEROPORT	u	54,73
	α	16,88
BOUBIREK	u	114,54
	α	45,61

$$\text{Où : } \alpha = \frac{1}{a} \text{ et } u = x_0.$$

Tableau II-5 : Quantiles théoriques de la loi de Gumbel pour la station de Ighil Ali.

Gumbel				
Période de retour (ans)	Fréquence	$P_{j\max}$ théoriques (mm)	Écart-type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	469	57.8	355 - 582
2000.0	0.9995	401	48.2	306 - 495
1000.0	0.9990	371	44.2	285 - 458
200.0	0.9950	303	34.7	235 - 371
100.0	0.9900	274	30.7	214 - 334
50.0	0.9800	245	26.7	192 - 297
20.0	0.9500	205	21.4	163 - 247
10.0	0.9000	175	17.4	141 - 209
5.0	0.8000	143	13.5	117 - 170
3.0	0.6667	118	10.7	97.0 - 139
2.0	0.5000	95.4	8.72	78.3 - 113

II.2.4.1.1 Test d'adéquation de la loi de Gumbel :

Avec le logiciel Hyfran, on dispose d'un seul test d'adéquation pour la loi de Gumbel qui est le test de X^2 . Il nous a permis de vérifier la qualité de l'ajustement de la loi de Gumbel aux données des pluies maximales journalières.

Dans le tableau ci-dessous nous avions pu rassembler la statistique de X^2 calculée et la p-value qui est la probabilité d'obtenir des données aussi extrêmes que celles observées, si l'hypothèse (la loi choisie : loi de Gumbel dans ce cas) est vraie. La p-value est rejetée si $p \leq 0.05$ et acceptée si $p > 0.05$.

Tableau II-6 : Test d'adéquation de X^2 pour la loi de Gumbel sur les séries pluviométriques de chaque station.

Stations pluviométriques	Les tests d'adéquation	Gumbel
BOUIRA	X^2	6,11
	p	0,6353
IGHIL ALI	X^2	6,5
	p	0,26
BOUIRA COULOGNY	X^2	8,5
	p	0,37
AEROPORT	X^2	6,08
	p	0,19
BOUBIREK	X^2	20.58
	p	0,001

II.2.4.2 Ajustement des séries pluviométriques à la loi log-normale (Loi de Galton) : [7]

La loi log-normale, également connue sous le nom de loi de Galton, est souvent notée $\text{Log } N(\mu, \sigma^2)$ dans le cas d'une variable unique, ou $\text{Log } N(\mu, \Sigma)$ en contexte multidimensionnel. Une variable aléatoire X suit une distribution log-normale si la variable $Y = \ln X$ suit une distribution normale. Ainsi, la loi de Galton découle de la loi normale, mais devient dissymétrique à la suite d'un changement de variable.

La fonction de répartition associée est donnée par :

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad (\text{II-8})$$

La variable réduite u est exprimée comme suit :

$$u = \frac{\ln x - \bar{\ln x}}{\sigma_{\ln x}} \quad (\text{II-9})$$

- $\bar{\ln x}$: Moyenne arithmétique des valeurs transformées en logarithme,
- $\sigma_{\ln x}$: Écart type de cette série log-transformée.

Lorsque l'on représente cette relation sous la forme :

$$\ln x = \bar{\ln x} + U \times \sigma_{\ln x} \quad (\text{II-10})$$

On obtient l'équation d'une droite sur un papier Gauss-logarithmique, avec l'abscisse représentant l'échelle gaussienne et l'ordonnée en échelle logarithmique.

Les résultats de calculs de la loi de log-normal donnés par HYFRAN pour la station d'Ighil Ali sont présentés dans le graphique et le tableau ci-dessous :

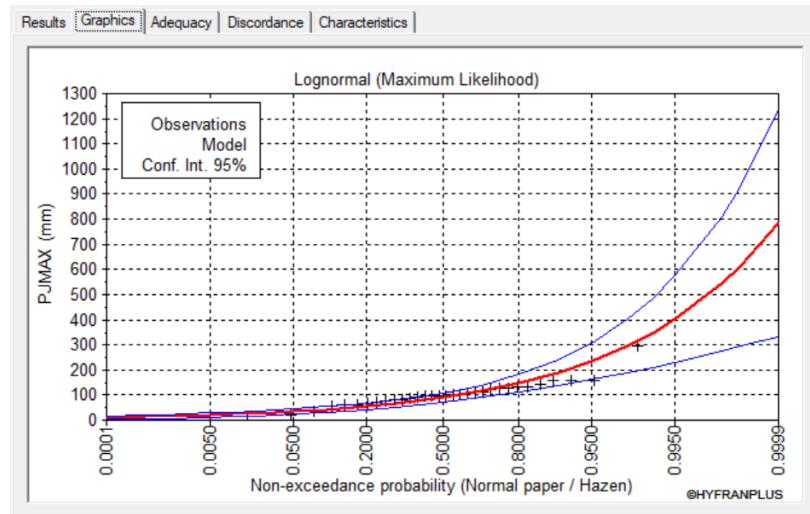


Figure II-3: Représentation graphique de l'ajustement à la loi log-normale pour la station d'Ighil Ali.

Tableau II-7: Les paramètres de la loi log-normale pour chaque station pluviométrique.

Stations pluviométriques	Paramètres de la loi de Log normale	Log normale
BOUIRA	μ	4,7057
	δ	0,6068
IGHIL ALI	μ	4,49
	δ	0,58
BOUIRA COULOGNY	μ	4,59
	δ	0,32
AEROPORT	μ	4,12
	δ	0,33
BOUBIREK	μ	4,87
	δ	0,4

Où :

- δ : L'écart type de la distribution log-normale de la variable $Y=\ln(X)$.
- μ : La moyenne de la distribution log-normale de la variable $Y=\ln(X)$.

Tableau II-8 : Quantiles théoriques de la loi log-normale pour la station d'Ighil Ali.

Période de retour (ans)	Fréquence	$P_{j\max}$ théoriques (mm)	Écart-type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	784	230	332 - 1240
2000.0	0.9995	611	162	294 - 928
1000.0	0.9990	544	136	276 - 811
200.0	0.9950	403	87.3	232 - 574
100.0	0.9900	348	69.9	211 - 485
50.0	0.9800	297	54.6	190 - 404
20.0	0.9500	234	37.4	161 - 307
10.0	0.9000	190	26.5	137 - 242
5.0	0.8000	147	17.6	112 - 181
3.0	0.6667	115	12.4	91.0 - 140
2.0	0.5000	89.8	9.25	71.7 - 108

- L'ajustement des autres stations pluviométrique sont présentées dans **l'annexe 02 et 03**

II.2.4.2.1 Test d'adéquation de la loi log-normale :

Avec Hyfran, on dispose de deux tests d'adéquation pour la loi de log-normale ; le test de X^2 et le test de Shapiro-Wilk. Ce dernier est spécifiquement conçu pour vérifier la normalité d'un échantillon. Il n'est pas utilisé pour tester directement une loi log-normale, mais plutôt pour vérifier si la variable transformée en log suit une loi normale.

Dans le tableau ci-dessous nous avions pu rassembler la statistique de X^2 calculée, la statistique de Shapiro-Wilk calculée et les p-value.

Tableau II-9: Test d'adéquation de X^2 et Shapiro-wilk pour la loi log-normale sur les séries pluviométriques de chaque station.

Stations pluviométriques	Les tests d'adéquation	Log-normale
BOUIRA	X^2	12,27
	p	0,1397
IGHIL ALI	X^2	8,5
	p	0,13
BOUIRA COULOGNY	X^2	8
	p	0,43
AEROPORT	X^2	6,08
	p	0,19
BOUBIREK	SW	0.94
	p	0,93

II.2.4.2.2 Comparaison des résultats d'ajustement :

L'ajustement de chaque série pluviométrique a été réalisé à l'aide des lois de Gumbel et log-normale. En complément des tests d'adéquation (χ^2 et Shapiro-Wilk), une inspection visuelle des graphes de probabilité a permis de comparer la qualité de l'ajustement. Cette approche combinée nous a permis de sélectionner, pour chaque station, la loi statistique la plus représentative des données observées.

Le tableau ci-dessous présente les lois statistiques choisies pour chaque station, indiquées par les cases en couleur.

Tableau II-10: Tableau représentatif des lois statistiques choisies pour chaque station.

Stations pluviométriques	Les tests d'adéquation	Gumbel	Log normal
BOUIRA	χ^2	6.11	12.27
	p	0.6353	0.1397
IGHIL ALI	χ^2	6.5	8.5
	p	0.26	0.13
BOUIRA COULOGNY	χ^2	8.5	8
	p	0.37	0.43
AEROPORT	χ^2	6.08	6.08
	p	0.19	0.19
BOUBIREK	χ^2 / SW	$\chi^2 = 20.58$	$SW = 0.94$
	p	0.001	0.93

II.3 Pluies de courte durée : [8]

La prévention du risque pluvial revient à l'identification rationnelle des intensités de pluies provoquant les inondations catastrophiques.

Les pluies de courte durée jouent un rôle déterminant la genèse des débits de pointe et des inondations soudaines. Elles se caractérisent par une durée brève, une intensité élevée, un fort potentiel de ruissellement et des conséquences hydrauliques immédiates.

Pour la représentation statistique de ces pluies extrêmes, on utilise les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence). Ces courbes établissent une relation mathématique entre :

- I_t : L'intensité maximale de la pluie en (mm/h),
- t : La durée ou le pas de temps considéré en (h),
- T : La période de retour en (an), qui reflète la fréquence d'apparition de l'événement.

Pour l'élaboration de ces courbes, on a utilisé les $P_{j\max}$ correspondant à chaque période de retour et fréquence de chaque station pluviométrique pour les périodes de retour de (2 ans, 5ans, 10ans, 20ans, 50ans et 100ans) et calculé les pluies de courte durée et les intensités maximales correspondantes à chaque période de retour et mis en évidence les temps de concentration de chaque bassin versant.

On a obtenu ainsi des courbes caractéristiques, appelées également courbes enveloppes, qui traduisent une fonction décroissante en durée et croissante en fréquence, sans discontinuités.

La formule des pluies de courte durée est donnée par la formule de MONTANA :

$$P_{t_c} = P_{j\max\%} \times \left(\frac{t}{24}\right)^\beta \quad (II-11)$$

- P_{t_c} : Pluie de courte durée d'une fréquence donnée en (mm) ;
- $P_{j\max\%}$: Pluie journalière maximale d'une fréquence donnée en (mm) ;
- t : Temps en heure (h) ;
- β : Exposant climatique calculé par la formule :

$$\beta = 1 + \frac{\ln\left(\frac{\bar{P}_{j\max}}{24}\right) - \ln(25)}{\ln(24) - \ln(0.5)} \quad (II-12)$$

- $\bar{P}_{j\max}$: La moyenne des pluies maximales journalières théoriques des périodes de retour en (mm).

Tableau II-11 : La moyenne des pluies maximales journalières théoriques des périodes de retour pour chaque station pluviométrique.

Les stations pluviométriques	$P_{j\max}$ théoriques	Périodes de retour						$P_{j\max}$
		2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans	
Bouira	$P_{j\max}$	117,00	176,00	215,00	253,00	301,00	337,00	233,17
Ighil Ali	$P_{j\max}$	89,90	147,00	190,00	234,00	297,00	348,00	217,65
Bouira Coulogny	$P_{j\max}$	99,20	131,00	151,00	171,00	195,00	214,00	160,20
Boubirek	$P_{j\max}$	130,00	182,00	216,00	250,00	294,00	328,00	233,33
Aéroport	$P_{j\max}$	60,90	80,00	92,70	105,00	121,00	132,00	98,60

L'intensité maximale des pluies est donnée par la relation ci-dessous :

$$I_t = \frac{P_{t_c}}{t} \quad (II-13)$$

- I_t : Intensité maximale en (mm/h) ;
- t : Durée par heure (h) ;
- P_{t_c} : Pluie de courte durée en (mm).

Les pluies de courte durée et les intensités maximales pour différentes durées et différentes périodes de retour pour le sous bassin versant Oued Sahel ; station de Ighil Ali, sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II-12 :Pluies de courte durée et intensités maximales de durée t(h) et de période de retour T(ans) pour le B.V de sahel.

PDR (ans)	2.00		5.00		10.00		20.00		50.00		100.00	
β	0.74											
Pj.max	89.90		147.00		190.00		234.00		297.00		348.00	
t (h)	Ptc	It	Ptc	It	Ptc	It	Ptc	It	Ptc	It	Ptc	It
0.50	5.12	10.25	8.38	16.76	10.83	21.66	13.34	26.68	16.93	33.86	19.84	39.67
1.00	8.56	8.56	13.99	13.99	18.09	18.09	22.28	22.28	28.27	28.27	33.13	33.13
2.00	14.29	7.15	23.37	11.69	30.21	15.11	37.21	18.60	47.22	23.61	55.33	27.67
3.00	19.30	6.43	31.55	10.52	40.78	13.59	50.23	16.74	63.75	21.25	74.70	24.90
4.00	23.87	5.97	39.04	9.76	50.46	12.61	62.14	15.54	78.87	19.72	92.42	23.10
5.00	28.16	5.63	46.05	9.21	59.52	11.90	73.30	14.66	93.03	18.61	109.01	21.80
6.00	32.23	5.37	52.70	8.78	68.11	11.35	83.89	13.98	106.47	17.75	124.75	20.79
7.00	36.12	5.16	59.07	8.44	76.34	10.91	94.02	13.43	119.34	17.05	139.83	19.98
7.48	37.94	5.07	62.04	8.29	80.18	10.72	98.75	13.20	125.34	16.76	146.86	19.63
8.00	39.87	4.98	65.20	8.15	84.27	10.53	103.79	12.97	131.73	16.47	154.35	19.29
9.00	43.51	4.83	71.14	7.90	91.95	10.22	113.24	12.58	143.73	15.97	168.41	18.71
10.00	47.03	4.70	76.91	7.69	99.40	9.94	122.42	12.24	155.38	15.54	182.06	18.21
11.00	50.47	4.59	82.53	7.50	106.67	9.70	131.37	11.94	166.74	15.16	195.37	17.76
12.00	53.83	4.49	88.01	7.33	113.76	9.48	140.11	11.68	177.83	14.82	208.36	17.36
13.00	57.11	4.39	93.39	7.18	120.70	9.28	148.65	11.43	188.68	14.51	221.08	17.01
14.00	60.33	4.31	98.65	7.05	127.51	9.11	157.03	11.22	199.31	14.24	233.54	16.68
15.00	63.49	4.23	103.82	6.92	134.19	8.95	165.26	11.02	209.75	13.98	245.77	16.38
16.00	66.60	4.16	108.90	6.81	140.75	8.80	173.34	10.83	220.01	13.75	257.79	16.11
17.00	69.65	4.10	113.89	6.70	147.21	8.66	181.30	10.66	230.11	13.54	269.62	15.86
18.00	72.66	4.04	118.81	6.60	153.57	8.53	189.13	10.51	240.05	13.34	281.27	15.63
19.00	75.63	3.98	123.66	6.51	159.84	8.41	196.85	10.36	249.85	13.15	292.75	15.41
20.00	78.55	3.93	128.45	6.42	166.02	8.30	204.47	10.22	259.51	12.98	304.08	15.20
21.00	81.44	3.88	133.17	6.34	172.12	8.20	211.98	10.09	269.06	12.81	315.26	15.01
22.00	84.29	3.83	137.83	6.27	178.15	8.10	219.41	9.97	278.48	12.66	326.30	14.83
23.00	87.11	3.79	142.44	6.19	184.11	8.00	226.75	9.86	287.79	12.51	337.21	14.66
24.00	89.90	3.75	147.00	6.13	190.00	7.92	234.00	9.75	297.00	12.38	348.00	14.50

- Les calculs des Pluies de courte durée et l'intensité pour les bassins versants sont présentés dans l'annexe 04.

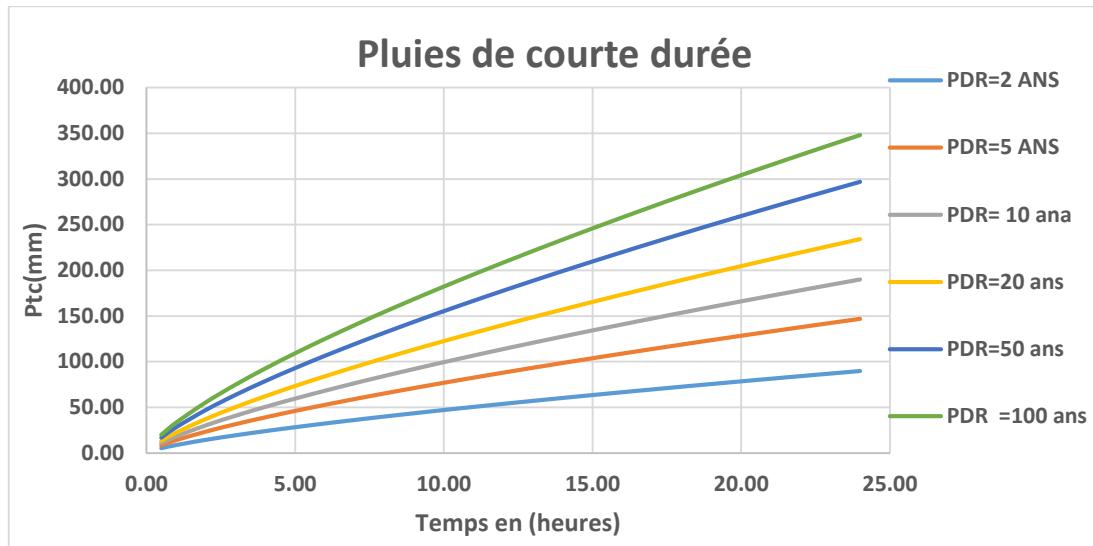


Figure II-4: Courbes de pluies fréquentielles pour la station pluviométrique d'Ighil Ali.

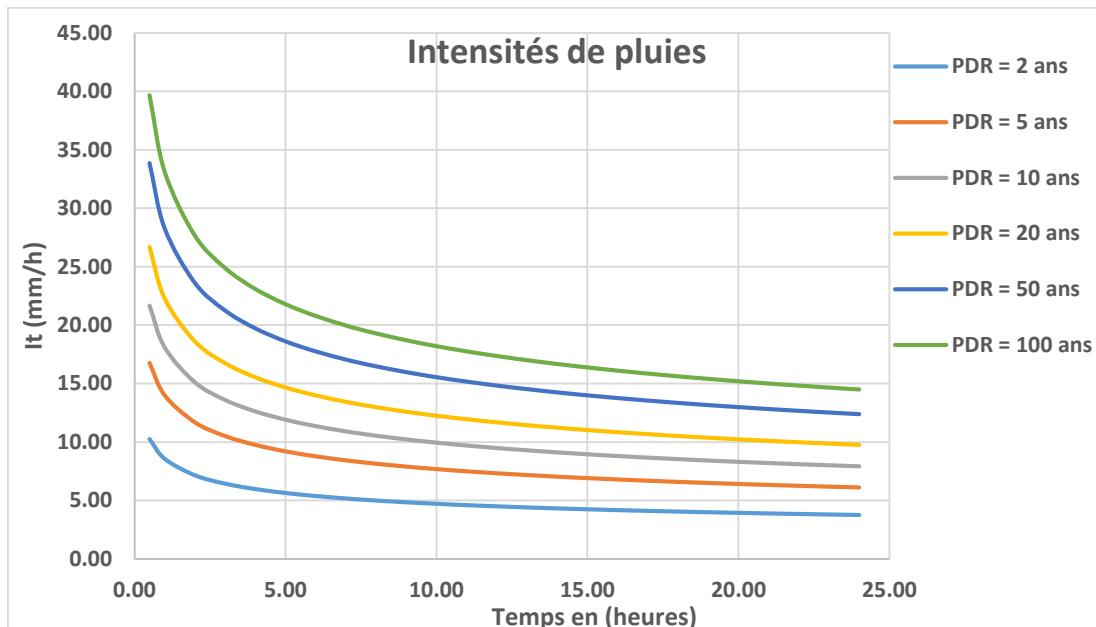


Figure II-5 : Courbes d'intensité pour différentes durées et fréquences pour la station pluviométrique d'Ighil Ali.

II.4 Apport annuel :

La détermination des apports annuels consiste à déterminer les volumes totaux d'eau apportés par les précipitations sur nos bassins versants au cours d'une année, après ruissellement. Plusieurs relations d'évaluation de ces débits liquides sont disponibles, valables pour des conditions géographiques particulières.

L'estimations des apports annuels permet non seulement de dimensionner les ouvrages hydrauliques, mais aussi de mieux comprendre les crues et d'évaluer le transport solide. Elle est essentielle pour l'analyse du fonctionnement hydrologique des bassins, l'anticipation des risques d'inondation et la gestion des phénomènes d'érosion.

II.4.1 Estimation de l'apport moyen annuel :

Dans notre étude, nous avons utilisé 3 formules afin d'estimer les apports annuels de chaque sous bassin.

II.4.1.1 Relations de COUTAGNE (1948) : [8]

COUTAGNE propose 3 relations non linéaires qui déterminent la lame d'eau d'écoulement :
Nous avons travaillé avec COUTAGNE II, COUTAGNE III.

- La relation qui prend en compte la pluie annuelle, elle est donnée par la formule ci-dessous :

Calcul de la lame d'eau par la relation de COUTAGNE II.

$$L_e = 1.024(P_a - 0.26)^2 \quad (\text{II-14})$$

- L_e : Lame d'eau en [m] ;
- P_a : Pluie annuelle en [m].

Avec ;

$$\bar{A} = L_e \times S \quad (\text{II-15})$$

- \bar{A} : Apport moyen annuel [Km^2] ;
- L_e : Lame d'eau [mm] ;
- S : Superficie du bassin versant [Km^2].

- La relation qui prend en compte la pluie annuelle et la surface du bassin versant, elle est donnée par la formule ci-dessous :

Calcul de la lame d'eau par la relation de COUTAGNE III.

$$L_e = (0.164 - 0.00145\sqrt{S})P_a \quad (\text{II-16})$$

- L_e : Lame d'eau [m] ;
- P_a : Pluie annuelle en [m] ;
- S : Superficie du bassin versant [Km^2].

Avec ;

$$\bar{A} = L_e \times S \quad (\text{II-17})$$

- \bar{A} : Apport moyen annuel [Km^2] ;
- L_e : Lame d'eau [mm] ;
- S : Superficie du bassin versant [Km^2].

II.4.1.2 Formule de L'ANRH : [8]

La formule de l'ANRH est donnée par la relation suivante :

$$\bar{A} = 0.915 \times P_{\text{moy}}^{2.684} \times S^{0.842} \quad (\text{II-18})$$

- \bar{A} : Apport moyen annuel [Hm^3] ;
- P_{moy} : Pluie moyenne annuelle [m] ;
- S : Superficie du bassin versant [Km^2].

Avec :

$$L_e = \frac{\bar{A}}{S} \quad (II-19)$$

- \bar{A} : Apport moyen annuel [Km²] ;
- L_e : Lame d'eau [mm] ;
- S : Superficie du bassin versant [Km²].

II.4.2 Analyse des résultats :

Les résultats de calculs des apports annuels et des lames d'eau écoulées pour chaque bassin versant sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II-13:L'estimation des apports annuels des sous bassins versants par différentes relations.

Les sous bassins versants	Stations pluviométriques	Superficie du B.V.	Pa (mm)	COUTAGNE II		COUTAGNE III		ANRH	
				\bar{A} (Hm ³)	L_e (mm)	\bar{A} (Hm ³)	L_e (mm)	\bar{A} (Hm ³)	L_e (mm)
Barrage de Tilesdit	BOUIRA	824,89	526,04	59,78	72,47	53,09	64,36	46,58	56,47
Oued Sahel	IGHIL ALI	3752,39	391,01	65,95	17,58	110,30	29,40	75,24	20,05
Barrage de Ain Zada	BOUIRA COULOGNY	1990,37	470,52	90,33	45,38	93,01	46,73	72,50	36,42
Oued Soummam	AEROPORT	1101,25	268,37	0,08	0,07	34,25	31,10	9,76	8,86
Barrage de Tichy-haf	Boubirek	3941,53	519,56	271,91	68,99	149,42	37,91	168,16	42,66
Oued Bousselam		4175,56		289,04	69,22	152,65	36,56	176,94	42,37

II.5 Caractéristiques de l'écoulement : [8]

L'écoulement se caractérise par différents modules et coefficients.

II.5.1 Module d'écoulement :

Le module d'écoulement est donné par cette formule :

$$M_e = \frac{A_0}{T} \quad (II-20)$$

- M_e : Module d'écoulement [l/s] ;
- A_0 : Apport moyen annuel [l] ;
- T : Temps d'une année en seconde [s].

II.5.2 Module d'écoulement spécifique :

$$M_s = \frac{M_e}{S} \quad (II-21)$$

- M_s : Module d'écoulement spécifique [l/s/km²] ;
- M_e : Module d'écoulement [l/s] ;
- S : Superficie du bassin versant [km²].

II.5.3 Lame d'eau éculée :

La lame d'eau représente la hauteur d'eau en (mm) qui aurait ruisselé de manière uniforme sur toute la surface du bassin versant, si cette eau ne s'était pas infiltrée, évaporée ou stockée localement. Elle est donnée par la relation ci-dessous :

$$L_e = \frac{A_0}{S} \quad (\text{II-22})$$

- L_e : Lame d'eau éculée [mm] ;
- A_0 : Apport moyen annuel [km^3] ;
- S : Superficie du bassin versant [km^2].

II.5.4 Coefficient d'écoulement :

Il est donné par la relation suivante :

$$C_e = \frac{L_e}{P_{\text{moy}}} \quad (\text{II-23})$$

- C_e : Coefficient d'écoulement [adimensionnel] ;
- L_e : Lame d'eau éculée [mm] ;
- P_{moy} : Pluie moyenne annuelle [mm].

II.5.5 Coefficient de variation :

Pour le calcul du coefficient de variation "Cv" et, en cas d'absence d'une série d'observation, on doit utiliser les formules empiriques suivantes :

a) Formule de l'Antonov :

$$C_v = \frac{0.7}{(S + 1000)^{0.097}} \quad (\text{II-24})$$

- S : Superficie du bassin en [km^2].

b) Formule d'OURKGUIC-ROVODKHOZ :

$$C_v = \frac{0.7}{M_0^{-0.127}} \quad (\text{II-25})$$

- M_0 : Module d'écoulement relatif [l/s/km^2].

c) Formule de SOKOLOVSKY :

$$C_v = \alpha - 0.063 \times \log(S + 1) \quad (\text{II-26})$$

- S : Superficie du bassin versant [km^2] ;
- α : Paramètre de SOKOLOVSKY, il est obtenu par la relation suivante :

$$\alpha = 0.78 - 0.29 \times \log M_0 \quad (\text{II-27})$$

- M_0 : Module d'écoulement relatif [l/s/km^2].

d) Formule de KRISTEKLY MENKEL :

$$C_v = \frac{0.83}{M_0^{0.27} \times S^{0.06}} \quad (\text{II-28})$$

- S : Superficie du bassin en $[\text{km}^2]$;
- M_0 : Module d'écoulement relatif $[\text{l/s}/\text{km}^2]$.

Les résultats de calcul des paramètres d'écoulement de la station pluviométrique de Bouira sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Les mêmes calculs sont reproduits pour chaque station pluviométrique.

Tableau II-14 : Résultats des paramètres d'écoulement pour le b.v sahel.

Caractéristiques de l'écoulement		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
Volume A_0 (Hm^3)		65.95	110.30	75.24
Module d'écoulement M_s (l/s)		2091.33	3497.68	2385.72
Module d'écoulement Spécifique M_s ($\text{l/s}/\text{km}^2$)		0.56	0.93	0.64
Débit (m^3/s)		2.09	3.50	2.39
Lame d'eau éoulée L_e (mm)		17.58	29.40	20.05
Coefficient d'écoulement C_e		0.04	0.08	0.05
Coefficient de variation C_v	ANTONOV	0.31	0.31	0.31
	OURKGUIP ROVODKHOZ	0.65	0.69	0.66
	SOKOLOVSKY	0.85	0.79	0.84
	α	0.63	0.56	0.61
	KRISTEKLY MENKEL	0.59	0.52	0.57
	Moyenne	0.54	0.52	0.54

- Les paramètres d'écoulement pour les autres bassins vessant sont présents **dans l'annexe 05**
- ❖ **Coefficient de variation :**

Mesure la variabilité relative des précipitations par rapport à leur moyenne. On opte pour la moyenne des 4 formules empiriques utilisées pour lisser les écarts et obtenir des valeurs plus représentatives et plus fiables en utilisant les paramètres trouvés avec les ces 3 formules : COUTAGNE II, COUTAGNE III et ANRH.

II.6 Transport solide : [10]

Le transport solide, dit transit sédimentaire ou débit solide d'un cours d'eau ; désigne le déplacement vers l'aval d'une partie des alluvions selon un processus de charriage ou de suspension.

Les matériaux grossiers sont charriés au fond du lit par glissement, roulement ou saltation, tandis que les matériaux fins se transportent en suspension. Ces derniers représentent une grande partie du débit solide.

La quantification du transit sédimentaire reste difficile à cause du mouvement discontinu et physique des sédiments grossiers et la mobilité continue mais variable des sédiments fins et la nécessité d'estimations indirectes de ces derniers.

À priori, voici les deux formules empiriques adoptées :

II.6.1 Formule de SOGREAH :

Basée sur des données recueillies sur 30 bassins algériens, cette formule est décrite de la façon suivante :

$$E_s = \alpha \times L_e^{0.15} \quad (\text{II-29})$$

- E_s : Apport solide moyen annuel (en suspension), taux d'abrasion [t/km².an] ;
- L_e : Lame d'eau ruisselée en [mm] ;
- α : Paramètre caractérisant la perméabilité du bassin versant ; Il varie de 3,5 à 3200 ; il est d'autant plus important que la perméabilité est faible. Pour la région Est Algérien $\alpha = 350$ (perméabilité faible à moyenne).

II.6.2 Formule de TIXERONT :

La formule de TIXERONT a été élaborée sur la base du paramètre de perméabilité du bassin versant et de la lame d'eau ruisselée. Elle est obtenue par la relation suivante :

$$E_s = 92 \times L_e^{0.21} \quad (\text{II-30})$$

- E_s : Apport solide moyen annuel (en suspension), taux d'abrasion [t/km²/an] ;
- L_e : Lame d'eau ruisselée en [mm].

Cette formule est uniquement pour la région Est de l'Algérie.

Les résultats de calcul des apports solides sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau II-15 : Récapitulatif des résultats des calculs du transport solide pour le sous bassin versant de l'oued sahel.

		COUTAGNE 2	COUTAGNE 3	ANRH
		Lame d'eau L_e (mm)		
Formule		17.58	29.40	20.05
SOGREAH	Apport (t/km ² .an)	538.03	581.18	548.76
	E_s moy (m ³ /an)	1552998.29	1677546.38	1583982.78
TIXERONT	Apport (t/km ² .an)	167.97	187.12	172.68
	E_s moy (m ³ /an)	484826.21	540121.01	498422.18

- Les résultats des calculs du transport solide pour les autres bassins versant sont présents dans l'annexe 06

II.7 Différentes méthodes d'évaluation des crues : [10]

La crue constitue le phénomène hydrologique majeur à l'origine des inondations, qui affecte régulièrement la plaine alluviale du bassin de la Soummam. Les crues varient spatialement et temporairement, caractérisées par leur débit de pointe et leur hydrogramme.

Plusieurs méthodes de calcul existent, tenant compte des données disponibles ; on a opté pour un ensemble de formules.

II.7.1 Formule de GIANDOTTI :

$$Q_{\max} = \frac{S \times C \times P_{tc} \times \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}{4\sqrt{S} + 1.5 \times L} \quad (\text{II-31})$$

- Q_{\max} : Débit maximum de la crue en $[\text{m}^3/\text{s}]$;
- S : Surface du bassin versant en $[\text{km}^2]$;
- H_{moy} : Altitude moyenne en $[\text{m}]$;
- H_{min} : Altitude minimale en $[\text{m}]$;
- L : Longueur du cours d'eau (talweg) principal en $[\text{km}]$;
- C : Coefficient topographique variant entre 0,066 et 0,166 ;
- P_{tc} : Pluies de courte durée et d'une durée égale au temps de concentration des eaux en $[\text{mm}]$.

Pour des bassins caractérisés par une topographie moyennement accidentée $C = 0,156$.

II.7.2 Formule de MAILLET-GAUTHIER :

$$Q_{\max\%} = 2 \times K \times \log(1 + A \times P_{moy}) \frac{S}{\sqrt{L}} \sqrt{1 + 4 \times \log T - \log S} \quad (\text{II-32})$$

- $Q_{\max\%}$: Débit de pointe pour la période de retour T $[\text{m}^3/\text{s}]$;
- P_{moy} : Pluie moyenne annuelle en $[\text{m}]$;
- T : Période de retour en $[\text{ans}]$;
- L : Longueur du cours d'eau (talweg) principal en $[\text{km}]$;
- S : Superficie de B.V en $[\text{km}^2]$;
- A : Paramètre variant de 20 à 30. On prend pour notre cas $A=25$;
- K : Paramètre régional variant de 0,5 pour les grands bassins versants à faible pente jusqu'à 5 (On prend $K = 2$ pour les bassins versants étudiés).

II.7.3 Formule de FULLER 2 :

$$Q_T = \frac{4}{3} \times \frac{N}{100} \times S^{0.8} (1 + 2.667 \times S^{-0.3}) (1 + C \times \log T) \quad (\text{II-33})$$

- Q_T : Débit de pointe d'une période de retour T en $[\text{m}^3/\text{s}]$;
- T : Période de retour en $[\text{ans}]$;
- S : Superficie du bassin versant en $[\text{km}^2]$;
- C : Paramètre régional dépendant du climat. Dans notre cas $C = 0.8$;
- N : Paramètre régional dépendant du relief. Dans notre cas $N = 85$.

Tableau II-16 : Paramètre régional dépendant du climat.

Valeurs de C	Régions
--------------	---------

0.7 à 0.8	Humides
0.8 à 2	Arides
3 à 3.5	Sahariennes

Tableau II-17 : Paramètre régional du relief.

Valeur de N	Régions
80	Plaines
85	Reliefs accidentés
100	Montagnes

II.7.4 Formule de SOKOLOVSKY :

$$Q_{\max} = \frac{0.28(P_{tc} - H_0)a_{p\%} \times f \times S}{T_c} \quad (\text{II-34})$$

- Q_{\max} : Débit maximum de la crue en [m^3/s] ;
- T_c : Temps de concentration ;
- P_{tc} : Pluie correspondante au temps de concentration en [mm] ;
- S : Superficie du bassin versant en [km^2] ;
- $a_{p\%}$: Coefficient de ruissellement de la crue probable pour une période donnée, donné par la relation suivante :

$$a_{p\%} = \frac{\sqrt{P_{tc}} - \sqrt{H_0}}{\sqrt{P_{tc}} + \sqrt{H_0}} \quad (\text{II-35})$$

- H_0 : Pertes initiales en [mm], variant de 7 à 14 mm (pour notre cas $H_0 = 7 \text{ mm}$) ;
- F : Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue, exprimé par la formule suivante :

$$f = \frac{12}{4 + 3\gamma}$$

- γ : Paramètre variant de 2 à 7, et Pour notre cas $\gamma = 4$.

La valeur de γ en fonction du bassin versant est donnée dans le tableau suivant :

Tableau II-18 : Valeurs du paramètre γ en fonction du type du bassin versant.

Conditions	γ
Surface du bassin versant entre 1 et 50 km^2	$\gamma=2$
Bassin versant boisé avec un sol peu perméable	$2 < \gamma < 3$
Bassin versant boisé	$3 < \gamma < 4$
Grands bassins versants	$4 < \gamma < 7$

II.7.5 Formule de l'ANRH-SOGREAH :

Cette méthode ANRH-SOGREAH (1989) se base sur une liaison équi-fréquentielle pluie-débit, donnée par la formule suivante :

$$Q_T = C_R (P_T - P_0)$$

- Q_T : Débit maximum en période de crue d'une fréquence T en [m^3/s] ;
- C_R : Paramètre de ruissellement en [$km^2/heure$] ;
- P_T : Pluie journalière maximale de même fréquence en [mm] ;
- P_0 : Seuil de ruissellement journalier statistique, il varie entre 20 et 35 mm pour les petits bassins algériens ; Nous optons pour une valeur de 30.

$$C_R = \frac{S}{6} \times T_B^{-0.77}$$

- S : La superficie du bassin versant en [km^2] ;
- T_B : Le temps de base en [heure], se calcule par la formule suivante :

$$T_B = T_{BO} + \frac{L^{1.7} (P_a \times \sqrt{I})^{0.577}}{1000}$$

- L : Longueur du cours d'eau (talweg) principal en [km] ;
- T_{BO} : Constante régionale, pour les bassins septentrionaux elle est égale à 2.33 et, égale à 0.78 pour les hauts plateaux ($T_{BO} = 2.33$ pour notre cas) ;
- P_a : Précipitation annuelle en [mm] ;
- I : Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principal.

Les valeurs des débits de crues correspondant aux périodes de retour retenues du bassin versant du sahel sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II-19 : Tableau récapitulatif des débits de crues de différentes périodes de retour pour le bassin versant d'oued sahel.

Tableau II-20 PDR (ans) SAHEL	2	5	10	20	50	100
$P_{j \max}$	89.90	147.00	190.00	234.00	297.00	348.00
temps de concentration	7.48					
P_{tc} (Pluie pendant le temps de concentration en mm)	37.94	62.04	80.18	98.75	125.34	146.86
GIANDOTTI (m^3/s)	918.13	1501.29	1940.44	2389.80	3033.21	3554.07
MAILLET-GAUTHIER (m^3/s)	-	647.14	1641.56	2229.49	2824.75	3202.36
FULLER 2	1467.29	1843.74	2128.52	2413.29	2789.75	3074.53
a%	0.40	0.50	0.54	0.58	0.62	0.64
f	0.75					
SOKOLOVSKY	1300.67	2882.21	4192.90	5601.17	7700.75	9453.52
T_B	74.98					
C_R	22.51					
ANARH-SOGREAH	1348.35	2633.67	3601.60	4592.04	6010.17	7158.18

- Les débits de crues de différentes périodes de retour pour les autres bassins vessant sont présents dans l'annexe 07

Les résultats obtenus pour chaque sous bassin versant avec les différentes méthodes de calcul des débits de pointe montrent une grande variation. Cependant, cette distorsion reste cohérente. Toutes les méthodes montrent que le débit s'accroît avec la fréquence.

Notre choix repose sur les formules qui donnent les maximums pour chaque période de retour pour chaque sous bassin versant, pour ne pas sous-estimer nos débits de crue comme il n'y a pas d'étude propre à chaque sous bassin versant indiquant la formule adéquate utilisable.

Pour le sous bassin versant du sahel, on opte pour la formule de SOKOLOVSKY qui donne les valeurs maximales. Ses valeurs sont comprises entre 1300.67 et 7158.18 m³/s.

II.8 Hydrogrammes de crue : [9]

L'hydrogramme de crue est une courbe représentant l'évolution du débit d'un cours d'eau en fonction du temps pendant un épisode de crue pour différentes fréquences. La méthode utilisée afin de l'établir est celle de SOKOLOVSKY. Cette dernière assimile l'hydrogramme de crue en deux équations paraboliques, une pour la montée de la crue et l'autre pour sa décrue.

Le débit instantané au moment de la montée et au moment de la décrue est donné par ces deux formules :

✓ Calcul du débit instantané au moment de la montée :

$$\text{Pour } 0 \leq t \leq t_m \quad Q_m(t) = Q_{max,p\%} \times \left(\frac{t}{t_m}\right)^m \quad (\text{II-36})$$

✓ Calcul du débit instantané au moment de la décrue :

$$\text{Pour } t_m \leq t \leq t_b \quad Q_d(t) = Q_{max,p\%} \times \left(\frac{t_b - t}{t_d}\right)^n \quad (\text{II-37})$$

- $Q_m(t)$: Débit instantané au moment de la montée en [m³/s] ;
- $Q_d(t)$: Débit instantané au moment de la décrue en [m³/s]
- $Q_{max,p\%}$: Débit maximum de crue (de pointe) en [m³/s] ;
- m : Exposant de la parabole, pour les crues pluviales m = 2 ;
- n : Exposant de la parabole, pour les crues pluviales n = 3 ;
- t_m : Temps de montée en [h] ;
- t_d : Temps de décrue en [h] ;
- t_b : Temps de base en [h],

On a $t_m = t_c$; $t_d = y t_m$ et $t_b = t_m + t_d$;

- y : Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue qui dépend de la capacité de régulation du bassin, on prend y = 4 ;

Donc :

$$t_d = (4 * t_m). \quad (\text{II-38})$$

Tableau II-21 : Coefficients de forme de l'hydrogramme de crue.

Description du cours d'eau	y
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants dénudés et faiblement perméables	2 - 2.5
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants brisés ou perméables, moyens cours d'eau avec terrasses de lit majeur normales	3 - 4
Grands et moyens cours d'eau avec des terrasses de débordements étendues	4 - 7

Tableau II-22 : Temps de monté et de décrue de tous les sous bassins versants.

Temps	B.v sahel	B.v bousellam	B.v oued soummam	BV SOUMMAM	B.v Tilesdit	B.v Ain Zada	B.v Tichy-Haf
Tm	7.48	16.97	8.89	15.90	5.76	7.02	12.87
Td	29.93	67.88	35.57	63.61	23.02	28.10	51.47
Tb	37.41	84.85	44.46	79.52	28.78	35.12	64.33

Les débits de crue pour les différentes périodes de retour du sous bassin versant de l'Oued Sahel sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II-23 : Les débits de crues du B.V. de l'Oued sahel pour les différentes périodes de retour.

$Q_{max,p\%}$ (m ³ /s)	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
	2586.39	3368.12	4310.46	5177.61	6272.63	7101.43
Temps (h)						
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	92.99	206.05	299.76	400.44	550.54	675.85
4.00	371.95	824.22	1199.03	1601.75	2202.16	2703.40
6.00	836.89	1854.49	2697.83	3603.94	4954.87	6082.65
7.48	1300.67	2882.21	4192.90	5601.17	7700.75	9453.52
8.00	1234.05	2734.58	3978.13	5314.27	7306.31	8969.30
10.00	999.02	2213.77	3220.49	4302.15	5914.80	7261.07
12.00	795.90	1763.68	2565.71	3427.46	4712.23	5784.79
14.00	622.37	1379.14	2006.31	2680.17	3684.83	4523.53
16.00	476.10	1055.01	1534.77	2050.26	2818.79	3460.38
18.00	354.75	786.11	1143.59	1527.69	2100.34	2578.40
20.00	256.00	567.29	825.26	1102.44	1515.69	1860.67
22.00	177.52	393.38	572.27	764.48	1051.04	1290.27
24.00	116.99	259.23	377.12	503.78	692.63	850.28
26.00	72.06	159.68	232.30	310.32	426.65	523.76
37.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

L'hydrogramme de crue du bassin versant de l'Oued Sahel est représenté dans la figure suivante :

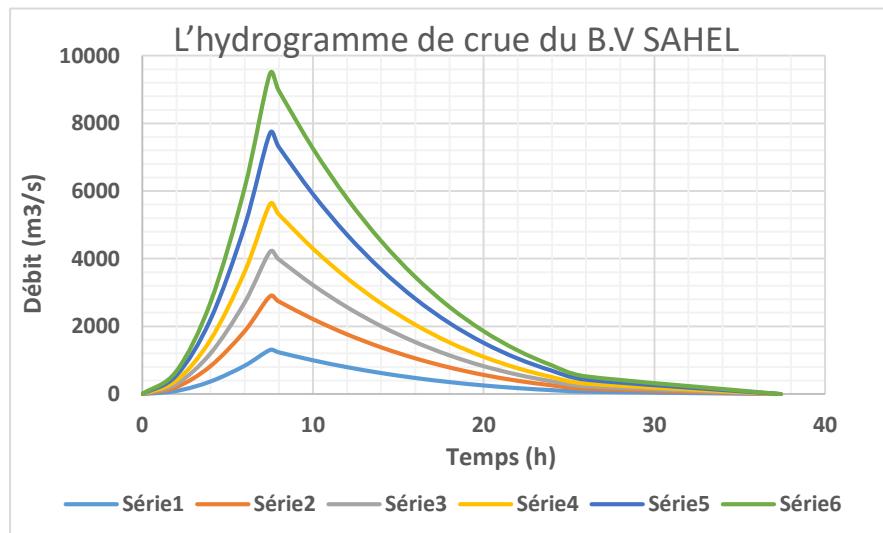


Figure II-6 : L'hydrogramme de crue du bassin versant du sahel.

- Le même calcul a été fait pour les différents sous bassins versants dans **l'annexe 08**.

II.9 Conclusion :

Pour étudier l'écoulement de la zone aval du bassin versant de l'Oued Soummam, on a :

- Estimer les apports annuels ;
- Déterminer les différents paramètres d'écoulement ;
- Estimer les débits solides ;
- Évaluer les crues par différentes méthodes.

Ce travail a été effectué pour 5 différents sous bassins versants : B.V. Oued Sahel, B.V. Oued Soummam, B.V. Oued Bousselam, B.V. du barrage Ain Zada, B.V. du barrage Tichy-Haf.

Le débit de crue est calculé par 05 méthodes différentes, on a opté pour les valeurs les plus importantes calculées pour chaque sous bassin versant.

Chapitre III

Simulation Hydraulique.

III.1 Introduction :

L'étude de l'écoulement des cours d'eau joue un rôle crucial dans la compréhension des phénomènes hydrauliques naturels et dans la représentation des interactions entre l'eau et son environnement. Ce dernier chapitre nous le consacrant pour la simulation hydraulique de l'écoulement sur le tronçon situé entre El-Kseur et Béjaïa avec le logiciel HEC-RAS. Cette étape constitue l'application concrète de l'ensemble des données et des analyses hydrologiques précédemment développées.

Nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS pour modéliser l'écoulement à surface libre, en régime permanent, le long de ce tronçon de l'Oued Soummam. Ce modèle permet, de simuler les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement ainsi que l'extension des zones inondables, en intégrant les caractéristiques topographiques, géométriques et hydrauliques du terrain étudié.

Cette étude hydraulique sans aménagement est effectuée dans le but d'analyser le comportement naturel de notre Oued, en l'absence de toute intervention humaine. Cette étape permet de mieux comprendre la réaction de l'Oued face aux crues, notamment celles de période centennale, et d'identifier les zones les plus exposées au risque d'inondation. En s'appuyant sur les résultats des calculs déjà développés.

III.2 Généralités sur les écoulements à surface libre :

L'hydraulique à surface libre étudie les écoulements liquides dont la surface est en contact direct avec l'air (pression atmosphérique), comme dans les rivières, oueds et canaux.

Ces écoulements sont guidés par la gravité, et leur surface libre varie selon les conditions (débit, pente, forme du lit, etc.)

III.2.1 Canaux :

Un canal est un conduit ouvert permettant l'écoulement de l'eau à surface libre, guidé par la gravité. On distingue deux catégories de canaux :

III.2.1.1 Canaux naturels :

Les canaux naturels sont les cours d'eau formés naturellement sur terre ou sous terre, façonnés par l'érosion et les conditions géologiques, tels que les ruisselets, torrents, rivières et fleuves. Les propriétés géométriques et hydrauliques des canaux naturels sont généralement assez irrégulières.

III.2.1.2 Canaux artificiels :

Les canaux artificiels sont des ouvrages construits par l'homme (en terre, en béton, ou en maçonnerie) afin de conduire l'eau à des fins agricoles, industrielles, urbaines ou de navigation. Les propriétés hydrauliques des canaux artificiels sont généralement assez régulières, l'application de la théorie hydraulique donne souvent des résultats réalistes.

III.2.2 Géométrie des canaux :

La section transversale d'un canal correspondant à une coupe plane perpendiculaire à la direction de l'écoulement.

Un canal dont la section reste constante, avec une pente longitudinale et une rugosité ; invariables, est appelé canal prismatique. À l'inverse, si ces caractéristiques varient, il s'agit d'un canal non prismatique.

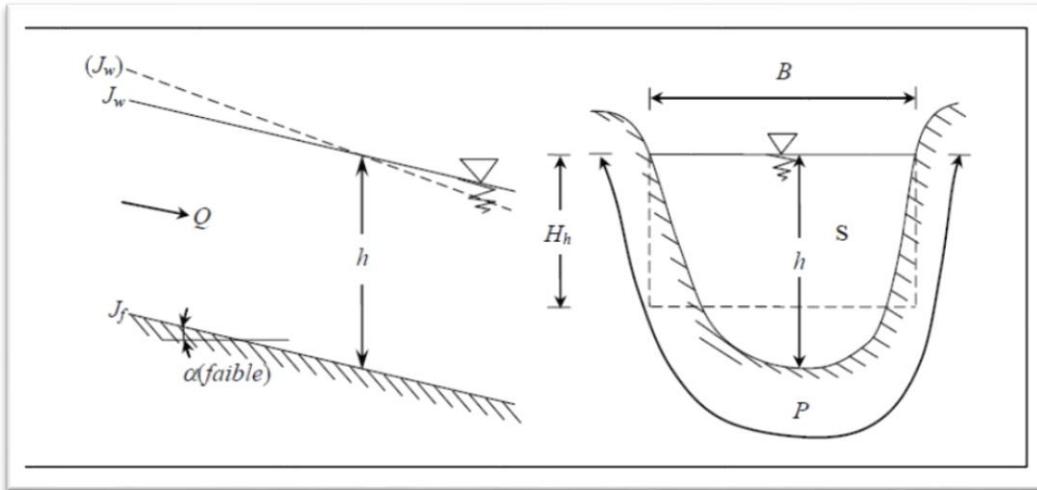


Figure III-1 : Caractéristiques géométriques d'un canal.

Les principales grandeurs définissant la géométrie d'une section de canal sont :

- Section mouillée S : Aire de la section occupée par l'eau (m^2) ;
- Périmètre mouillé P : Longueur du contour en contact avec l'eau (m) ;
- Largeur à la surface libre (ou largeur au miroir) : B (m) ;
- Tirant d'eau h : profondeur de l'eau (m) ;
- Rayon hydraulique $R_h = \frac{S}{P}$ en (m) ;
- Profondeur hydraulique $D_h = \frac{S}{B}$ en (m) ;
- Pente du fond du canal J_F et pente de la ligne d'eau J_w en (m/m).

III.2.3 Type d'écoulement :

Les écoulements peuvent être classés en fonction des variations de la profondeur, h ou D_h dans le temps et dans l'espace : $D_h = f(t, x)$

III.2.3.1 Variabilité dans le temps :

Un écoulement est dit permanent lorsque les vitesses moyennes v et instantanées u , ainsi que la profondeur (h ou D_h), demeurent constantes au cours du temps, tant en valeur qu'en direction. Par conséquent, le débit ($V = Q$) reste identique à travers les différentes sections du canal en l'absence d'apport latéral

À l'inverse, l'écoulement est non permanent si la profondeur $D_h(t)$ et les autres paramètres varient au fil du temps. Le débit n'est alors plus constant. En pratique, les écoulements dans les canaux sont rarement totalement permanents. Toutefois, les variations temporelles étant souvent assez lentes, l'écoulement peut être considéré comme quasi permanent sur une période de temps relativement courte.

III.2.3.2 Variabilité dans l'espace :

Trois situations peuvent être rencontrées :

a) L'écoulement est uniforme si la profondeur D_h et les autres paramètres restent constants dans les différentes sections du canal. La pente du fond est alors parallèle à celle de la surface libre, soit : $(I = J)$.

b) L'écoulement est non uniforme ou varié lorsque la profondeur $D_h(x)$ et les autres paramètres changent progressivement d'un point à un autre. Dans ce cas, la pente du fond diffère de celle de la surface libre ($I \neq J$). L'écoulement peut être permanent ou non. Si le changement est graduel, on parle d'écoulement graduellement varié, avec $D_h(x) \approx D_h$.

c) Si les paramètres, notamment la profondeur $D_h(x)$, varient brusquement, avec parfois des discontinuités, on parle d'écoulement rapidement varié. Cela se produit souvent à proximité d'une singularité (déversoir, rétrécissement, ressaut hydraulique, chute brusque, etc.).

III.2.4 Régime d'écoulement :

L'écoulement d'un fluide réel dans un canal à surface libre est influencé par plusieurs forces, notamment la gravité et les forces de frottement liées à la viscosité du fluide et à la rugosité des parois.

Les équations simplifiées du mouvement intègrent alors des coefficients ou des nombres sans dimension (adimensionnels) suivants :

III.2.4.1 Nombre de Froude :

Est le rapport entre les forces d'inertie et celle de gravité où :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \times D_h}} \quad (\text{III-1})$$

- V : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s) ;
- g : accélération gravitationnelle (9.81 m/s²) ;
- D_h : profondeur hydraulique = surface mouillée / largeur mouillée (m) ;
- Fr : Nombre de Froude adimensionnel.

Le rôle du nombre de Froude est de permettre le classement des écoulements comme suit :

- $Fr < 1$: écoulement subcritique (fluvial) → gravité dominante ;
- $Fr = 1$: écoulement critique ;
- $Fr > 1$: écoulement supercritique (torrentiel) → inertie dominante.

III.2.4.2 Nombre de Reynolds :

Est le rapport entre les forces d'inertie et celles de frottement où :

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (\text{III-2})$$

- Re : Nombre de Reynolds adimensionnel ;
- V : Vitesse d'écoulement en [m/s] ;
- D : Dimension caractéristique de l'écoulement en [m] ;
- ν : Viscosité cinématique du fluide tel que $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ en $[m^2 s^{-1}]$;
- μ : Viscosité dynamique du fluide en $[Pa.s \text{ ou } kg m^{-1} s^{-1}]$ ou poiseuille P_l , ou encore un dixième de poise P_o ;

- ρ : Masse volumique du fluide en $[\text{kg m}^{-3}]$.

Le nombre de Reynolds en rivière s'écrit :

$$R_e = \frac{4V \times R_h}{\nu} \quad (\text{III-3})$$

- R_h : rayon hydraulique en [m].

III.2.4.3 Formulations de Chézy et de Manning-Strickler :

a. Équation de Chézy :

$$V = C \sqrt{R_h \times I} \quad (\text{III-4})$$

- V : Vitesse d'écoulement $[\text{m s}^{-1}]$;
- C : Coefficient de résistance selon Chézy $[\text{m}^{0.5}/\text{s}]$;
- R_h : Rayon hydraulique [m] ;
- I : Pente [m/m].

b. Formule de Manning :

$$C = \frac{\alpha \times R_h^{1/66}}{n} \quad (\text{III-5})$$

- C : Coefficient de résistance selon Chézy $[\text{m}^{0.5}/\text{s}]$;
- α : Coefficient d'unité qui vaut 1 en système international et 1,486 en système anglo-saxons ;
- R_h : Rayon hydraulique [m] ;
- n : Coefficient de frottement de Manning.

c. Formule de Manning - Strickler :

$$V = K_s \times R_h^{2/3} \times I^{1/2} \quad (\text{III-6})$$

- V : Vitesse d'écoulement [m/s] ;
- K_s : Coefficient de Manning-Strickler qui correspond à un coefficient de rugosité pour les écoulements à surface libre $[\text{m}^{1/3} / \text{s}]$;
- R_h : Rayon hydraulique correspondant au rapport entre la surface mouillée et le périmètre mouillé [m] ;
- I : Pente de canal [m/m].

III.3 Présentation du logiciel HEC-RAS : [11]

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) est un logiciel de modélisation hydraulique développé par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine (USACE), spécifiquement conçu pour simuler l'écoulement de l'eau dans les rivières naturelles et les canaux artificiels. Il permet d'effectuer des calculs en régime permanent (écoulement stable) et en régime transitoire (crues ou variations rapides), avec une grande précision. Grâce à une interface graphique conviviale et des capacités d'intégration avec des outils de SIG (comme ArcGIS ou QGIS via HEC-GeoRAS), HEC-RAS permet de modéliser des profils d'écoulement en 1D, 2D et 3D, d'analyser les effets d'ouvrages hydrauliques (ponts, barrages, déversoirs, digues), de prévoir les inondations, et d'établir des cartes de risques. Utilisé mondialement par les ingénieurs hydrauliques, urbanistes et gestionnaires de ressources en eau, HEC-RAS est un outil essentiel pour la planification, la conception d'infrastructures fluviales, et la gestion des événements extrêmes liés à l'eau.

Notre choix pour ce projet est le modèle HEC-RAS 6.7 Beta. La version 6.7 Beta, lancée en janvier 2025 (avec la Beta 3 disponible depuis le 24 avril 2025), introduit des avancées majeures tant sur les réseaux de canalisations que sur la modélisation sédimentaire, boueuse et de débris pour le transport mobile 2D. Côté réseaux de conduits, HEC-RAS accepte désormais une large palette de formes (rectangulaires, arches, ellipses, ConSpan...), dispose de graphiques améliorés (flux, vitesse, profondeur critique avec animation), de vues en coupe, de tableaux de propriétés et d'un mode « Speed Draw » pour accélérer l'implantation des nœuds. En transport solide et morphodynamique, la gestion sédimentaire bénéficie d'une automatisation du facteur d'accélération morphologique (compression temporelle automatique), de corrections dans le modèle BSTEM de stabilité de berge et d'un guide enrichi sur la modélisation de boues/débris à concentrations variables. Par ailleurs, la simulation des ponts en 2D intègre un nouveau traitement pour les écoulements pressurisés ou en submersion (avec pertes d'énergie mineures) et la méthode de la quantité de mouvement pour les faibles débits a été améliorée. Enfin, le nouveau solveur GPU offre des performances augmentées de 10 à 40 %, accompagné de gains d'interface (gestion des couches, DPI, messages d'erreur), de compatibilité accrue avec les maillages de la version 2025 et de nombreuses corrections de bugs sur l'importation des terrains et l'imagerie web.

III.3.1 Équations utilisées par le logiciel HEC-RAS : [9]

La ligne d'eau est déterminée entre deux sections en résolvant l'équation d'énergie à l'aide d'une méthode itérative. Elle est issue de l'équation de la quantité de mouvement et traduit le principe de conservation de la charge hydraulique selon le théorème de Bernoulli.

L'équation utilisée pour ce calcul est la suivante :

$$H_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = H_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (\text{III-7})$$

- H_1, H_2 : Profondeurs de l'eau au niveau des sections 01 et 02 [m] ;
- Z_1, Z_2 : Côtes du canal principal [m] ;
- α_1, α_2 : Coefficients de pondération de la vitesse ;
- V_1, V_2 : Vitesses moyennes sur les sections (Débit total / Section mouillée) $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$;
- g : Accélération de la pesanteur $[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$;
- ΔH : Perte de charge [m].

La perte d'énergie Δh entre deux sections est due aux frottements ainsi qu'aux effets de contraction ou d'élargissement du lit du canal. Elle s'exprime à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta H = L \times \overline{S_f} + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (\text{III-8})$$

- L : La distance entre les deux profils en [m] ;
- $\overline{S_f}$: La pente de la ligne d'énergie (pente de frottement) en [m/m] ;
- C : Le coefficient d'expansion ou de contraction ;
- α_1, α_2 : Les coefficients de pondération de la vitesse ;
- V_1, V_2 : Les Vitesses moyennes sur les sections en $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$.

La figure ci-après illustre l'apport de chaque terme de l'équation.

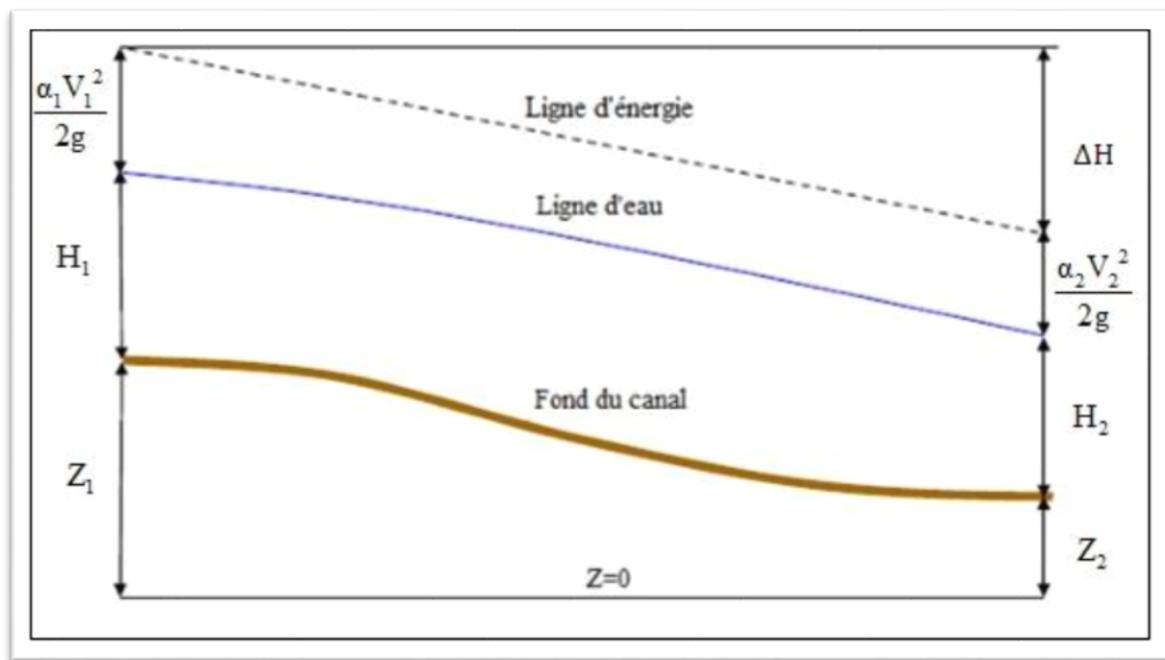


Figure III-2 : Conservation de la charge entre deux points.[8]

La longueur pondérée est calculée par la formule :

$$L = \frac{L_{rg} \times \overline{Q_{rg}} + L_c \times \overline{Q_c} + L_{rd} \times \overline{Q_{rd}}}{\overline{Q_{rg}} + \overline{Q_c} + \overline{Q_{rd}}} \quad (\text{III-9})$$

- L : La distance entre les deux profils en [m] ;
- L_{rg} , L_c , L_{rd} : La distance des sections en travers pour la rive gauche, le centre du lit mineur et, la rive droite respectivement en [m] ;
- $\overline{Q_{rg}} + \overline{Q_c} + \overline{Q_{rd}}$: La moyenne arithmétique pour les débits entre les sections pour la rive gauche, le centre du lit mineur et, la rive droite en $[m^3 \cdot s^{-1}]$.

III.3.2 Subdivision d'une section en travers pour le calcul du débit :

Pour déterminer le transport total ainsi que le coefficient de vitesse dans une section, il est nécessaire de subdiviser l'écoulement en unités dans lesquelles la vitesse est supposée uniformément répartie.

Dans le logiciel HEC-RAS, cette subdivision s'effectue au niveau des zones de variation du coefficient de rugosité de Manning "n", c'est-à-dire aux points où ce coefficient change (par exemple, entre la berge et le lit principal). Ces points servent de base à la découpe de la section. Le débit est ensuite calculé séparément pour chaque subdivision à l'aide de l'équation de Manning, selon la formule suivante :

$$Q = K \times I^{1/2} \quad (\text{III-10})$$

où:

$$K = \frac{1}{n} S \times R_h^{2/3} \quad (\text{III-11})$$

Avec :

- K : débit partiel (ou "flux") de la subdivision ;
- n : coefficient de rugosité de Manning spécifique à la subdivision ;

- S : surface d'écoulement de la subdivision, en m^2 ;
- R_h : rayon hydraulique de la subdivision, défini comme le rapport de la surface mouillée au périmètre mouillé, en m.

Le logiciel calcule le débit dans chaque subdivision (rive gauche, lit principal, rive droite), puis les additionne pour obtenir le débit total de la section. Ce dernier est donné par la somme des débits des trois zones : K_{LOB} (rive gauche), K_{CH} (canal principal), et K_{ROB} (rive droite).

III.3.3 Mode de fonctionnement de HEC-RAS :

Pour analyser le comportement hydraulique d'un cours d'eau à l'aide du logiciel HEC-RAS, il est nécessaire de créer un Projet, qui regroupe l'ensemble des fichiers contenant les données indispensables à la simulation.

Ces données comprennent principalement :

III.3.3.1 Données géométriques :

- Le profil en travers de chaque section, défini par une série de points caractérisés par leurs coordonnées (distance-altitude ou X-Y) ;
- Les trois longueurs principales entre sections successives : celles correspondant à la rive gauche, à la rive droite, et à l'axe du lit mineur (lit principal) ;
- Les coefficients de rugosité de Manning, pour les lits majeur et mineur ;
- Les coordonnées en X délimitant les bords gauche et droit du lit mineur ;
- Les coefficients de contraction et d'expansion, nécessaires pour simuler les variations brusques de la géométrie ou de la vitesse.

III.3.3.2 Données d'écoulement :

- Les données hydrométriques, notamment le débit et les conditions aux limites (amont et aval) ;
- Les paramètres de simulation, tels que le type d'écoulement (permanent ou non permanent) et la durée ;
- Et enfin, les résultats de la simulation, générés par le logiciel une fois les calculs effectués.

III.3.4 Démarche de la modélisation :

La démarche de modélisation pour notre étude comprend 5 étapes :

a) Modélisation de la géométrie :

Dans le but de faciliter la mise en œuvre du modèle hydraulique de l'Oued Soummam sous HEC-RAS, le programme offre la possibilité d'intégrer des extensions fonctionnelles avec d'autres logiciels de DAO. Pour notre étude, nous avons opté pour le module d'AutoCAD.

La modélisation a été réalisée à partir d'un levé topographique de l'Oued Soummam, correspondant à la zone d'étude. Les sections transversales nécessaires à la simulation hydraulique ont été extraites directement depuis le logiciel COVADIS.

- Les étapes de cette démarche sont :

- Extraction des points topographiques (X, Y et Z) à partir du fichier du levé topographique avec le logiciel COVADIS.

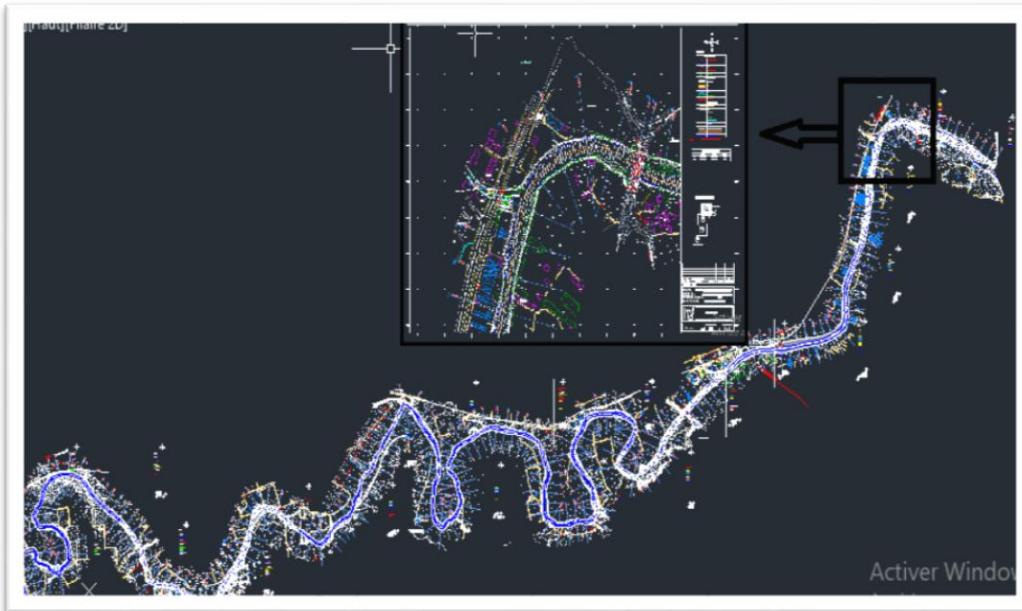


Figure III-3: Levé topographique de oued Soummam dans le logiciel d'AutoCAD.

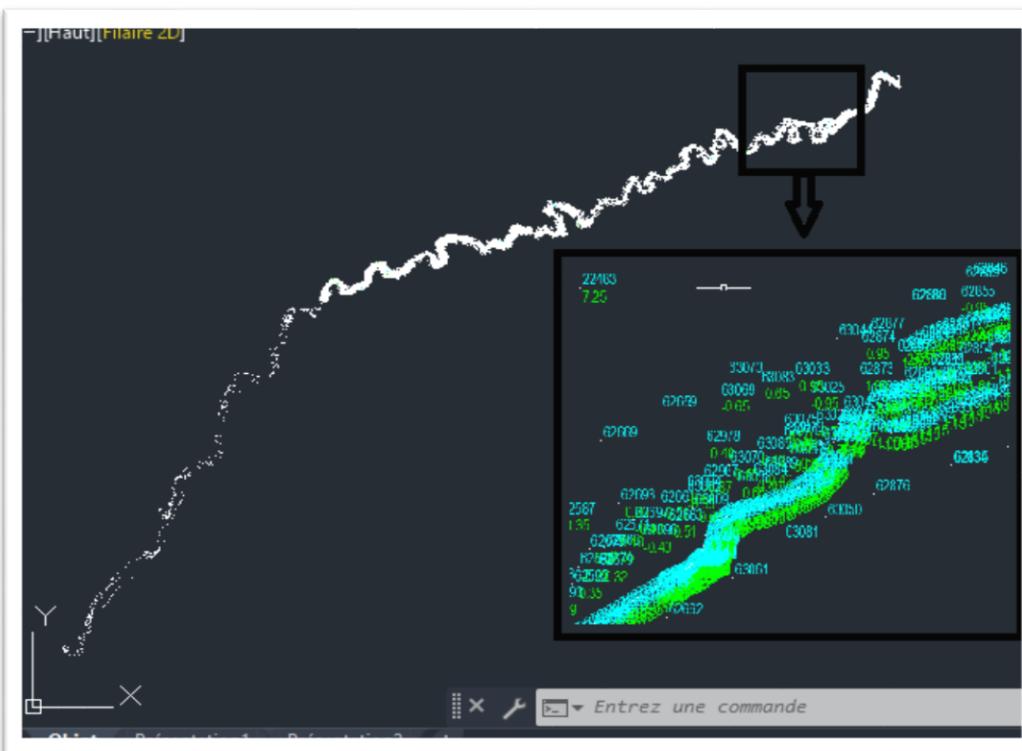


Figure III-4: Les points topographiques (X, Y et Z) dans le logiciel COVADIS.

- Ouverture du fichier contenant les points topographiques avec le logiciel Global Mapper en vérifiant la projection et exportation de ce fichier sous l'extension DEM vers HEC-RAS.

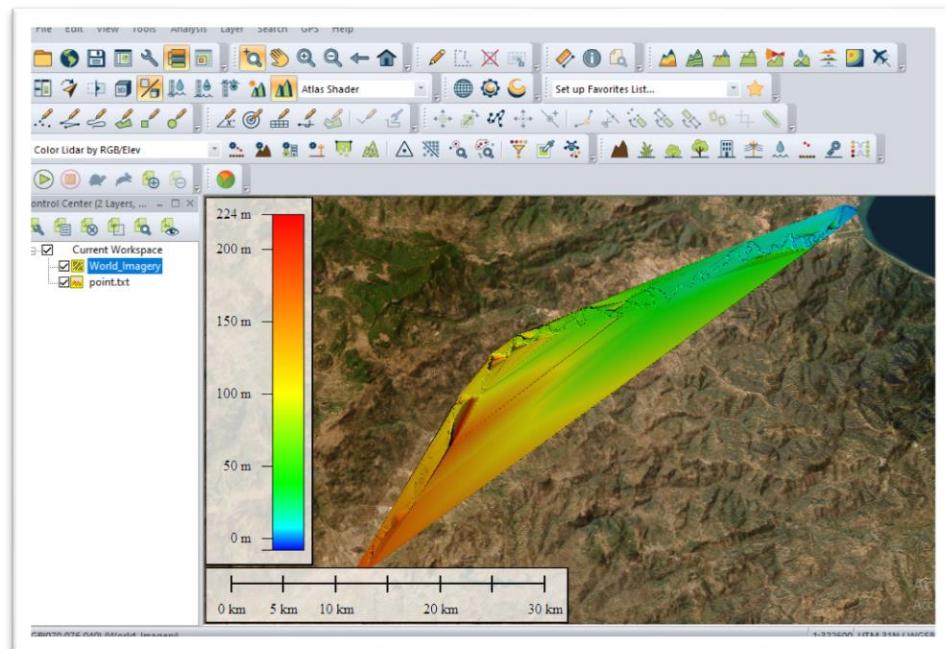


Figure III-5 : Les points topographiques dans le logiciel Global Mapper.

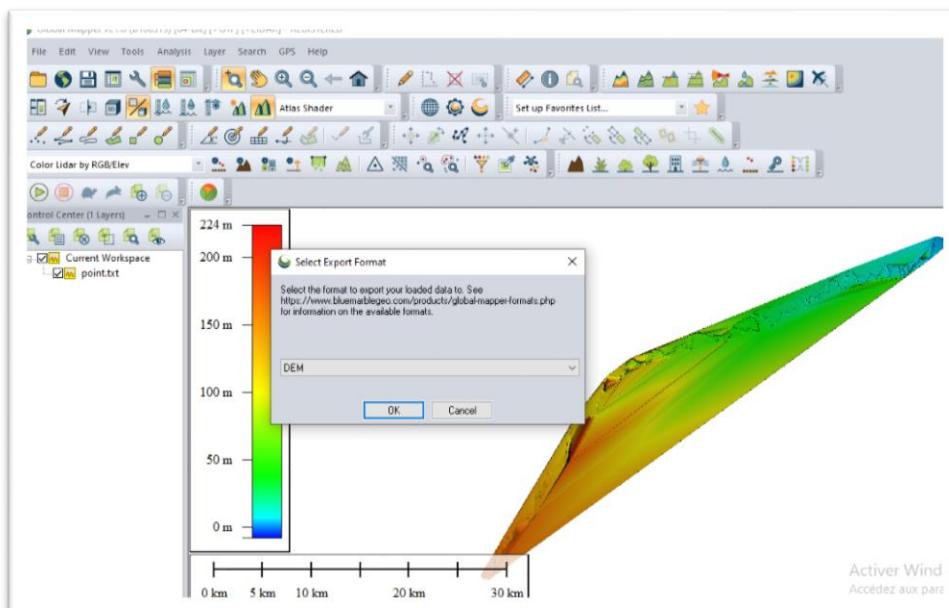


Figure III-6 : Exportation de ce fichier sous l'extension DEM vers HEC-RAS.

- Ouverture du logiciel HEC-RAS et création d'un nouveau projet
 - Option → Unit system → System International → File → New Project → Title (donner un nom au projet : Modèle naturel).

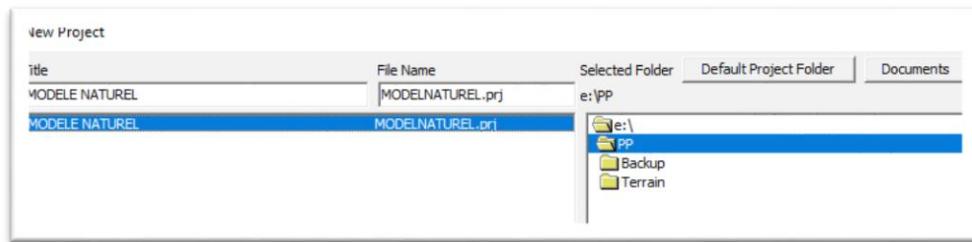


Figure III-7 :Création d'un nouveau projet ".prj" sur HEC-RAS .

- Importation de la géométrie Data ainsi que la répartition du coefficient de Manning.
 - Cross section Data (Vérification des sections) → File → Save Geometry Data.

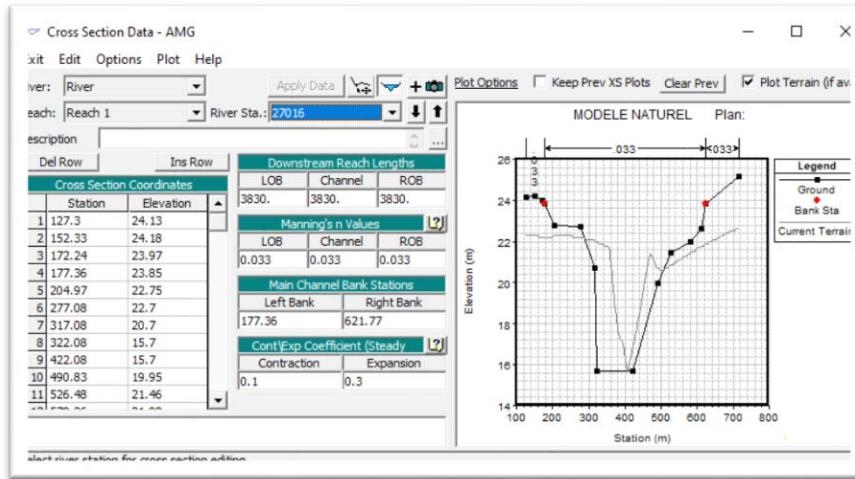


Figure III-8: Illustration d'un profil en travers sur HEC-RAS (avant simulation).

b) Modélisation de l'écoulement :

Pour cette étape nous allons introduire les différents débits maximums (30 débit) correspondants à chaque sous bassin versant et à différentes périodes de retour et les conditions aux limites de l'écoulement.

Les débits employés, on les a calculés dans le chapitre précédent, quant aux conditions aux limites, on a opté pour la profondeur critique en aval de tous les profils.

- Steady Flow Data → Number of Profiles → Apply Data.
- Reach Boundary Conditions → Critical Depth (Down Stream) → Apply Data.

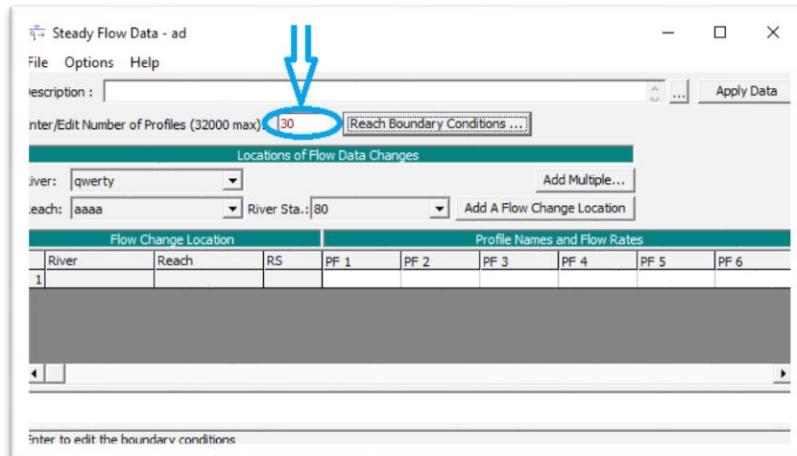


Figure III-9 :Insertion des débits.

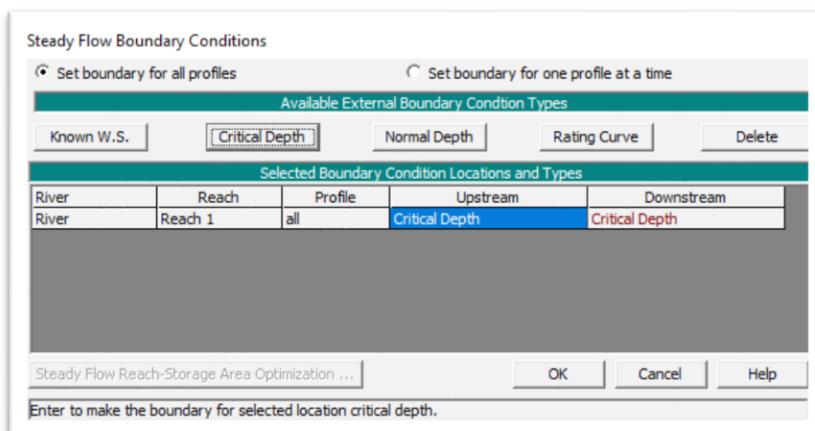


Figure III-10 : Les conditions aux limites de l'écoulement.

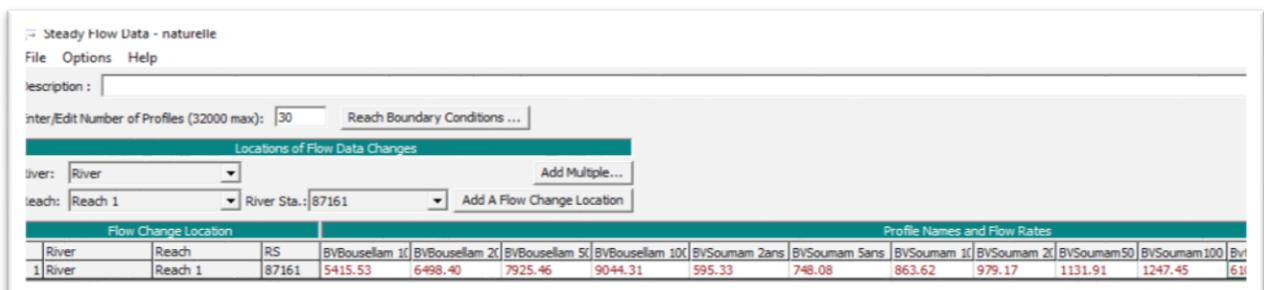


Figure III-11 : Insertion des different débit.

c) Lancement de la simulation :

Cette étape consiste à choisir le régime d'écoulement pour lancer la simulation.

- Steady Flow Analysis → New Plan → Flow Regime → Mixed → Compute

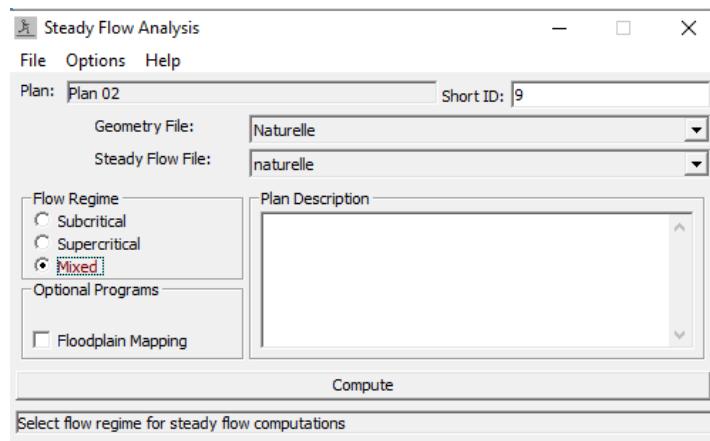


Figure III-12 : Choix du régime d'écoulement mixte (fluvial et torrentiel)

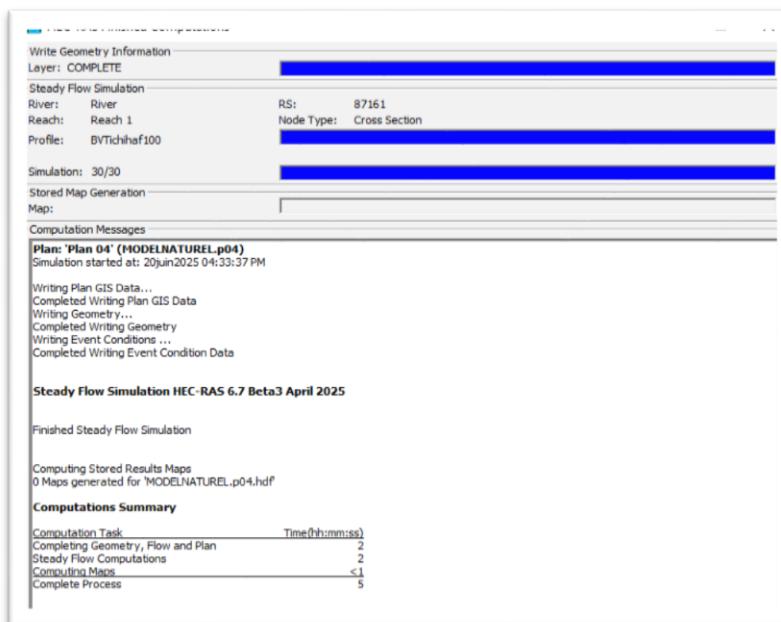


Figure III-13 : Lancement de la simulation.

d) Visualisation des résultats :

Cette dernière étape permet de visualiser l'écoulement, tandis que les résultats des calculs sont présentés sous forme de graphes et/ou de tableaux et cela pour chaque tronçon.

➤ Résultats de simulation des profils en travers à l'état naturel :

Le profil en travers d'un cours d'eau correspond à une coupe perpendiculaire à son axe, obtenue à ne partir de points topographiques relevés sur le terrain. Ces profils permettent d'analyser la morphologie du lit ainsi que l'état des berges. Dans HEC-RAS, il est possible de visualiser ces sections transversales en cliquant sur l'option « View Cross Section », comme illustré dans les figures ci-après :

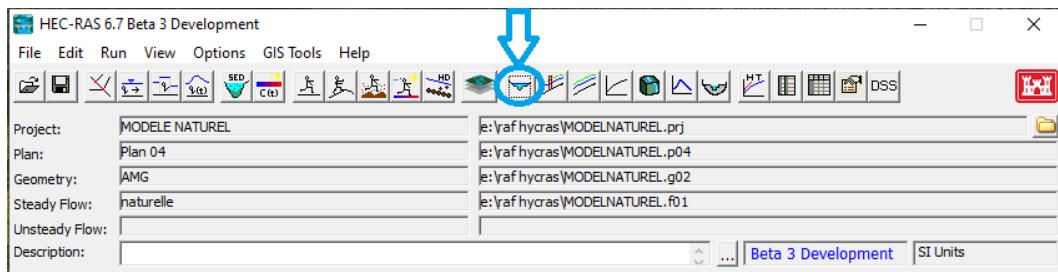


Figure III-14 : Fenêtre principale du HEC-RAS et visualisation des coupes transversales.

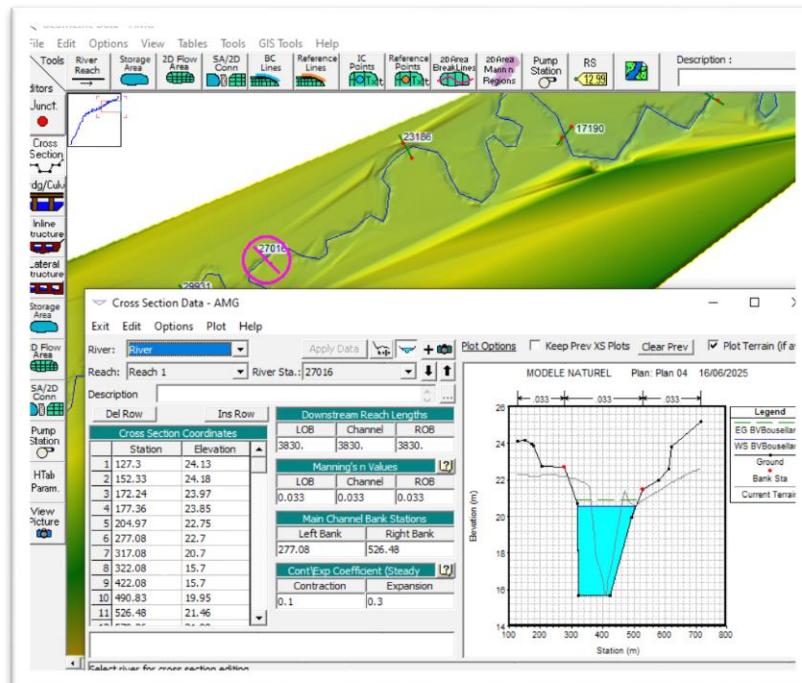


Figure III-15 : Illustration d'un profil en travers sur HEC-RAS (après simulation).

- Les profils en travers des quelques stations sont présentées dans l'**annexe 09**.

➤ **Résultats de la simulation des profils en long à l'état naturel :**

Pour visualiser les profils en long, on clique sur « View profiles ».

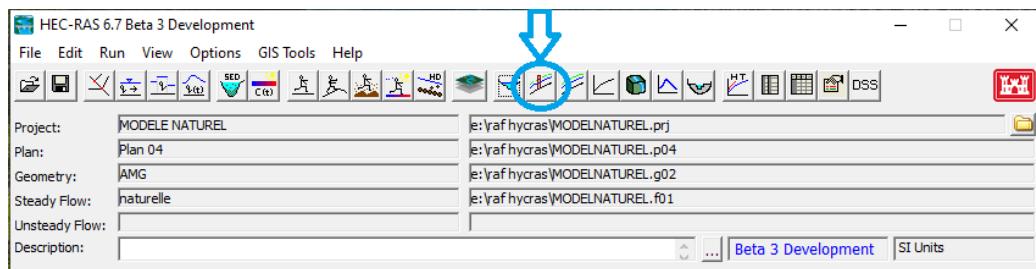


Figure III-16 : Fenêtre principale du HEC-RAS et visualisation des profils en long.

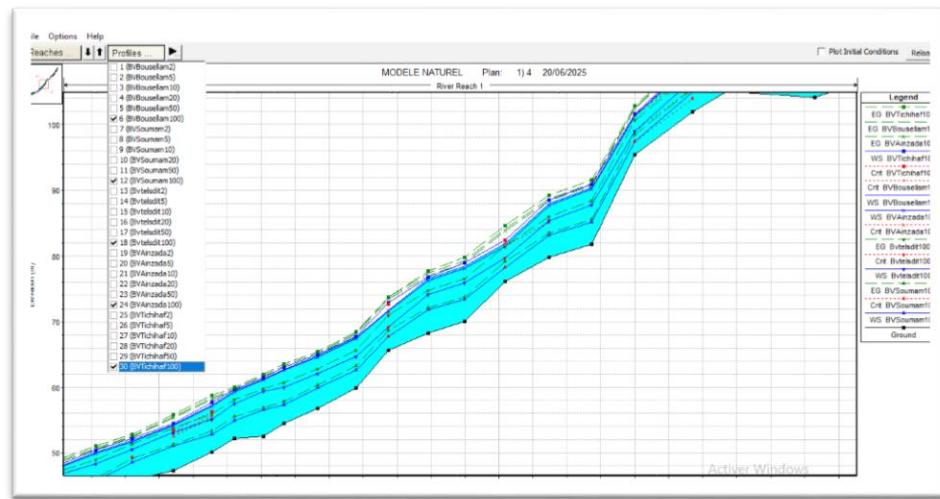


Figure III-17 : Le profil en long de l'Oued à l'état naturel pour les débit de 100 ans donnée par le modèle HEC-RAS.

➤ Visualisation en 3D de la simulation par le logiciel HEC-RAS :

Pour une visualisation 3D de cette simulation : View → (X-Y-Z) Perspective Plots.

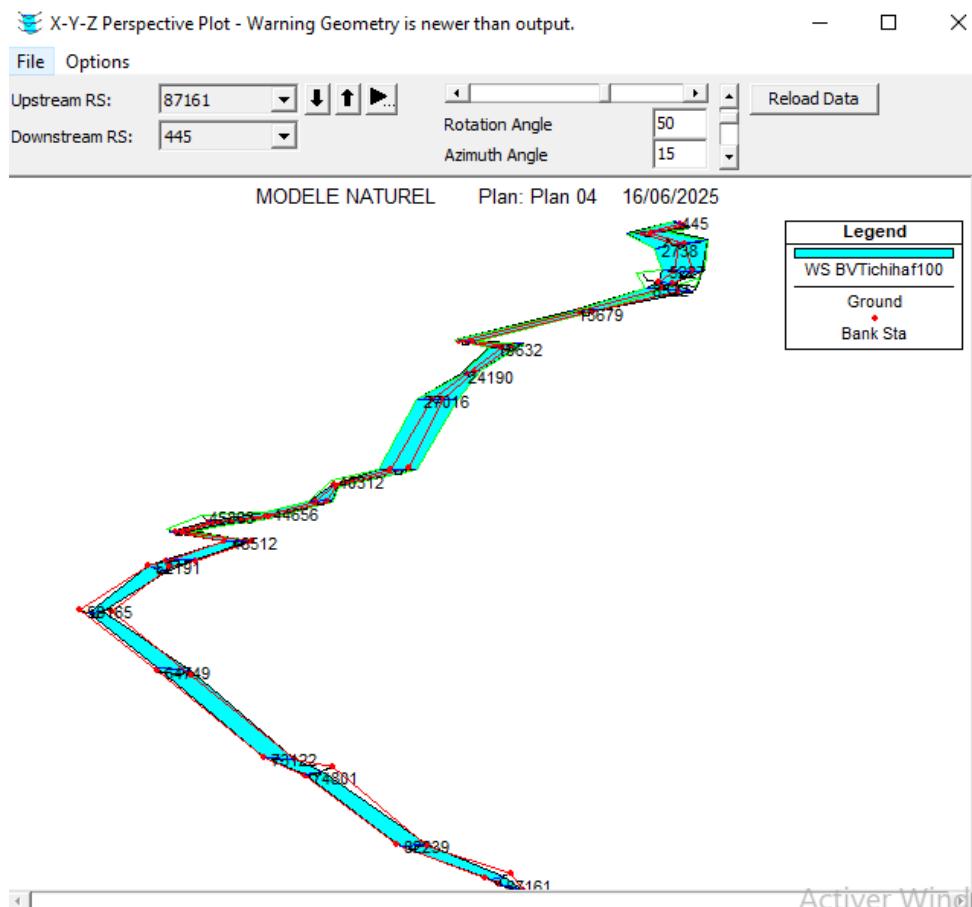


Figure III-18 : Visualisation en 3D de la simulation du débit de 100 ans pour le B.V de tichy-haf.

- Les vues en 3D du logiciel HEC-RAS des autres bassins versant dans l'annexe 10.

e) Résultats de la simulation :

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de tableaux récapitulatifs regroupant les principaux paramètres hydrauliques pour chaque station le long du cours d'eau étudié. Ces données permettent de caractériser le régime d'écoulement dans chaque section à travers plusieurs indicateurs, notamment :

- Le débit de crue en m^3/s ;
- La cote du radier en m ;
- La hauteur de la ligne d'eau en m ;
- La hauteur de la ligne critique en m ;
- La hauteur de la ligne d'énergie en m ;
- La pente de la ligne d'énergie en m/m ;
- La vitesse d'écoulement en m/s ;
- La surface mouillée en m^2/s ;
- Le périmètre mouillé en m ;
- Le nombre de Froude.

L'ensemble de ces résultats est consigné de manière détaillée dans le tableau figurant en **Annexe 11**.

III.4 Conclusion :

Après simulation du modèle naturel et visualisation de l'écoulement, avec différents débits pour différentes périodes de retour. On a pu avoir des résultats pour différentes sections.

On constate que le régime d'écoulement varie avec la variation de la vitesse, de la pente et de la surface mouillée.

L'utilisation de HEC-RAS, nous a permis d'avoir des niveaux d'eau à plusieurs points du lit de l'Oued Soummam et avions remarqué des débordements, cependant une partie de l'Oued Soummam est envahie par les débordements.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté vise à faire une simulation hydrodynamique de l'écoulement dans l'Oued Soummam et ceci pour différents débits présentés par chacun des sous bassins versants et pour différentes périodes de retour. Pour cela, l'approche utilisée vise à collecter et reconstituer le plus possible de données nécessaires.

Le bassin versant de l'Oued Soummam, situé à l'aval du bassin versant de la Soummam au Nord-Est de l'Algérie. Cette région au climat méditerranéen se caractérise par des étés chauds et secs et par des hivers doux à frais, humide.

La partie aval du bassin versant de la Soummam est confrontée aux inondations. Pour cela nous avons fait appel à l'analyse des séries pluviométriques pour la détermination des débits de crue correspondants à chaque période de retour pour enfin détecter les débits pouvant causer des dégâts.

L'utilisation du logiciel HEC-RAS, nous a permis de visualiser les niveaux de la ligne d'eau à plusieurs points du lit de l'Oued Soummam tout en indiquant les régimes d'écoulement dans chaque section pour chaque période de retour. Avec ces résultats, on pourra visualiser les zones envahies par les inondations. Les crues centennales engendrent des débordements les plus importants.

Notre modélisation est faite mis à part de la modélisation des ouvrages, d'aménagement hydraulique. Notre objectif est de dégager une première compréhension du comportement hydraulique de l'Oued.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Collecte de données de la direction des ressources hydrauliques, 1a. Wilaya de Bejaïa, JAN 2015
- [2] **BENBOUZIANE Zoulikha.** Mémoire de Magister : gestion de la ressource en eau du projet. MAO. Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf-Oran.2015.
- [3] **AMOUR Abdellah.** Mémoire de Magister : Caractérisation des crues pluviales des sous bassins versants de la Soummam. Université Abderrahmane MIRA de Bejaia.
- [4] **KETROUCI Khadidja.** Thèse doctorat : Application de modèles hydrologiques dans l'estimation des crues extrêmes en Algérie. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF. 2014
- [5] **LABORDE, J. P.** Éléments d'hydrologie de surface. Université de Nice-Sophia Antipolis. France (204p), 2000.
- [6] Les données du bureau d'ingénieur en hydraulique **OULEBSIR Rafik.**
- [7] **TOUAIBIA. B**, Manuel pratique d'hydrologie. Presses Madani Frères. Blida, Algérie.
- [8] **IRATNI Nawal**, 2014. Mémoire magister. Modélisation hydrologique de quelques sous bassins versants de la Tafna. Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- [9] **MAHTOUT Rahim et AMRANI Thinhinane**,2021. CONTRIBUTION À L'ÉTUDE D'AMÉNAGEMENT DE OUED TIFRIT, COMMUNE D'AKBOU, WILAYA DE BEJAIA. Université Abderrahmane MIRA de Bejaia.
- [10] **AFRICAN GEOSYSTEM COMPANY**, Société d'Ingénierie et d'études Techniques, 2010, « réparation des dégâts causés par les intempéries aux réseaux d'assainissement et traitement des Oueds, Lot 1 : Oued IBOUHATHMEN, Lot 2 : Oued SEGOUIL, Lot 3 : Oued N'DFALI », direction des ressources en eau, Wilaya de Bejaia.
- [11] **Gary W. Brunner**, février 2016. HEC-RAS, River Analysis System hydraulic manual.

Sites internet :

- <http://Wikigeotech.developpement-durable.gouv.fr>
- <https://elearning-deprecated.univ-annaba.dz>

Annexes

Annexe 01 : Les séries pluviométrique :

Série des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de l'Aéroport.

AEROPORT 15 10							
Année	Pj.max	Année	Pj.max	Année	Pj.max	Année	Pj.max
1987	113.9	1994	60.7	2001	90.1	2008	58
1988	46.1	1995	48.8	2002	136.8	2009	74
1989	47.9	1996	42.1	2003	49.4	2010	78.6
1990	60.8	1997	82.7	2004	63.4	2011	50.7
1991	79.9	1998	66.3	2005	63.3		
1992	72.2	1999	58.8	2006	49.3		
1993	39.5	2000	31.2	2007	56.7		

Série des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Boubirek.

BOUBIREK 15 07 03							
Année	Pj.max	Année	Pj.max	Année	Pj.max	Année	Pj.max
1968	50.2	1977	93	1986	172	1995	199.8
1969	177.8	1978	109.3	1987	89	1996	55.7
1970	139.7	1979	99.5	1988	75.5	1997	189.8
1971	201.9	1980	256.5	1989	85.8	1998	101.2
1972	197.5	1981	184.1	1990	158.4	1999	137.2
1973	146.6	1982	138.7	1991	103.6	2000	157
1974	98.7	1983	174.7	1992	173.3		
1975	168.9	1984	177	1993	84.1		
1976	109.7	1985	91.8	1994	203.3		

Série des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Bouira Coulogny.

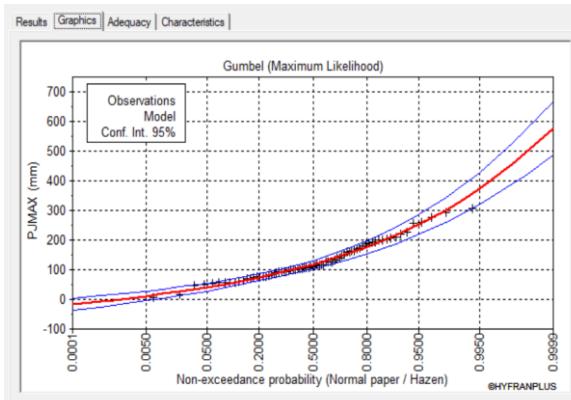
BOUIRA COULOGNY 15 06 08							
Année	Pj.max	Année	Pj.max	Année	Pj.max	Année	Pj.max
1911	66	1933	130.4	1955	115.1	1977	74.1
1912	94	1934	143.2	1956	52	1978	69.3
1913	109.3	1935	161.4	1957	178.8	1979	103.09
1914	145.2	1936	81.2	1958	94.2	1980	101.2
1915	157.2	1937	114.8	1959	107.3	1981	91.9
1916	153.6	1938	103.09	1960	90.8	1982	76.1
1917	125.2	1939	103.09	1961	147.2	1983	114.4
1918	174.5	1940	103.09	1962	45.7	1984	104.8
1919	60.1	1941	103.09	1963	67.3	1985	82.6
1920	124.6	1942	49.8	1964	103.09	1986	117.9
1921	88	1943	77	1965	103.09	1987	56.5
1922	144.2	1944	124.5	1966	103.09	1988	154.4
1923	82.9	1945	99.6	1967	103.09	1989	65
1924	62.9	1946	239.6	1968	58.3	1990	110.3
1925	126.8	1947	144.4	1969	97.1	1991	84.4

1926	99.9	1948	164.8	1970	56.6	1992	124.8
1927	98.8	1949	71.4	1971	112.6	1993	76.6
1928	129.6	1950	105.2	1972	77	1994	91.9
1929	104.3	1951	123.4	1973	114.1	1995	95.3
1930	139.4	1952	87	1974	87.9	1996	41.1
1931	164.5	1953	115.3	1975	95.7	1997	88.8
1932	84.9	1954	97.4	1976	66.3	1998	121.6

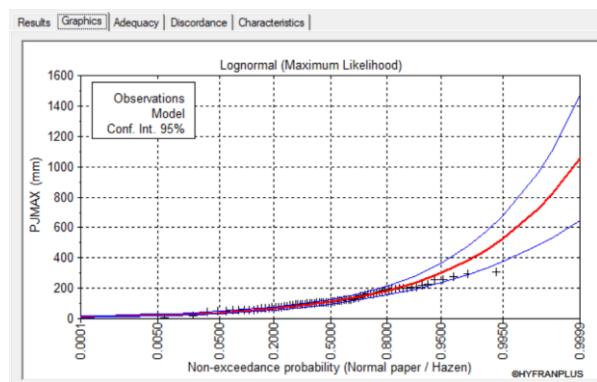
Série des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Bouira.

BOUIRA 15 01 05							
Année	Pj.max	Année	Pj.max	Année	Pj.max	Année	Pj.max
1904	45.2	1924	76.8	1944	50.6	1964	109.1
1905	16.3	1925	117.8	1945	110.9	1965	150.3
1906	71.3	1926	193.4	1946	108.3	1966	91.9
1907	7	1927	195	1947	76.8	1967	147.6
1908	71.7	1928	209.7	1948	98.5	1968	97.2
1909	63.5	1929	99.1	1949	59.6	1969	201.2
1910	170.6	1930	227.8	1950	139.3	1970	115.6
1911	127.95	1931	201.9	1951	117.6	1971	292.5
1912	83	1932	81	1952	77.5	1972	172.7
1913	219.3	1933	133.2	1953	117.5	1973	189
1914	198.6	1934	104.1	1954	91.9	1974	55.5
1915	256.4	1935	105.1	1955	113.1	1975	56.9
1916	308.1	1936	99.2	1956	102.2	1976	107.3
1917	160.7	1937	205.1	1957	188	1977	94.5
1918	275.2	1938	85.5	1958	165	1978	93.5
1919	140.5	1939	90.8	1959	105		
1920	126	1940	58	1960	165		
1921	180.2	1941	52.2	1961	78		
1922	258.8	1942	56.7	1962	127.95		
1923	158.5	1943	69.9	1963	127.95		

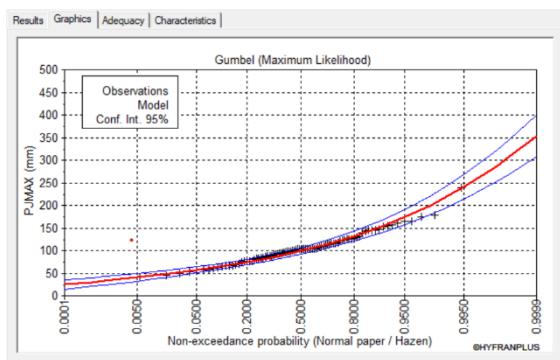
Annexe 02 : Les graphes d'ajustement de la loi log normal et de la loi de Gumbel.



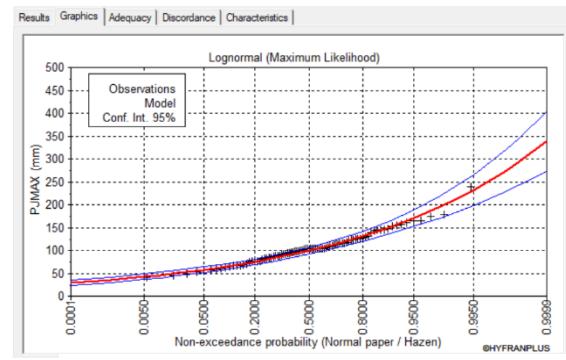
Représentation graphique de l'ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Bouira.



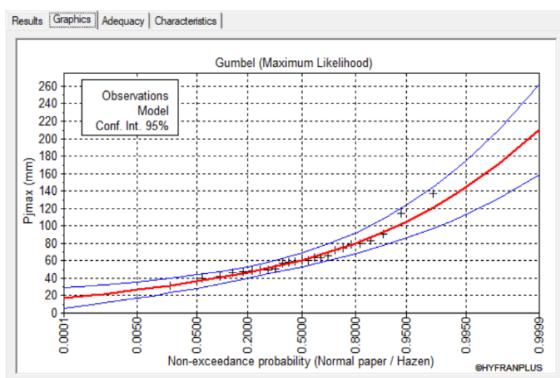
Représentation graphique de l'ajustement à la loi log-normale pour la station de Bouira.



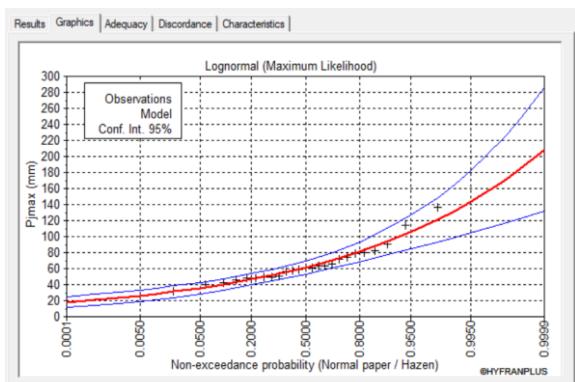
Représentation graphique de l'ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Bouira Coulogny



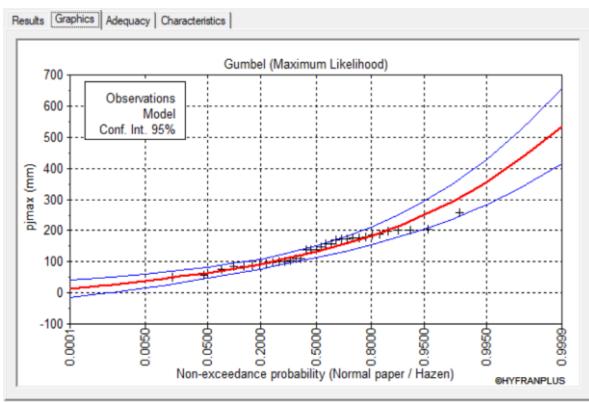
Représentation graphique de l'ajustement à la loi log-normale pour la station de Bouira Coulogny.



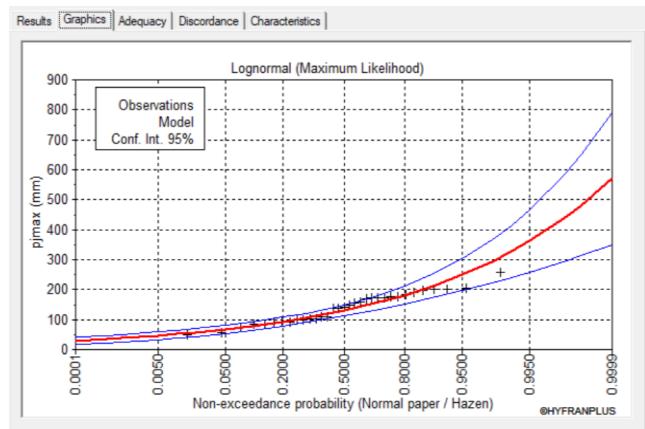
Représentation graphique de l'ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Boubirek.



Représentation graphique de l'ajustement à la loi log-normale pour la station de l'Aéroport.



Représentation graphique de l'ajustement à la loi de Gumbel pour la station de l'Aéroport.



Représentation graphique de l'ajustement à la loi log-normale pour la station de l'Aéroport.

Annexe 03 : Les résultats d'ajustement :

Quantiles théoriques de la loi de Gumbel pour la station de Bouira.

Gumbel				
Période de retour (ans)	Fréquence	Pj.max théoriques (mm)	Écart-type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	577	45.9	487 - 667
2000.0	0.9995	493	38.4	418 - 569
1000.0	0.9990	457	35.1	388 - 526
200.0	0.9950	374	27.7	319 - 428
100.0	0.9900	337	24.4	290 - 385
50.0	0.9800	301	21.3	259 - 343
20.0	0.9500	253	17.1	219 - 286
10.0	0.9000	215	13.9	188 - 243
5.0	0.8000	176	10.8	155 - 198
3.0	0.6667	145	8.63	128 - 162
2.0	0.5000	117	7.04	104 - 131

Quantiles théoriques de la loi de Gumbel pour la station de l'Aéroport.

Gumbel				
Période de retour (ans)	Fréquence	Pj.max théoriques (mm)	Écart-type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	210	26.3	159 - 262
2000.0	0.9995	183	22.0	140 - 226
1000.0	0.9990	171	20.1	132 - 211
200.0	0.9950	144	15.8	113 - 175
100.0	0.9900	132	14.0	105 - 160
50.0	0.9800	121	12.1	96.8 - 144
20.0	0.9500	105	9.72	85.8 - 124
10.0	0.9000	92.7	7.92	77.2 - 108
5.0	0.8000	80.0	6.13	68.0 - 92.1
3.0	0.6667	70.0	4.86	60.4 - 79.5
2.0	0.5000	60.9	3.94	53.2 - 68.6

Quantiles théoriques de la loi log-normale pour la station de Bouira Coulogny.

Log-normale				
Période de retour (ans)	Fréquence	Pj.max théoriques (mm)	Écart-type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	338	33.6	272 - 404
2000.0	0.9995	294	26.3	242 - 345
1000.0	0.9990	275	23.3	229 - 321
200.0	0.9950	232	17.0	199 - 265
100.0	0.9900	214	14.5	185 - 242
50.0	0.9800	195	12.2	172 - 219
20.0	0.9500	171	9.24	153 - 189
10.0	0.9000	151	7.20	137 - 166
5.0	0.8000	131	5.37	120 - 141
3.0	0.6667	114	4.20	106 - 123
2.0	0.5000	99.2	3.49	92.4 - 106

Quantiles théoriques de la loi log-normale pour la station de Boubirek.

Log-normale				
Période de retour (ans)	Fréquence	Pj.max théoriques (mm)	Écart-type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	571	113	350 - 792
2000.0	0.9995	481	85.6	314 - 649
1000.0	0.9990	444	74.9	297 - 591
200.0	0.9950	362	52.8	259 - 466
100.0	0.9900	328	44.2	241 - 415
50.0	0.9800	294	36.3	223 - 365
20.0	0.9500	250	26.8	197 - 303
10.0	0.9000	216	20.4	176 - 256
5.0	0.8000	182	14.7	153 - 210
3.0	0.6667	154	11.2	132 - 176
2.0	0.5000	130	9.00	112 - 148

Annexe 04 : Les Pluies de courte durée :

Pluies de courte durée et intensités maximales de durée t(h) et de période de retour T(ans) du B.V. de la Soummam.

PDR (ans)	2.00		5.00		10.00		20.00		50.00		100.00	
β	0.76											
Pj.max	117.00		176.00		215.00		253.00		301.00		337.00	
t (h)	Ptc	It										
1	7.83	15.65	10.28	20.56	11.91	23.83	13.49	26.99	15.55	31.10	16.96	33.93
1	11.30	11.30	14.84	14.84	17.20	17.20	19.48	19.48	22.45	22.45	24.49	24.49
2	16.32	8.16	21.44	10.72	24.84	12.42	28.13	14.07	32.42	16.21	35.37	17.68
3	20.23	6.74	26.57	8.86	30.79	10.26	34.88	11.63	40.19	13.40	43.85	14.62
4	23.56	5.89	30.95	7.74	35.86	8.97	40.62	10.16	46.81	11.70	51.07	12.77
5	26.52	5.30	34.84	6.97	40.37	8.07	45.72	9.14	52.69	10.54	57.48	11.50
6	29.21	4.87	38.37	6.40	44.46	7.41	50.36	8.39	58.04	9.67	63.31	10.55
7	31.70	4.53	41.64	5.95	48.25	6.89	54.65	7.81	62.98	9.00	68.70	9.81
8	34.02	4.25	44.69	5.59	51.79	6.47	58.66	7.33	67.59	8.45	73.74	9.22
8.89	35.98	4.05	47.26	5.32	54.76	6.16	62.03	6.98	71.48	8.04	77.98	8.77
9	36.21	4.02	47.57	5.29	55.12	6.12	62.43	6.94	71.95	7.99	78.49	8.72
10	38.29	3.83	50.30	5.03	58.29	5.83	66.02	6.60	76.08	7.61	83.00	8.30
11	40.28	3.66	52.91	4.81	61.31	5.57	69.44	6.31	80.02	7.27	87.30	7.94
12	42.18	3.51	55.40	4.62	64.20	5.35	72.72	6.06	83.80	6.98	91.42	7.62
13	44.00	3.38	57.81	4.45	66.98	5.15	75.87	5.84	87.43	6.73	95.38	7.34
14	45.77	3.27	60.12	4.29	69.67	4.98	78.91	5.64	90.93	6.50	99.20	7.09
15	47.47	3.16	62.36	4.16	72.26	4.82	81.85	5.46	94.32	6.29	102.89	6.86
16	49.12	3.07	64.53	4.03	74.77	4.67	84.70	5.29	97.60	6.10	106.47	6.65
17	50.73	2.98	66.64	3.92	77.22	4.54	87.46	5.14	100.79	5.93	109.95	6.47
18	52.29	2.90	68.69	3.82	79.59	4.42	90.15	5.01	103.89	5.77	113.33	6.30
19	53.81	2.83	70.68	3.72	81.90	4.31	92.77	4.88	106.91	5.63	116.63	6.14
20	55.29	2.76	72.63	3.63	84.16	4.21	95.33	4.77	109.85	5.49	119.84	5.99
21	56.74	2.70	74.53	3.55	86.37	4.11	97.83	4.66	112.73	5.37	122.98	5.86
22	58.16	2.64	76.39	3.47	88.52	4.02	100.27	4.56	115.55	5.25	126.05	5.73
23	59.54	2.59	78.22	3.40	90.63	3.94	102.66	4.46	118.30	5.14	129.06	5.61
24	60.90	2.54	80.00	3.33	92.70	3.86	105.00	4.38	121.00	5.04	132.00	5.50

Pluies de courte durée et intensités maximales de durée t(h) et de période de retour T(ans) du B.V. de Ain zada.

PDR (ans)	2.00		5.00		10.00		20.00		50.00		100.00	
β	0.76											
Pj.max	117.00		176.00		215.00		253.00		301.00		337.00	
t (h)	Ptc	It										
0.50	7.71	15.41	10.18	20.36	11.73	23.46	13.29	26.57	15.15	30.30	16.63	33.25
1.00	12.18	12.18	16.08	16.08	18.54	18.54	20.99	20.99	23.94	23.94	26.27	26.27
2.00	19.24	9.62	25.41	12.71	29.29	14.64	33.17	16.58	37.82	18.91	41.51	20.76
3.00	25.15	8.38	33.21	11.07	38.28	12.76	43.35	14.45	49.43	16.48	54.25	18.08
4.00	30.40	7.60	40.15	10.04	46.28	11.57	52.41	13.10	59.77	14.94	65.59	16.40
5.00	35.23	7.05	46.52	9.30	53.62	10.72	60.73	12.15	69.25	13.85	76.00	15.20
6.00	39.73	6.62	52.47	8.75	60.48	10.08	68.49	11.42	78.10	13.02	85.71	14.29
7.00	43.99	6.28	58.09	8.30	66.96	9.57	75.83	10.83	86.47	12.35	94.89	13.56
7.02	44.07	6.28	58.20	8.29	67.08	9.56	75.97	10.82	86.63	12.34	95.07	13.54
8.00	48.04	6.01	63.44	7.93	73.13	9.14	82.81	10.35	94.44	11.80	103.64	12.95
9.00	51.92	5.77	68.57	7.62	79.04	8.78	89.51	9.95	102.07	11.34	112.01	12.45
10.00	55.66	5.57	73.51	7.35	84.73	8.47	95.95	9.60	109.42	10.94	120.08	12.01
11.00	59.28	5.39	78.28	7.12	90.23	8.20	102.18	9.29	116.52	10.59	127.88	11.63
12.00	62.78	5.23	82.91	6.91	95.56	7.96	108.22	9.02	123.41	10.28	135.44	11.29
13.00	66.19	5.09	87.40	6.72	100.75	7.75	114.09	8.78	130.11	10.01	142.78	10.98
14.00	69.51	4.96	91.79	6.56	105.80	7.56	119.81	8.56	136.63	9.76	149.94	10.71
15.00	72.74	4.85	96.06	6.40	110.73	7.38	125.39	8.36	142.99	9.53	156.93	10.46
16.00	75.91	4.74	100.24	6.27	115.55	7.22	130.85	8.18	149.22	9.33	163.75	10.23
17.00	79.01	4.65	104.33	6.14	120.26	7.07	136.19	8.01	155.31	9.14	170.44	10.03
18.00	82.04	4.56	108.35	6.02	124.89	6.94	141.43	7.86	161.28	8.96	176.99	9.83
19.00	85.03	4.48	112.28	5.91	129.42	6.81	146.57	7.71	167.14	8.80	183.42	9.65
20.00	87.95	4.40	116.15	5.81	133.88	6.69	151.61	7.58	172.89	8.64	189.74	9.49
21.00	90.83	4.33	119.95	5.71	138.26	6.58	156.57	7.46	178.55	8.50	195.95	9.33
22.00	93.66	4.26	123.69	5.62	142.57	6.48	161.46	7.34	184.12	8.37	202.06	9.18
23.00	96.45	4.19	127.37	5.54	146.82	6.38	166.26	7.23	189.60	8.24	208.07	9.05
24.00	99.20	4.13	131.00	5.46	151.00	6.29	171.00	7.13	195.00	8.13	214.00	8.92

Pluies de courte durée et intensités maximales de durée t(h) et de période de retour T(ans) du B.V. Bousellam et B.V. du barrage Tichy-haf.

PDR (ans)	2.00		5.00		10.00		20.00		50.00		100.00	
β	0.76											
Pj.max	117.00		176.00		215.00		253.00		301.00		337.00	
t (h)	Ptc	It										
0.50	6.86	13.72	9.60	19.20	11.39	22.79	13.19	26.38	15.51	31.02	17.30	34.61
1.00	11.61	11.61	16.26	16.26	19.30	19.30	22.33	22.33	26.27	26.27	29.30	29.30
2.00	19.67	9.83	27.54	13.77	32.68	16.34	37.82	18.91	44.48	22.24	49.62	24.81
3.00	26.77	8.92	37.47	12.49	44.47	14.82	51.47	17.16	60.53	20.18	67.53	22.51
4.00	33.31	8.33	46.63	11.66	55.34	13.84	64.05	16.01	75.33	18.83	84.04	21.01
5.00	39.46	7.89	55.25	11.05	65.57	13.11	75.89	15.18	89.25	17.85	99.57	19.91
6.00	45.33	7.55	63.46	10.58	75.32	12.55	87.17	14.53	102.51	17.09	114.37	19.06
7.00	50.96	7.28	71.35	10.19	84.68	12.10	98.01	14.00	115.26	16.47	128.58	18.37
8.00	56.41	7.05	78.97	9.87	93.72	11.72	108.47	13.56	127.57	15.95	142.32	17.79
9.00	61.69	6.85	86.36	9.60	102.50	11.39	118.63	13.18	139.51	15.50	155.65	17.29
10.00	66.83	6.68	93.56	9.36	111.04	11.10	128.52	12.85	151.14	15.11	168.62	16.86
11.00	71.85	6.53	100.59	9.14	119.39	10.85	138.18	12.56	162.50	14.77	181.29	16.48
12.00	76.76	6.40	107.47	8.96	127.55	10.63	147.62	12.30	173.61	14.47	193.68	16.14
12.87	80.96	6.29	113.34	8.81	134.52	10.45	155.69	12.10	183.09	14.23	204.26	15.87
13.00	81.58	6.28	114.21	8.79	135.55	10.43	156.88	12.07	184.49	14.19	205.83	15.83
14.00	86.31	6.16	120.83	8.63	143.40	10.24	165.97	11.86	195.18	13.94	217.76	15.55
15.00	90.95	6.06	127.33	8.49	151.12	10.07	174.91	11.66	205.69	13.71	229.48	15.30
16.00	95.52	5.97	133.73	8.36	158.72	9.92	183.70	11.48	216.03	13.50	241.02	15.06
16.97	99.89	5.89	139.85	8.24	165.98	9.78	192.10	11.32	225.91	13.31	252.04	14.85
17.00	100.03	5.88	140.04	8.24	166.20	9.78	192.36	11.32	226.22	13.31	252.38	14.85
18.00	104.47	5.80	146.26	8.13	173.58	9.64	200.90	11.16	236.26	13.13	263.58	14.64
19.00	108.85	5.73	152.39	8.02	180.86	9.52	209.33	11.02	246.17	12.96	274.64	14.45
20.00	113.18	5.66	158.45	7.92	188.05	9.40	217.65	10.88	255.96	12.80	285.56	14.28
21.00	117.45	5.59	164.44	7.83	195.16	9.29	225.87	10.76	265.63	12.65	296.35	14.11
22.00	121.68	5.53	170.35	7.74	202.18	9.19	234.00	10.64	275.19	12.51	307.01	13.96
23.00	125.86	5.47	176.21	7.66	209.13	9.09	242.04	10.52	284.64	12.38	317.56	13.81
24.00	130.00	5.42	182.00	7.58	216.00	9.00	250.00	10.42	294.00	12.25	328.00	13.67

Pluies de courte durée et intensités maximales de durée t(h) et de période de retour T(ans) du B.V de Tilesdit.

PDR (ans)	2.00		5.00		10.00		20.00		50.00		100.00	
β	0.76											
Pj.max	117.00		176.00		215.00		253.00		301.00		337.00	
t (h)	Ptc	It										
0.50	6.17	12.34	9.28	18.57	11.34	22.68	13.35	26.69	15.88	31.76	17.78	35.56
1.00	10.45	10.45	15.72	15.72	19.21	19.21	22.60	22.60	26.89	26.89	30.11	30.11
2.00	17.70	8.85	26.63	13.31	32.53	16.26	38.28	19.14	45.54	22.77	50.99	25.49
3.00	24.09	8.03	36.24	12.08	44.27	14.76	52.09	17.36	61.98	20.66	69.39	23.13
4.00	29.98	7.49	45.09	11.27	55.09	13.77	64.82	16.21	77.12	19.28	86.34	21.59
5.00	35.52	7.10	53.43	10.69	65.27	13.05	76.80	15.36	91.37	18.27	102.30	20.46
5.76	39.55	6.87	59.49	10.33	72.68	12.62	85.52	14.85	101.75	17.66	113.92	19.78
6.00	40.80	6.80	61.37	10.23	74.97	12.49	88.22	14.70	104.95	17.49	117.51	19.58
7.00	45.87	6.55	69.00	9.86	84.29	12.04	99.18	14.17	118.00	16.86	132.11	18.87
8.00	50.77	6.35	76.37	9.55	93.29	11.66	109.78	13.72	130.60	16.33	146.22	18.28
9.00	55.52	6.17	83.52	9.28	102.02	11.34	120.06	13.34	142.83	15.87	159.92	17.77
10.00	60.15	6.01	90.48	9.05	110.53	11.05	130.06	13.01	154.74	15.47	173.25	17.32
11.00	64.67	5.88	97.28	8.84	118.83	10.80	139.84	12.71	166.37	15.12	186.26	16.93
12.00	69.09	5.76	103.93	8.66	126.96	10.58	149.40	12.45	177.74	14.81	199.00	16.58
13.00	73.42	5.65	110.45	8.50	134.92	10.38	158.77	12.21	188.89	14.53	211.48	16.27
14.00	77.68	5.55	116.84	8.35	142.74	10.20	167.96	12.00	199.83	14.27	223.73	15.98
15.00	81.86	5.46	123.13	8.21	150.42	10.03	177.01	11.80	210.59	14.04	235.78	15.72
16.00	85.97	5.37	129.33	8.08	157.98	9.87	185.91	11.62	221.18	13.82	247.63	15.48
17.00	90.03	5.30	135.42	7.97	165.43	9.73	194.67	11.45	231.60	13.62	259.30	15.25
18.00	94.02	5.22	141.44	7.86	172.78	9.60	203.31	11.30	241.89	13.44	270.82	15.05
19.00	97.97	5.16	147.37	7.76	180.02	9.47	211.84	11.15	252.03	13.26	282.18	14.85
20.00	101.86	5.09	153.23	7.66	187.18	9.36	220.26	11.01	262.05	13.10	293.39	14.67
21.00	105.71	5.03	159.02	7.57	194.25	9.25	228.58	10.88	271.95	12.95	304.48	14.50
22.00	109.51	4.98	164.74	7.49	201.24	9.15	236.81	10.76	281.74	12.81	315.44	14.34
23.00	113.28	4.93	170.40	7.41	208.16	9.05	244.95	10.65	291.42	12.67	326.27	14.19
24.00	117.00	4.88	176.00	7.33	215.00	8.96	253.00	10.54	301.00	12.54	337.00	14.04

Annex 05 : Caractéristiques de l'écoulement :

Résultats des paramètres d'écoulement pour le sous B.V Tilesdit.

BOUIRA		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
Volume A0	(Hm ³)	59.78	53.09	46.58
Module d' écoulement Me	(l/s)	1895.69	1683.55	1477.15
Module d' écoulement Spécifique Ms	(l/s/km ²)	2.30	2.04	1.79
Débit	(m ³ /s)	1.90	1.68	1.48
Lame d' eau éoulée Le	(mm)	72.47	64.36	56.47
Coefficient d' écoulement Ce		0.14	0.12	0.11
Coefficient de variation Cv	ANTONOV	0.34	0.34	0.34
	OURKGUIP ROVODKHOZ	0.78	0.77	0.75
	SOKOLOVSKY	α	0.68	0.69
		Cv	0.49	0.51
	KRISTEKLY MENKEL		0.44	0.46
	Moyenne		0.51	0.52

Résultats des paramètres d'écoulement pour le B.V. du barrage Ain zada.

BOUIRA COULOGNY		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
Volume A0	(Hm ³)	90.33	93.01	72.50
Module d' écoulement Me	(l/s)	2864.37	2949.19	2298.93
Module d' écoulement Spécifique Ms	(l/s/km ²)	1.44	1.48	1.16
Débit	(m ³ /s)	2.86	2.95	2.30
Lame d' eau éoulée Le	(mm)	45.38	46.73	36.42
Coefficient d' écoulement Ce		0.10	0.10	0.08
Coefficient de variation Cv	ANTONOV	0.32	0.32	0.32
	OURKGUIP ROVODKHOZ	0.73	0.74	0.71
	SOKOLOVSKY	α	0.73	0.73
		Cv	0.53	0.52
	KRISTEKLY MENKEL		0.48	0.47
	Moyenne		0.51	0.51

Résultats des paramètres d'écoulement pour le B.V. du barrage Tichy-haf

BOUBIREK (Tichi-haf)		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
Volume A0	(Hm ³)	271.91	149.42	168.16
Module d' écoulement Me	(l/s)	8622.32	4738.23	5332.42
Module d' écoulement Spécifique Ms	(l/s/km ²)	2.19	1.20	1.35
Débit	(m ³ /s)	8.62	4.74	5.33
Lame d' eau éoulée Le	(mm)	68.99	37.91	42.66
Coefficient d' écoulement Ce		0.13	0.07	0.08
Coefficient de variation Cv	ANTONOV	0.31	0.31	0.31
	OURKGUIP ROVODKHOZ	0.77	0.72	0.73
	SOKOLOVSKY	α	0.68	0.76
		Cv	0.45	0.53
	KRISTEKLY MENKEL		0.41	0.48
	Moyenne		0.49	0.51

Résultats des paramètres d'écoulement pour le sous B.V. Bousselam

BOUBIREK (Bousselam)		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
Volume A0	(Hm ³)	289.04	152.65	176.94
Module d' écoulement Me	(l/s)	9165.47	4840.45	5610.60
Module d' écoulement Spécifique Ms	(l/s/km ²)	2.20	1.16	1.34
Débit	(m ³ /s)	9.17	4.84	5.61
Lame d' eau éoulée Le	(mm)	69.22	36.56	42.37
Coefficient d' écoulement Ce		0.13	0.07	0.08
Coefficient de variation Cv	ANTONOV	0.31	0.31	0.31
	OURKGUIP ROVODKHOZ	0.77	0.71	0.73
	SOKOLOVSKY	α	0.68	0.76
		Cv	0.45	0.53
	KRISTEKLY MENKEL		0.41	0.48
	Moyenne		0.48	0.51

Résultats des paramètres d'écoulement pour le sous B.V. de l'oued Soummam.

AEROPORT		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
Volume A0	(Hm ³)	0.08	34.25	9.76
Module d' écoulement Me	(l/s)	2.51	1086.00	309.47
Module d' écoulement Spécifique Ms	(l/s/km ²)	0.002	0.99	0.28
Débit	(m ³ /s)	0.003	1.09	0.31
Lame d' eau éoulée Le	(mm)	0.07	31.10	8.86
Coefficient d' écoulement Ce		0.0003	0.12	0.03
Coefficient de variation Cv	ANTONOV	0.33	0.34	0.34
	OURKGUIP ROVODKHOZ	0.32	0.70	0.60
	SOKOLOVSKY	α	1.55	0.78
		Cv	1.35	0.60
	KRISTEKLY MENKEL		2.82	0.56
	Moyenne		1.21	0.55

Annexe 06 : Transport solide :

: Récapitulatif des résultats des calculs du transport solide pour le B.V. du barrage Tilesdit.

BOUIRA		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
		Lame d'eau Le (mm)		
Formule		72.47	64.36	56.47
SOGREAH	Apport (t/km ² .an)	665.42	653.68	640.98
	Es moy (m ³ /an)	422228.52	414778.35	406720.39
TIXERONT	Apport (t/km ² .an)	226.16	220.60	214.62
	Es moy (m ³ /an)	143508.65	139976.13	136183.91

Récapitulatif des résultats des calculs du transport solide pour le B.V. du barrage Ain zada.

BOUIRA COULOGNY		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
		Lame d'eau Le (mm)		
Formule		45.38	46.73	36.42
SOGREAH	Apport (t/km ² .an)	620.30	623.02	600.17
	Es moy (m ³ /an)	949715.87	953882.49	918899.87
TIXERONT	Apport (t/km ² .an)	204.99	206.25	195.74
	Es moy (m ³ /an)	313853.92	315783.34	299689.72

Récapitulatif des résultats des calculs du transport solide pour le B.V. du barrage Tichy-haf.

BOUBIREK (Tichy-haf)		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
		Lame d'eau Le (mm)		
Formule		68.99	37.91	42.66
SOGREAH	Apport (t/km ² .an)	660.52	603.78	614.58
	Es moy (m ³ /an)	2002647.06	1830641.09	1863371.34
TIXERONT	Apport (t/km ² .an)	223.84	197.39	202.35
	Es moy (m ³ /an)	678656.72	598478.37	613512.12

Récapitulatif des résultats des calculs du transport solide pour le sous B.V. Bousselam.

BOUBIREK (Bousselam)		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
		Lame d'eau Le (mm)		
Formule		69.22	36.56	42.37
SOGREAH	Apport (t/km ² .an)	660.85	600.50	613.95
	Es moy (m ³ /an)	2122640.36	1928794.97	1971989.47
TIXERONT	Apport (t/km ² .an)	224.00	195.89	202.06
	Es moy (m ³ /an)	719467.20	629193.90	649008.59

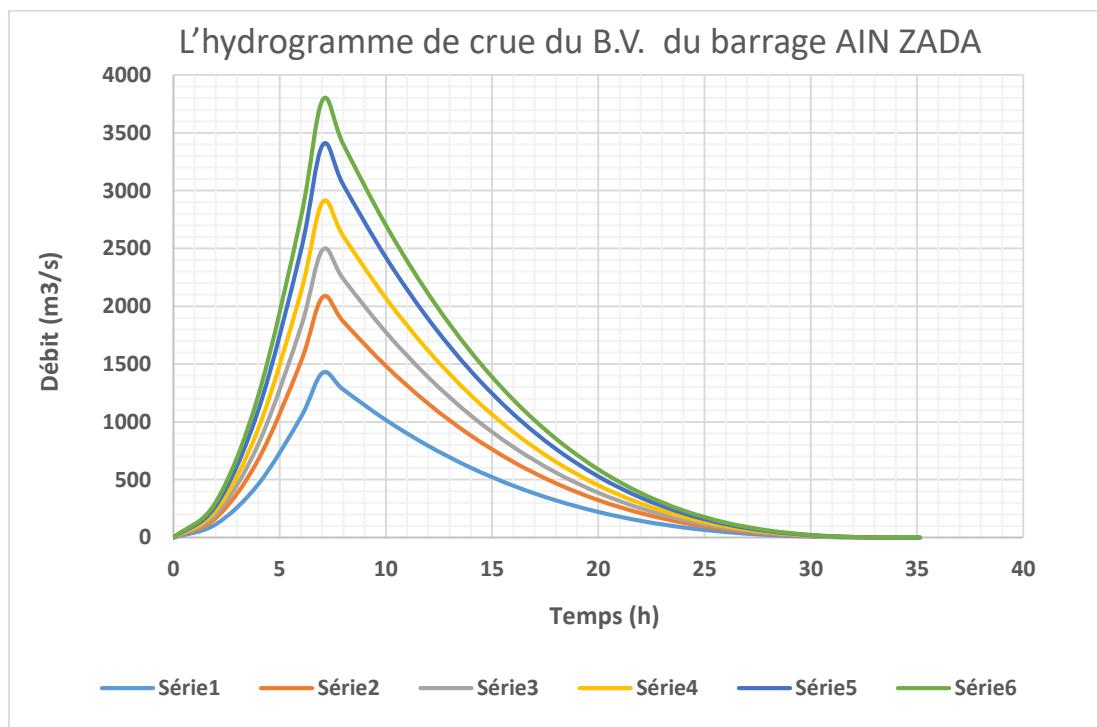
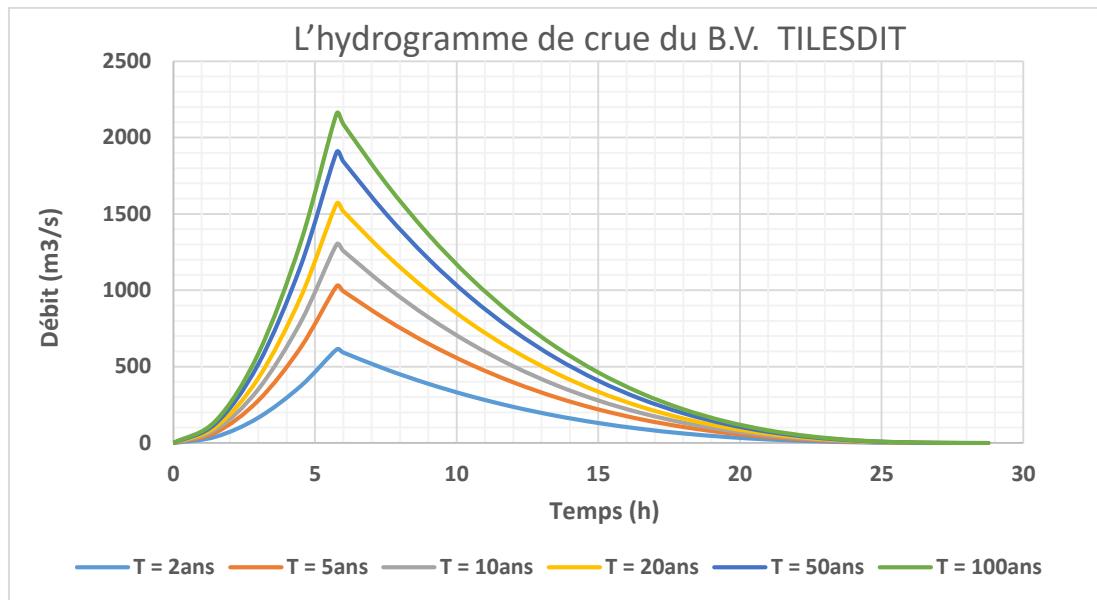
Récapitulatif des résultats des calculs du transport solide pour le sous B.V. de la Soummam.

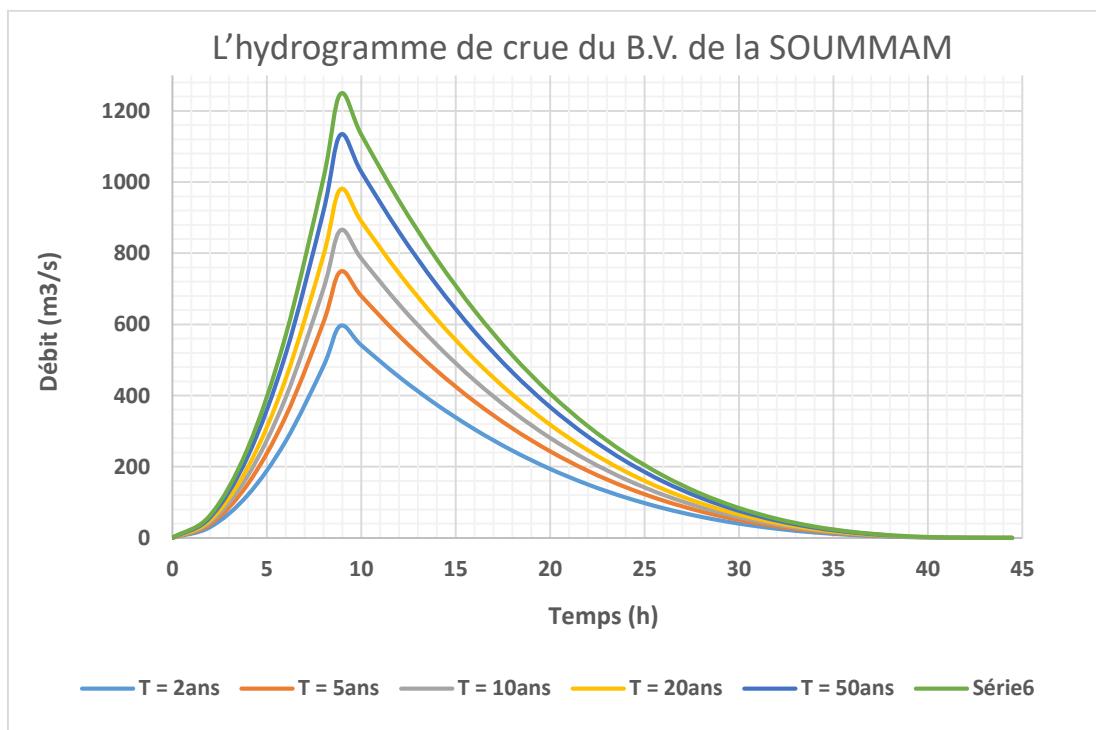
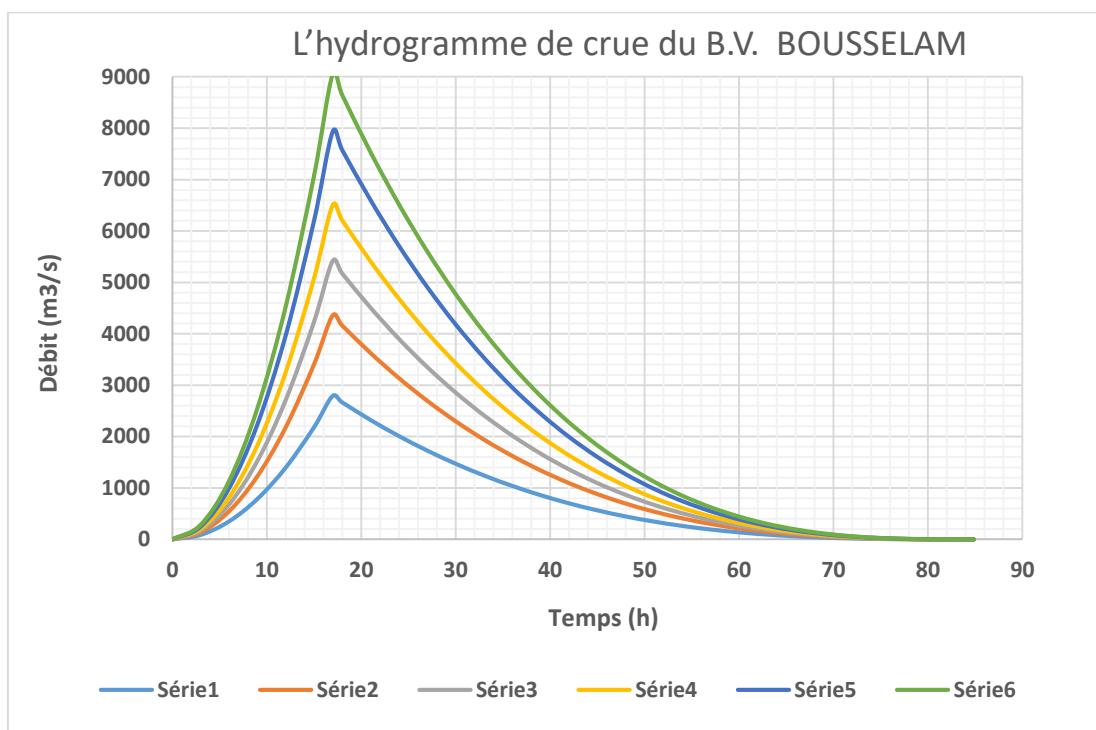
AEROPORT		COUTAGNE II	COUTAGNE III	ANRH
		Lame d'eau Le (mm)		
	Formule	0.07	31.10	8.86
SOGREAH	Apport (t/km ² .an)	235.76	586.11	485.51
	Es moy (m ³ /an)	199712.10	496504.72	411282.92
TIXERONT	Apport (t/km ² .an)	52.91	189.35	145.47
	Es moy (m ³ /an)	44821.01	160401.44	123228.88

Annexe 07 : Différentes méthodes d'évaluation des crues :

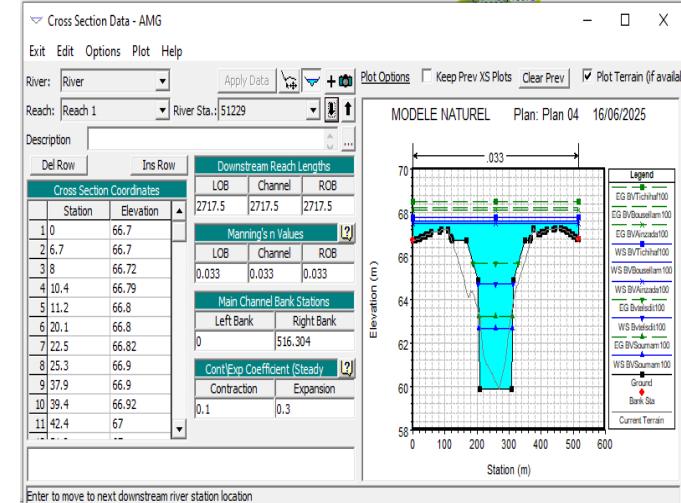
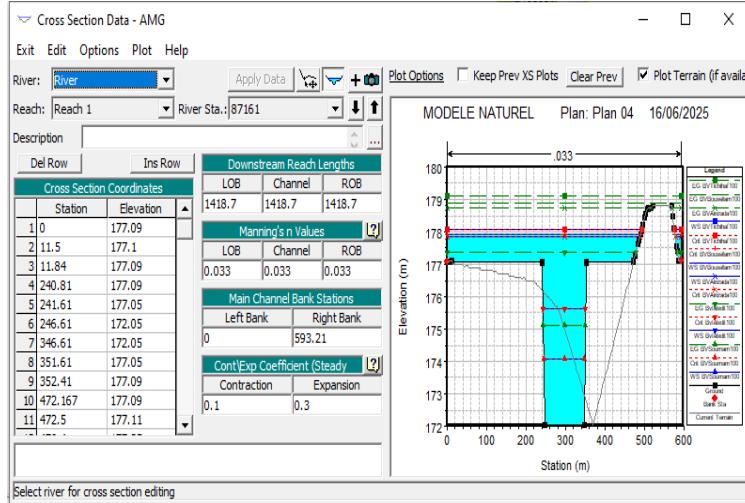
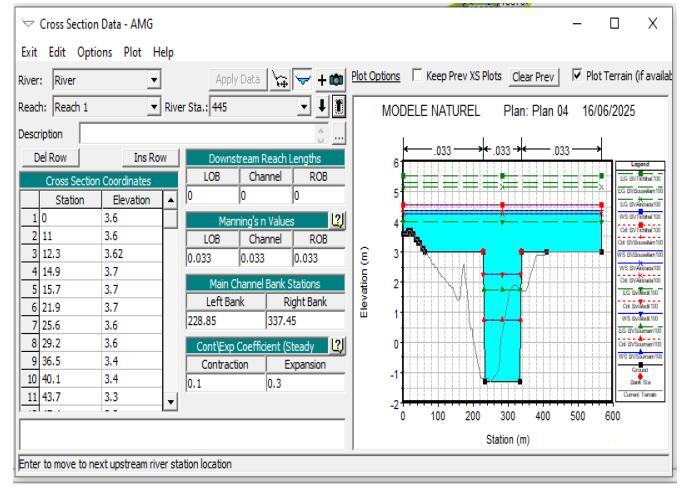
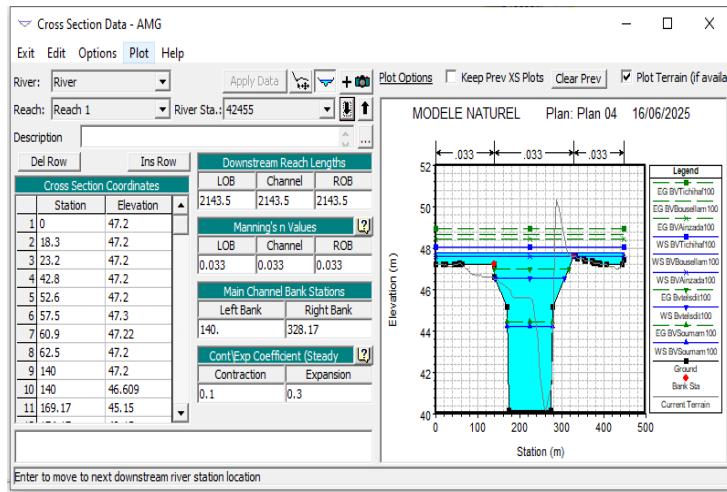
Résultat de calcul des débits de crues pour différentes périodes de retour de chaque bassin versant.

B.V	Formule	Les débits de crues pour différentes périodes de retour (m ³ /s)					
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
B.V bousselam	GIANDOTTI	2528.33	3539.66	4200.91	4862.17	5717.91	6379.16
	MAILLET-GAUTHIER	-	689.89	1935.91	2649.44	3368.17	3823.13
	FULLER 2	1588.95	1996.62	2305.01	2613.40	3021.07	3329.46
	SOKOLOVSKY	2790.65	4354.64	5415.53	6498.40	7925.46	9044.31
	ANRH-SOGREAH	1367.00	2077.84	2542.62	3007.40	3608.88	4073.66
B.V oued Soummam	GIANDOTTI	438.20	575.63	667.01	755.51	870.64	949.79
	MAILLET-GAUTHIER	-	410.15	660.96	839.95	1029.87	1152.95
	FULLER 2	595.33	748.08	863.62	979.17	1131.91	1247.45
	SOKOLOVSKY	292.34	465.21	588.03	711.58	877.79	995.09
	ANRH-SOGREAH	280.57	454.00	569.32	681.00	826.28	926.16
B.V Tilesdit	GIANDOTTI	465.11	699.65	854.69	1005.75	1196.56	1339.67
	MAILLET-GAUTHIER	-	448.84	690.86	867.82	1057.23	1180.49
	FULLER 2	482.98	606.89	700.63	794.37	918.29	1012.02
	SOKOLOVSKY	399.15	772.29	1039.56	1310.86	1665.28	1937.98
	ANRH-SOGREAH	610.74	1024.92	1298.70	1565.46	1902.42	2155.14
B.V Ain zada	GIANDOTTI	598.05	789.76	910.33	1030.91	1175.59	1290.14
	MAILLET-GAUTHIER	-	648.95	1200.65	1569.08	1952.16	2198.04
	FULLER 2	917.61	1153.04	1331.14	1509.23	1744.66	1922.75
	SOKOLOVSKY	949.26	1478.46	1830.54	2194.00	2642.46	3005.51
	ANRH-SOGREAH	1422.75	2076.56	2487.76	2898.96	3392.40	3783.04
B.V Tichy-haf	GIANDOTTI	3414.02	4779.63	5672.53	6565.42	7720.94	8613.84
	MAILLET-GAUTHIER	-	704.55	1865.95	2543.06	3227.01	3660.46
	FULLER 2	1522.04	1912.55	2207.95	2503.36	2893.86	3189.26
	SOKOLOVSKY	2594.89	4116.57	5154.40	6216.88	7620.63	8723.41
	ANRH-SOGREAH	1537.00	2336.24	2858.82	3381.40	4057.68	4580.26

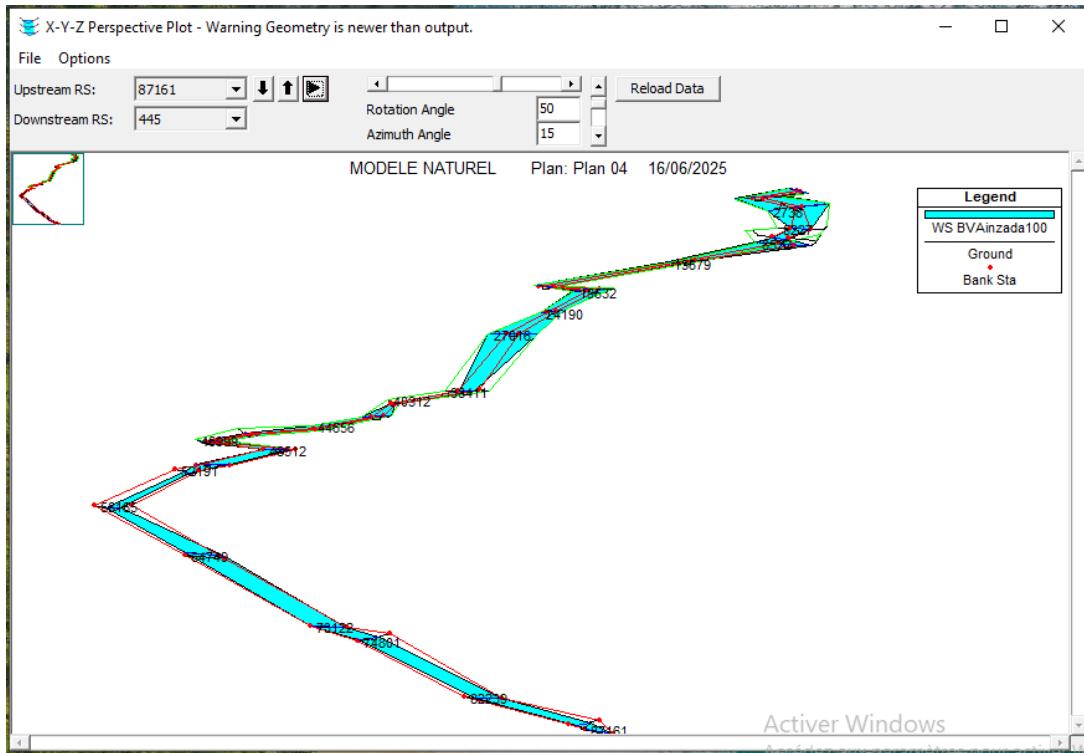
Annexe 08 : Les hydrogrammes de crues



Annexe 09 : Les profils en travers de quelques stations



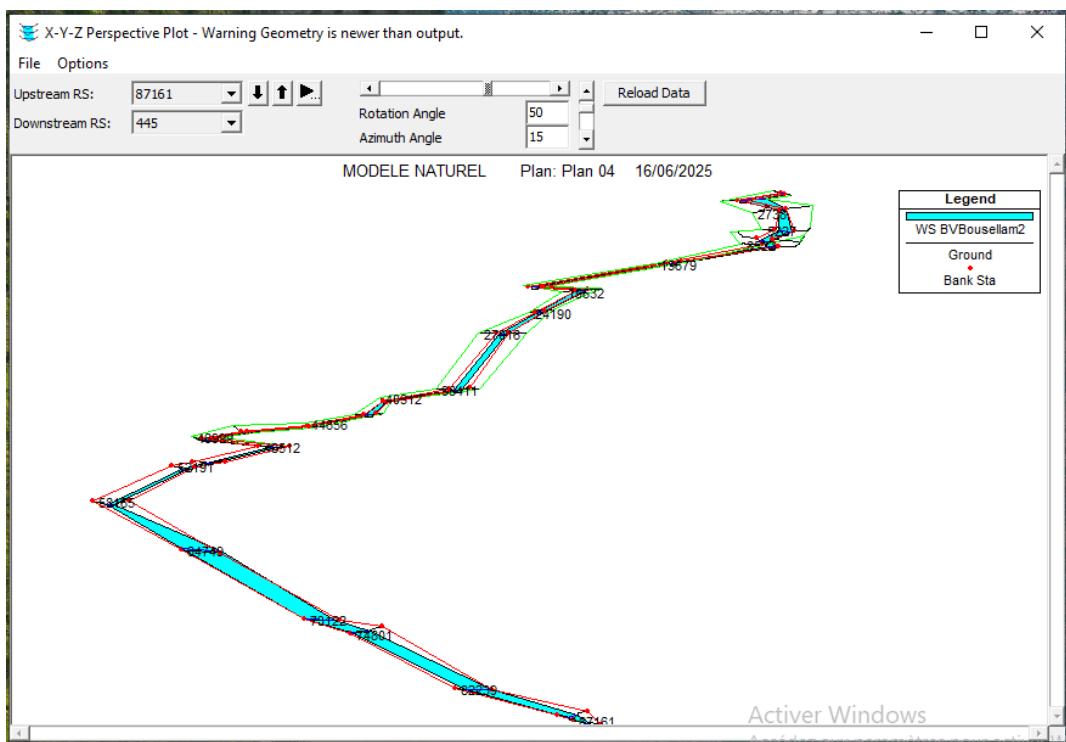
Annexe 10 : Les vues en 3D de la simulation du débit centennal des sous bassins versants.



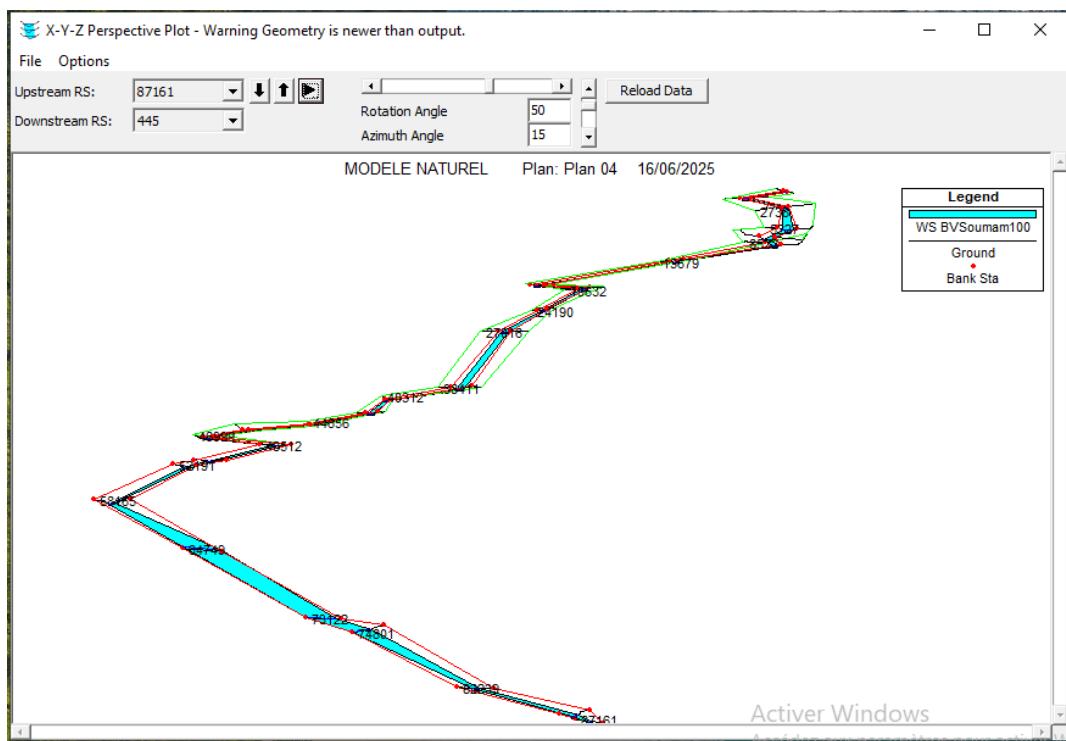
Visualisation en 3D de la simulation du débit centennal pour le B.V. Ain zada.



Visualisation en 3D de la simulation du débit centennal pour le B.V. Tilesdit.



Visualisation en 3D de la simulation du débit centennal pour le B.V. Bousselam.



Visualisation en 3D de la simulation du débit centennal pour le B.V. Soummam.

Annexe 11 : les résultats de la simulation de l'Oued Soummam à l'état naturel avec logiciel HEC-RAS pour le débit de la crue de 100 ans.

Station de la rivière	Les bassin versant										
		Débit de la crue	Hauteur du radier	Hauteur de la ligne d'eau (m)	Hauteur de la ligne critique	Hauteur de la ligne d'énergie	Pente de la ligne d'énergie	vitesse	Surface mouillée	Périmètre mouillé	Nombre de Froude
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	/
87161	B.V Bousselam	4073.66	172.05	177.93	177.93	178.88	0.009	4.32	943.49	505.96	1.01
	B.V Soummam	926.16	172.05	174.09	174.09	175.1	0.009	4.45	208.11	104.08	1
	B.V Tilesdit	2155.14	172.05	175.62	175.62	177.35	0.007	5.82	370.13	107.15	1
	B.V Ain zada	3783.04	172.05	177.83	177.83	178.75	0.009	4.22	895.4	503.29	1.01
	B.V Tichy-haf	4580.26	172.05	178.09	178.09	179.11	0.009	4.47	1024.41	511.27	1.01
85742	B.V Bousselam	4073.66	158.73	168.99		169.31	7E-04	2.5	1630.14	287.87	0.34
	B.V Soummam	926.16	158.73	165.18		165.26	3E-04	1.27	726.62	168.02	0.2
	B.v Tilesdit	2155.14	158.73	167.33		167.5	5E-04	1.82	1181.33	254.18	0.27
	B.V Ainzada	3783.04	158.73	168.77		169.07	7E-04	2.41	1568.81	283.58	0.33
	B.V Tichy-haf	4580.26	158.73	169.32		169.68	7E-04	2.65	1726.47	294.49	0.35
83960	B.V Bousselam	4073.66	161.3	165.4	165.35	166.29	0.008	4.17	977.16	513.14	0.96
	B.V Soummam	926.16	161.3	163.18	163.18	163.83	0.01	3.56	260.08	204.68	1.01
	B.v Tilesdit	2155.14	161.3	164.23	164.23	165.18	0.009	4.32	499.22	263.1	1
	B.V Ain zada	3783.04	161.3	165.32	165.26	166.15	0.008	4.04	937.1	511.66	0.95
	B.V Tichy-haf	4580.26	161.3	165.57	165.5	166.51	0.008	4.3	1065.11	516.38	0.96
74801	B.V Bousselam	4073.66	130.1	136.33		136.69	0.001	2.62	1553.94	372.36	0.41
	B.V Soummam	926.16	130.1	133.58		133.68	8E-04	1.46	633.01	272.66	0.31
	B.V Tilesdit	2155.14	130.1	135.01		135.21	1E-03	2	1077.8	347.57	0.36
	B.V Ain zada	3783.04	130.1	136.16		136.49	0.001	2.54	1487.99	368.8	0.4
	B.V Tichy-haf	4580.26	130.1	136.63		137.02	0.001	2.75	1664.55	378.25	0.42
69821	B.V Bousselam	4073.66	113.6	118.09	118.09	119.16	0.009	4.6	886.32	415.85	1.01
	B.V Soummam	926.16	113.6	115.65	115.65	116.65	0.009	4.44	208.72	104.09	1
	B.V Tilesdit	2155.14	113.6	117.31	117.31	118.03	0.01	3.78	570.04	395.51	1.01
	B.V Ain zada	3783.04	113.6	117.98	117.98	119.01	0.009	4.49	842.18	413.26	1
	B.V Tichy-haf	4580.26	113.6	118.27	118.27	119.42	0.008	4.76	962.68	420.31	1
61144	B.V Bousselam	4073.66	101.89	109.45	107.64	110.41	0.003	4.35	937.5	212.37	0.66
	B.V Soummam	926.16	101.89	104.92	103.94	105.37	0.002	2.96	312.63	106.07	0.55

	B.V Tilesdit	2155.14	101.89	106.79	105.46	107.68	0.003	4.2	513.73	109.79	0.62
	B.V Ain zada	3783.04	101.89	109.24		110.15	0.003	4.23	894.38	204.08	0.65
	B.V Tichy-haf	4580.26	101.89	109.81	108.19	110.85	0.003	4.5	1016.92	226.83	0.68
55636	B.V Bousselam	4073.66	76.16	81.91	81.91	84.12	0.007	6.58	618.69	139.98	1
	B.V Soummam	926.16	76.16	78.21	78.21	79.21	0.009	4.44	208.72	104.09	1
	B.V Tilesdit	2155.14	76.16	79.73	79.73	81.46	0.007	5.83	369.73	107.14	1
	B.V Ain zada	3783.04	76.16	81.51	81.51	83.79	0.007	6.69	565.42	123.83	1
	B.V Tichy-haf	4580.26	76.16	82.46	82.46	84.63	0.007	6.52	702.59	162.2	1
51229	B.V Bousselam	4073.66	59.91	67.61		68.24	0.005	3.52	1158.13	516.3	0.75
	B.V Soummam	926.16	59.91	62.68		63.22	0.003	3.25	284.95	105.55	0.63
	B.V Tilesdit	2155.14	59.91	64.71		65.64	0.003	4.29	502.8	109.6	0.64
	B.V Ainzada	3783.04	59.91	67.5		68.1	0.005	3.44	1100.07	516.3	0.75
	B.V Tichy-haf	4580.26	59.91	67.8		68.48	0.004	3.64	1256.93	516.3	0.75
24190	B.V Bousselam	4073.66	12.85	21.67		22.05	8E-04	2.92	1679.52	471.05	0.37
	B.V Soummam	926.16	12.85	16.54		16.84	0.001	2.42	382.26	107.37	0.41
	B.V Tilesdit	2155.14	12.85	19.88		20.22	0.001	2.59	845.75	391.02	0.39
	B.V Ain zada	3783.04	12.85	21.45		21.82	9E-04	2.88	1575.51	471.05	0.38
	B.V Tichy-haf	4580.26	12.85	22.03		22.42	8E-04	2.99	1850.3	471.05	0.37
23186	B.V Bousselam	4073.66	11.25	20.95		21.24	7E-04	2.53	1783.55	433.22	0.34
	B.V Soummam	926.16	11.25	15.75		15.95	6E-04	1.97	470.57	109.01	0.3
	B.V Tilesdit	2155.14	11.25	19.11		19.35	7E-04	2.14	1023.63	396.59	0.32
	B.V Ain zada	3783.04	11.25	20.72		21.01	7E-04	2.48	1687.83	428.78	0.34
	B.V Tichy-haf	4580.26	11.25	21.31		21.62	7E-04	2.6	1942.73	440.51	0.35
15721	B.V Bousselam	4073.66	6.25	16.04		16.34	6E-04	2.55	1839.13	450.21	0.31
	B.V Soummam	926.16	6.25	10.5		10.72	8E-04	2.09	443.13	108.5	0.33
	B.V Tilesdit	2155.14	6.25	13.89		14.15	7E-04	2.25	979.85	369.33	0.33
	B.V Ain zada	3783.04	6.25	15.8		16.09	6E-04	2.49	1732.43	435.2	0.31
	B.V Tichy-haf	4580.26	6.25	16.43		16.75	6E-04	2.64	2018.04	473.28	0.32

Résumé :

Le principal objectif de cette étude consiste à dégager une première compréhension du comportement hydraulique de l’Oued Soummam. L’exploration débute par une présentation de la zone d’étude en tenant compte de 6 sous bassins versants, et de faire ressortir les caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins versants pris en compte dans notre étude à l’aide des logiciels de SIG. À priori l’étude hydrologique se penche sur les débits de crue notamment les centennaux qui seront utiles pour la simulation hydraulique faite avec le logiciel HEC-RAS en passant par le module RAS MAPPER, les résultats de la simulation nous donnent une bonne compréhension de l’écoulement en cette zone d’étude.

Mots clés : Simulation hydrodynamique, Écoulement, Oued Soummam, HEC-RAS.

Abstract :

The main objective of this study is to provide an initial understanding of the hydraulic behavior of the Oued Soummam. The investigation begins with a presentation of the study area, taking into account its 6 sub-watersheds, and aims to highlight the morphometric and hydrographic characteristics of the basins considered in this study, using GIS software. The hydrological analysis focuses primarily on flood discharges, particularly centennial floods, which are necessary for the hydraulic simulation performed using the HEC-RAS software, through the RAS MAPPER module. The simulation results offer a good understanding of the flow behavior in the study area.

Key words : **Hydrodynamic simulation, Flow, Oued Soummam, HEC-RAS.**