

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE URBAINE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Option : ASSAINISSEMENT

THEME :

**AMENAGEMENT HYDRAULIQUE D'OUED YELLEL
COMMUNE DE YELLEL (W.RELIZANE)**

Présenté Par :

HAROUN Housseem Eddine.

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
M^r D.KAHLERRAS	M.C.B	Président
M^r A.HEBBOUCHE	M.A.A	Examineur
M^r Y.DERNOUNI	M.A.A	Examineur
M^{me} L.KADI	M.A.A	Examinatrice
M^r A.AMMARI	M.C.B	Promoteur

Session 2017- 2018

Remerciements

Avant tout, Je remercie ALLAH qui a illuminé mon chemin et qui m'a donné la force et la sagesse, ainsi la bonne volonté pour achever ce modeste travail.

Je tiens à remercier infiniment mon promoteur Mr A.AMMARI, pour sa gentillesse, sa générosité, ses conseils précieux, son esprit de recherche et ses commentaires efficaces, ses remarques, ses encouragements et son soutien. Un grand merci de m'avoir donné la chance d'être votre étudiant et de réaliser ce travail.

Je tiens à remercier Mr D.KAHLERRAS, d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance, et également les membres du jury, Mr A.HEBBOUCHE, Mr Y.DERNOUNI, Mme L.KADI, de l'ENSH-Blida pour le temps consacré à l'évaluation du présent mémoire.

Un remerciement spécial à Mr M.BOUKHELIFA, pour l'ensemble d'indications et de recommandations.

Je tiens à remercier l'ensemble des enseignants de l'ENSH, sans exception Pour leurs conseils durant toute ma période d'étude.

Enfin un grand merci à tous ceux qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'encourager tout au long de mon parcours.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو حماية مدينة يلل بولاية غليزان ضد فيضان وادي يلل. تفاقم هذه الظاهرة في السنوات الأخيرة، جعل من الضروري إقتراح تخطيط فعال للوادي. وفي هذا الإطار تطرقنا إلى عدة محاور: وصف مفصل للمنطقة من أجل تحديد مصدر التدفق وانتقاله الى المنفذ، تحليل أقصى هطول يومي وتحديد تدفق الوادي المتردد مرة في القرن، وضع خريطة للمناطق الفيضية عبر النمذجة الهيدروليكية، مناقشة الحلول المختلفة وإختيار الحل الأنسب من الناحية التقنية والإقتصادية.

الكلمات المفتاحية: فيضان، هطول، تدفق، النمذجة الهيدروليكية، حماية، يلل.

Résumé :

L'objectif de cette étude est la protection de la ville de Yellel (W. Relizane) contre les inondations causées par le débordement d'Oued Yellel .Ce phénomène s'accroît ces dernières années, il devient nécessaire de proposer un système d'aménagement efficace du cours d'eau. Dans ce cadre, plusieurs axes sont développés : la description détaillée de la zone afin de comprendre la génération de l'écoulement et leur transfert à l'exutoire, l'analyse des précipitations maximales journalières et la détermination du débit de la crue centennale, la délimitation des zones inondables par la modélisation hydraulique du cours d'eau, une description des variantes d'aménagement proposés pour pouvoir choisir la variante la plus adaptés d'un point de vue technico-économique.

Mots clés : Inondation, Précipitation, Protection, Crue, Modélisation hydraulique, Yellel.

Abstract:

The objective of this study is to protect the city of Yellel (Relizane) against floods caused by the over flow of wadi Yellel. This phenomenon is increasing in recent years, it becomes necessary to provide an effective management of the river. In this context, several axes are developed: the detailed description of area to understand the generation of flow and transfer to the outlet, the analysis of maximum daily precipitation and determining flow of the hundred-year flood map by hydraulic modeling of rivers, a description of development alternatives to choose the most suitable variant from a technical and economic point of view.

Keywords: Flood, Precipitation, Flow, Protect, Hydraulic modeling, Yellel.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les inondations.....	3
Introduction.....	4
I.1 Définitions.....	4
I.1.1 L'inondation.....	4
I.1.2 La crue.....	4
I.2. Le processus conduisant aux crues et inondations.....	4
I.2.1. L'eau mobilisable.....	4
I.2.2. Le ruissellement.....	5
I.2.3. Le temps de concentration.....	5
I.2.4. La propagation de la crue.....	5
I.2.5. Le débordement.....	5
I.3. L'influence des facteurs naturels sur la crue.....	5
I.4. Typologie des inondations.....	5
I.4.1. Les inondations de plaines.....	6
I.4.2. Les inondations par remontée de nappe.....	6
I.4.3. Les inondations par crues torrentielles.....	7
I.4.4. Les inondations par ruissellement urbain.....	7
I.4.5. Les inondations par rupture d'un ouvrage.....	8
I.4.6. Les inondations marines.....	8
I.4.7. Les inondations estuariennes.....	8
I.5. Conséquences dues aux inondations.....	9
I.6. Gestion du risque inondation.....	9
I.6.1. La prévision.....	9
I.6.2. La prévention.....	9
I.6.2.1. Réduire la vulnérabilité.....	10
I.6.2.2. Anticipation de la crise.....	10
I.6.2.3. Réduction de la gravité des crues torrentielles.....	10
I.7. Les inondations en Algérie.....	11

I.8. Historique des inondations de Relizane.....	12
Conclusion.....	13
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude.....	14
Introduction.....	15
II.1. Présentation du projet.....	15
II.2. Données naturelles de la zone d'étude.....	15
II.2.1. Situation géographique.....	15
II.2.2. Caractéristiques climatiques.....	16
II.2.2.1. Température.....	16
II.2.2.2. Pluviométrie.....	17
II.2.2.3. Vent.....	17
II.2.2.4. Humidité.....	17
II.2.3. Topographie.....	18
II.2.4. Géologie et hydrogéologie.....	18
II.2.5. Sismicité.....	18
II.3. Présentation du bassin versant d'Oued Yellel.....	19
II.3.1. Bassin versant d'Oued Yellel.....	19
II.3.2. Etude hydromorphologique du bassin versant.....	19
II.3.2.1. Paramètres morphométriques.....	19
II.3.2.2. Paramètres des reliefs.....	20
II.3.2.3. Réseau hydrographique.....	25
Conclusion.....	28
Chapitre III : Etude hydrologique.....	29
Introduction.....	30
III.1 Présentation de la station pluviométrique.....	30
III.2 Etude des précipitations maximales journalières.....	31
III.2.1 Paramètres statistiques de la série.....	33
III.2.2 Ajustement statistique	33
III.2.2.1 Ajustement à la loi de Gumbel.....	33
III.2.2.2 Ajustement à la loi de Galton.....	35
III.2.2.3 Ajustement à la loi GEV.....	36

III.2.3 Test de validité d'un ajustement.....	37
III.2.3.1 Test d'adéquation du χ^2	37
III.2.3.2 Test visuel.....	38
III.2.4 Pluies de courte durée.....	38
III.3 Etude des crues.....	41
III.3.1 Le modèle de MEDDI et TOUMI.....	41
III.3.2. Les formules empiriques.....	42
III.3.2.1 La formule de Sokolovsky.....	42
III.3.2.2 La formule de Giandotti.....	43
III.3.2.3 La formule de Possenti.....	44
III.3.3. Hydrogramme de crue.....	45
Conclusion.....	46
 Chapitre IV : Diagnostic et modélisation du cours d'eau non aménagé.....	 47
Introduction.....	48
IV.1 Etat d'Oued Yellel.....	48
IV.2 Modélisation de l'écoulement.....	50
IV.2.1 Présentation du logiciel HEC-RAS.....	50
IV.2.2 Etapes de simulation par HEC-RAS.....	51
IV.2.2.1 Création d'un nouveau projet.....	51
IV.2.2.2 Données géométriques.....	51
IV.2.2.3 Données hydrométriques et conditions aux limites	52
IV.2.2.4 Simulation.....	53
IV.2.2.5 Résultat de la simulation.....	53
IV.3 Les zones inondables.....	57
Conclusion.....	57
 Chapitre V : Etude des variantes d'aménagement.....	 58
Introduction.....	59
V.1 Principe d'aménagement.....	59
V.1.1 Les différents types d'aménagements envisageables.....	59
V.1.1.1 Curage.....	59
V.1.1.2 Recalibrage.....	59

V.1.1.3 Réalisation des canaux.....	59
V.1.1.4 Protection des berges.....	59
V.1.1.5 Création des canaux périphériques.....	59
V.1.2 Les formules de dimensionnement des canaux.....	59
V.1.3 Choix des paramètres de dimensionnement.....	60
V.1.3.1 La pente du projet.....	60
V.1.3.2 Le coefficient de rugosité.....	60
V.1.4 Revanche des canaux.....	61
V.2 Etude des variantes.....	61
V.2.1 Recalibrage du lit naturel.....	61
V.2.1.1 Dimensionnement.....	61
V.2.1.2 Les paramètres d'écoulement.....	62
V.2.2 Recalibrage du lit naturel avec recouvrement des berges.....	63
V.2.2.1 Dimensionnement.....	63
V.2.2.2 Les paramètres d'écoulement.....	63
V.2.2.3 Etude de la stabilité du canal.....	64
V.2.2.4 Estimation du coût de la variante.....	66
V.2.3 Canal en béton armé.....	66
V.2.3.1 Dimensionnement.....	66
V.2.3.2 Les paramètres d'écoulement.....	66
V.2.3.3 Estimation du coût de la variante.....	67
V.2.4 Canal en gabion.....	67
V.2.4.1 Dimensionnement.....	68
V.2.4.2 Les paramètres d'écoulement.....	69
V.2.4.3 Estimation du coût de la variante.....	69
V.2.5 Canal mixte.....	70
V.2.5.1 Dimensionnement.....	70
V.2.5.2 Les paramètres d'écoulement.....	70
V.2.5.3 Etude de la stabilité du canal.....	71
V.2.5.4 Estimation du coût de la variante.....	72
V.3 Choix de la variante d'aménagement.....	72
V.3.1 Critères d'évaluation.....	72

V.3.2 La variante choisit.....	72
Conclusion.....	73
Chapitre VI : Organisation de chantier.....	74
Introduction.....	75
VI.1 Généralités.....	75
VI.1.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier.....	75
VI.1.1.1 Maître de l'ouvrage.....	75
VI.1.1.2 Maître d'œuvre.....	75
VI.1.1.3 L'entreprise.....	75
VI.1.2 Définitions des engins utilisés.....	76
VI.2 Devis quantitatif et estimatif du projet.....	76
VI.3 La Planification.....	77
VI.3.1 Définition.....	77
VI.3.2 Techniques de la planification.....	77
VI.3.2.1 Méthodes basées sur le réseau.....	77
VI.3.2.2 Méthodes basées sur le graphique.....	78
VI.3.3 Les étapes de la planification.....	79
VI.3.3.1 Collection des informations.....	79
VI.3.3.2 Décomposition du projet.....	79
VI.3.3.3 Relations entre les tâches.....	79
VI.3.4 Choix de la méthode de calcul.....	79
VI.3.4.1 Les paramètres de calcul dans la méthode C.P.M.....	79
VI.3.4.2 Chemin critique	80
VI.3.5 Diagramme de Gantt.....	80
VI.3.6 Elaboration du réseau selon la méthode CPM.....	80
Conclusion.....	84

Conclusion générale

Listes des figures

Chapitre I : Généralités sur les inondations

Figure n° I.1 : Inondation de plaine.....	6
Figure n° I.2 : Inondation par remontée de nappe.....	6
Figure n° I.3 : Inondation par crues torrentielles.....	7
Figure n° I.4 : Inondation par ruissellement.....	7
Figure n° I.5 : Inondation par rupture d'ouvrage.....	8
Figure n° I.6 : Inondation par estuariennes.....	8
Figure n° I.7 : Exemple de correction active.....	10
Figure n° I.8 : Exemple de correction passive.....	11

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Figure n° II.1 : Situation Géographique de la ville de Yellel.....	15
Figure n° II.2 : Image satellitaire de la ville de Yellel.....	16
Figure n° II.3 : La répartition moyenne mensuelle des précipitations.....	17
Figure n° II.4 : La carte des zones sismiques de l'Algérie.....	18
Figure n° II.5 : La carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Yellel.....	21
Figure n° II.6 : La courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Yellel.....	22
Figure n° II.7 : Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Yellel (classification de Schumm).....	26

Chapitre III : Etude hydrologique

Figure n° III.1: Localisation de la station pluviométrique de Yellel.....	30
Figure n° III.2 : Variabilité chronologique des pluies maximales journalières.....	32
Figure n° III.3 : Représentation graphique de l'ajustement à la loi de Gumbel.....	34
Figure n° III.4 : Représentation graphique de l'ajustement à la loi de Galton.....	35
Figure n° III.5 : Représentation graphique de l'ajustement à la loi GEV.....	36
Figure n° III.6 : Représentation graphique de l'ajustement des trois lois.....	38
Figure n° III.7 : Courbes pluies-durées-fréquences (PDF).....	40

Figure n° III.8 : Courbes intensités-durées-fréquences (IDF)	40
Figure n° III.9 : Carte de la situation géographique des bassins versants.....	41
Figure n° III.10 : Hydrogrammes de crues du bassin versant d'Oued Yellel.....	46

Chapitre IV : Diagnostic et modélisation du cours d'eau non aménagé

Figure n° IV.1 : Pont existant au niveau de la route national RN 04 PK 66 (DRE Relizane, 2012).....	48
Figure n° IV.2 : Pont existant au centre de la ville PK 961 (DRE Relizane, 2012)	49
Figure n° IV.3 : Pont existant au centre de la ville PK 1450 (DRE Relizane, 2012).....	49
Figure n° IV.4 : Pont existant au niveau de chemin de fer PK 1596 (DRE Relizane, 2012)	50
Figure n° IV.5 : Création de nouveau projet HEC-RAS.....	51
Figure n° IV.6 : Les profils en travers d'Oued Yellel.....	52
Figure n° IV.7 : Vue en Plan en 3D du tronçon d'Oued Yellel avec les ouvrages d'arts, après la simulation.....	53
Figure n° IV.8 : Profil en long du tronçon simulé d'Oued Yellel avec la ligne de surface de l'eau.....	54
Figure n° IV.9 : Section en travers d'Oued Yellel au niveau du pont de RN 04 (PK 66).....	55
Figure n° IV.10 : Section en travers d'Oued Yellel d'un pont existant au centre de la ville (PK 1450).....	55
Figure n° IV.11 : Section en travers d'Oued Yellel (PK 1075) avec les positions de la ligne de surface de l'eau.....	56
Figure n° IV.12 : Section en travers d'Oued Yellel (PK 1225) avec les positions de la ligne de surface de l'eau.....	56
Figure n° IV.13 : Les zones inondables.....	57

Chapitre V : Etude des variantes d'aménagement

Figure n° V.1 : Eléments géométriques pour des sections ouvertes diverses.....	60
Figure n° V.2 : Profil en travers d'Oued Yellel aménagé avec un recalibrage du lit naturel.....	62
Figure n° V.3 : Profil en travers d'Oued Yellel aménagé avec un recalibrage du lit naturel et recouvrement des berges.....	64
Figure n° V.4 : Efforts tangentiel critique pour des matériaux non cohésifs (USBR).....	65
Figure n° V.5 : Profil en travers d'Oued Yellel aménagé avec un canal en béton armé.....	67
Figure n° V.6 : Coupe en travers d'un canal en gabion.....	68
Figure n° V.7 : Profil en travers d'Oued Yellel aménagé avec un canal en gabion.....	69
Figure n° V.8 : Profil en travers d'Oued Yellel aménagé avec un canal mixte.....	70

Chapitre VI : Organisation de chantier

Figure VI.3 : Réseau de planification des tâches par la méthode CPM.....	83
Figure VI.4 : Diagramme de Gantt.....	84

Listes des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les inondations

Tableau n° I.1 : Quelques inondations dans la wilaya de Relizane.....	12
---	----

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Tableau n° II.1 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales (1970/2000)	16
Tableau n° II.2 : Répartition mensuelle moyenne interannuelle de la précipitation.....	17
Tableau n° II.3 : Résultats des paramètres morphométriques.....	20
Tableau n° II.4 : Surfaces partielles du bassin versant par tranche d'altitude.....	21
Tableau n° II.5 : Calcul de l'altitude moyenne.....	23
Tableau n° II.6 : Les différentes altitudes caractéristiques du bassin versant d'Oued Yellel.....	23
Tableau n° II.7 : Calcul de la pente de Roche.....	24
Tableau n° II.8 : Longueur des courbes de niveau.....	24
Tableau n° II.9 : Les types de reliefs en fonction de dénivelée spécifique.....	25
Tableau n° II.10 : Les différents indices de pente.....	25
Tableau n° II.11 : Nombre et longueur des talwegs.....	25
Tableau n° II.12 : Les différents paramètres du réseau hydrographiques.....	27
Tableau n° II.13 : Récapitulatif des caractéristiques hydromorphologiques du bassin versant d'Oued Yellel.....	28

Chapitre III : Etude hydrologique

Tableau n° III.1: Caractéristiques du poste pluviométrique Yellel.....	30
Tableau n° III.2 : Série des pluies maximales journalières de la station de Yellel.....	31
Tableau n° III.3 : Caractéristiques statistiques de la série $P_{j \max}$	33
Tableau n° III.4 : Les paramètres de la loi de Gumbel.....	34
Tableau n° III.5 : Quantiles théoriques de Gumbel.....	34
Tableau n° III.6 : Les paramètres de la loi de Galton.....	35
Tableau n° III.7 : Quantiles théoriques de Galton.....	36
Tableau n° III.8 : Les paramètres de la loi GEV.....	37
Tableau n° III.9 : Quantiles théoriques de GEV.....	37

Tableau n° III.10 : Résultats du test d'adéquation de χ^2	37
Tableau n° III.11 : Récapitulatif des pluies, intensités maximales de durée t (h) et de période de retour T (ans)	39
Tableau n° III. 12 : Equations du modèle pour l'estimation du Q_{max}	42
Tableau n° III. 13 : Fonction quantile q(F)	42
Tableau n° III. 14 : Débit maximale de crue pour différentes périodes de retour (modèle MEDDI et TOUMI)	42
Tableau n° III. 15 : Débit maximale de crue pour différentes périodes de retour (formule de sokolovsky)	43
Tableau n° III. 16 : Débit maximale de crue pour différentes périodes de retour (formule de Giandotti)	43
Tableau n° III. 17 : Débit maximale de crue pour différentes périodes de retour (formule de Possenti)	44
Tableau n° III. 18 : Débits fréquentiels calculés par les différentes méthodes.....	44
Tableau n° III. 19 : Débit de crue et les décrue pour différentes périodes de retour.....	45

Chapitre V : Etude des variantes d'aménagement

Tableau n° V.1 : Les valeurs du coefficient de rugosité.....	60
Tableau n° V.2 : Dimensions de l'aménagement d'Oued Yellel (recalibrage du lit naturel).....	62
Tableau n° V.3 : Paramètres d'écoulement de la variante recalibrage du lit naturel.....	62
Tableau n° V.4 : Dimensions de l'aménagement d'Oued Yellel (recalibrage du lit naturel avec recouvrement des berges).....	63
Tableau n° V.5 : Paramètres d'écoulement de la variante recalibrage du lit naturel avec recouvrement des berges.....	63
Tableau n° V.6 : résultats des contraintes tractrices.....	65
Tableau V.7 : Devis de la variante (recalibrage du lit naturel avec recouvrement des berges).....	66
Tableau n° V.8 : Dimensions de l'aménagement d'Oued Yellel (canal en béton armé).....	66
Tableau n° V.9 : Paramètres d'écoulement de la variante canal en béton armé.....	66
Tableau V.10 : Devis de la variante (canal en béton armé).....	67
Tableau V.11 : Caractéristiques géométriques de la section gabionnée.....	68
Tableau n° V.12 : Dimensions de l'aménagement d'Oued Yellel (canal en gabion).....	68
Tableau n° V.13 : Paramètres d'écoulement de la variante canal en gabion.....	69
Tableau V.14 : Devis de la variante (canal en gabion).....	69
Tableau n° V.15 : Dimensions de l'aménagement d'Oued Yellel (canal mixte).....	70
Tableau n° V.16 : Paramètres d'écoulement de la variante canal en mixte.....	70

Tableau n° V.17 : résultats des contraintes tractrices.....	71
Tableau V.18 : Devis de la variante (canal mixte).....	72

Chapitre VI : Organisation de chantier

Tableau VI. 1 : Engins utilisés.....	76
Tableau VI.2 : Le devis des différents travaux d'Oued Yellel.....	77
Tableau VI.3 : Liste des opérations avec leurs durées.....	82
Tableau VI.4 : Succession des taches.....	82

Listes des planches

Planche n°1 : Vue en plan d'Oued Yellel avec les zones inondables, commune de Yellel (W.Relizane).

Planche n°2 : Profil en long d'Oued Yellel du PK 1000 à PK 2000, commune de Yellel (W.Relizane).

Planche n°3 : Coupes types de l'aménagement d'Oued Yellel, commune Yellel (W.Relizane).

Listes des abréviations

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

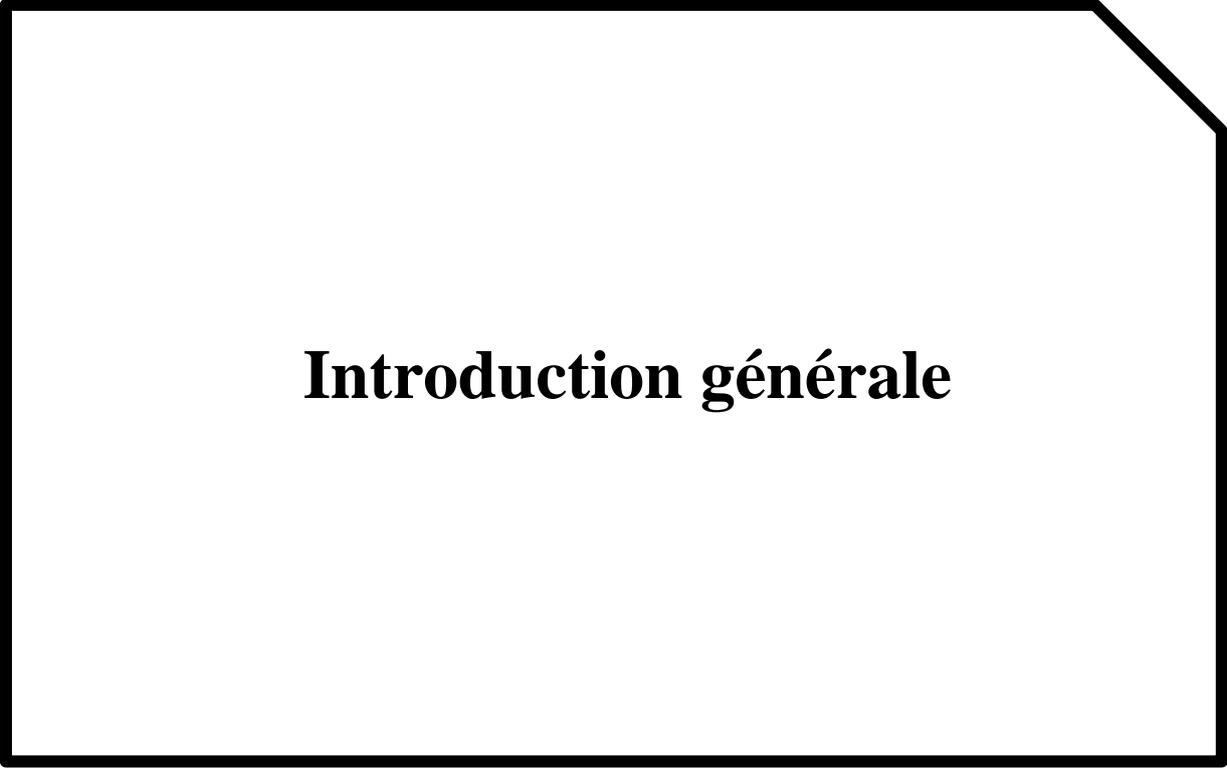
DRE : Direction des ressources en eaux.

MNT : Modèle Numérique du Terrain.

RN : Route Nationale.

PK : Point Kilométrique.

ANIRF : Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière



Introduction générale

Introduction générale

L'eau, en terme générale, est une aubaine mais elle peut être l'inverse, elle engendre des dégâts dans certaines situations extrêmes, de la pénurie à l'inondations. Pour ce dernier cas, sa gestion a une importance capitale dans le développement de l'occupation du territoire surtout en zones urbaines. Ainsi les inondations sont à l'origine de plus de 80% des catastrophes naturelles enregistrés dans le monde entre 1996 et 2006 provoquant ainsi des dégâts estimés à 500 000 décès et 600 milliards de dollars de pertes économiques. De ce fait, elles sont considérées comme les catastrophes naturelles les plus spectaculaires et les plus désastreuses qui produisent le plus de dégâts (BACHI,2011).

L'Algérie, de sa part, est confrontée aux phénomènes de crues et d'inondations qui sont plus fréquents que les séismes. Ces phénomènes provoquent des catastrophes plus destructrices et occasionnent d'importants dégâts humains et matériels. Les exemples de Bab El Oued – Alger en 2001, de Sidi Bel Abbes en 2006, de Ghardaïa en 2008 et El Bayadh en 2011 et d'autres de Batna et Djelfa ainsi que L'ouest du pays en 2018 sont des cas réels de catastrophes en l'absence de solutions techniques qui peuvent y faire face.

Les analyses faites à propos des crues et des inondations dans notre pays mettent en évidence leurs ampleurs et leurs occurrences imprévisibles.

Notre étude s'inscrit dans ce sens, du fait que la commune de Yellel est traversée par Oued qui est à l'origine d'inondations récurrentes engendrées par des précipitations intenses. L'objet du travail sera donc l'estimation des débits fréquentielles de crue, puis l'identification des zones inondables pour envisager des mesures structurelles qui puissent protéger les zones urbaines et extra urbaines le long d'Oued Yellel.

Comme méthodologie de travail, on a effectué en première étape une présentation détaillée de la zone d'étude, puis on entamera une étude hydrologique qui sert à prévoir les débits des crues d'Oued Yellel correspondants aux différentes périodes de retours. Cette étude est basée sur une analyse statistique fréquentielle des données pluviométriques disponibles. Ensuite, en deuxième étape, on a fait une étude hydraulique qui consiste à avoir les hauteurs des tirants, d'eaux correspondantes aux débits prévus précédemment. Pour cela, les résultats issus de l'étude hydrologique ont réuni avec la géométrie, la pente et la rugosité d'Oued Yellel pour être utiliser comme données d'entrée dans le modèle hydraulique HEC-RAS afin d'avoir en sortie les lames d'eaux correspondantes et par suite présenté les résultats de la modélisation hydraulique sous forme d'une carte des zones inondables en associant les fonctionnalités des deux logiciels AutoCad Civil 3D et HEC-RAS. Dès lors, on saura proposer des solutions sous forme de différentes variantes dont on choisira la mieux adaptée. Enfin, on fera une étude d'organisation de chantier visant à gérer le bon déroulement du projet et d'avoir une idée sur le coût et le délai de réalisation de l'aménagement.

Chapitre I :

Généralités sur les inondations

Introduction :

Au cours de ce chapitre, on va développer tous les aspects essentiels liées au problème de l'inondation (définition, typologie des inondations, etc.) afin de donner des notions générales de ce phénomène, en tirant au clair une méthodologie qui peut être suivie et les pré-occupations à examiner pour adapter les différents moyens de lutte contre les inondations.

I.1. Définitions :

I.1.1. L'inondation :

Une inondation désigne un recouvrement d'eau qui déborde du lit mineur ou qui afflue dans les talwegs ou les dépressions (la submersion de terrains) lorsque le débit et le volume d'eau d'une crue sont importants. Ce phénomène se manifeste par : les ruissellements résultant de fortes pluies d'orages sur des petits bassins versants (mise en charge des talwegs en milieu urbain), la remontée des nappes, les inondations par rupture d'ouvrages de protection, ou encore les inondations estuariennes résultant de la conjonction de fortes marées.

I.1.2. La crue :

La crue est un phénomène naturel et saisonnier qui correspond à une augmentation rapide et temporaire du débit d'un cours d'eau. Elle est décrite à partir de trois paramètres : le débit, la hauteur d'eau et la vitesse du courant.

En fonction de l'importance des débits, de nombreux hydrologues ont adopté le critère qu'une rivière est en crue lorsque son débit est trois à cinq fois supérieur à son débit moyen. De façon plus pratique, on admet qu'une rivière est en crue lorsqu'elle déborde des limites de son lit mineur.

Une crue se caractérise par son hydrogramme graphique qui représente les variations de débit en fonction du temps. Plus précisément, c'est la partie montante de cet hydrogramme qui est appelé « crue », la partie descendante étant « la décrue ».

I.2. Le processus conduisant aux crues et inondations :

I.2.1. L'eau mobilisable :

La source de l'eau mobilisable capable d'engendrer des inondations peut s'agir :

- ◆ Des averses relativement courtes mais intenses qui pourront toucher la totalité de la superficie de petits bassins versants de quelques kilomètres carrés.
- ◆ Des pluies répétées et prolongées de régime océanique, qui affecteront plutôt un grand bassin versant.
- ◆ De la fonte de neiges ou de glaces au moment d'un redoux, associée ou non à des pluies.

I.2.2. Le ruissellement :

Le ruissellement est un facteur lié à la nature du sol et de son occupation de surface, correspond à la part de l'eau qui n'a pas été interceptée par le feuillage, ni restituée à l'atmosphère par évaporation, et qui n'a pas pu s'infiltrer, ou qui resurgit très rapidement après infiltration et écoulement hypodermique ou souterrain. Il est varié en fonction de la couverture végétale (arbres, herbes et tapis d'humus) et par l'urbanisation (infrastructures, constructions), aussi par le degré de saturation du sol. Par ailleurs, l'intensité de la pluie joue aussi un rôle non négligeable car elle est l'élément moteur de ruissellement.

I.2.3. Le temps de concentration :

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

I.2.4. La propagation de la crue :

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

I.2.5. Le débordement :

Le phénomène de débordement est le résultat de la propagation d'un débit supérieur à celui que peut évacuer le lit mineur. En débordant, l'eau alimente massivement la nappe phréatique située sous le champ d'inondation.

I.3. L'influence des facteurs naturels sur la crue :

De nombreux paramètres influencent l'apparition d'une crue : la quantité et surtout la répartition spatiale et temporelle des pluies, par rapport au bassin versant, la surface et forme du bassin versant (un bassin très allongé ne réagit pas comme un bassin de forme ramassée), la nature et l'occupation du sol dictent l'évaporation et la consommation d'eau par les plantes, l'infiltration dans le sous-sol et le ruissellement influencent fortement sur le temps de concentration des eaux. Enfin, la topographie du lit, la pente et la forme du bassin versant jouent également un rôle.

I.4. Typologie des inondations :

En fonction de l'événement créateur de la catastrophe, On peut distinguer plusieurs types d'inondation : inondations de plaine, par remonte de nappe, par crues torrentielles, par ruissellement en secteur urbain ou rural, inondation par rupture d'une protection, les submersions marines et les inondations estuariennes.

I.4.1. Les inondations de plaines :

Les inondations de plaine se produisent à la suite d'épisodes pluvieux océaniques prolongés mais d'intensités modérée qui tombent sur des reliefs peu marqués aux sols assez perméables c'est-à-dire sur lequel un ruissellement met beaucoup de temps à se déclencher. Elles se produisent en plaine, mais aussi dans les régions de plateau, à l'aval de grands bassins versants. Les dommages qui provoquent ce type d'inondation sont imputables aux hauteurs et durées de submersion.

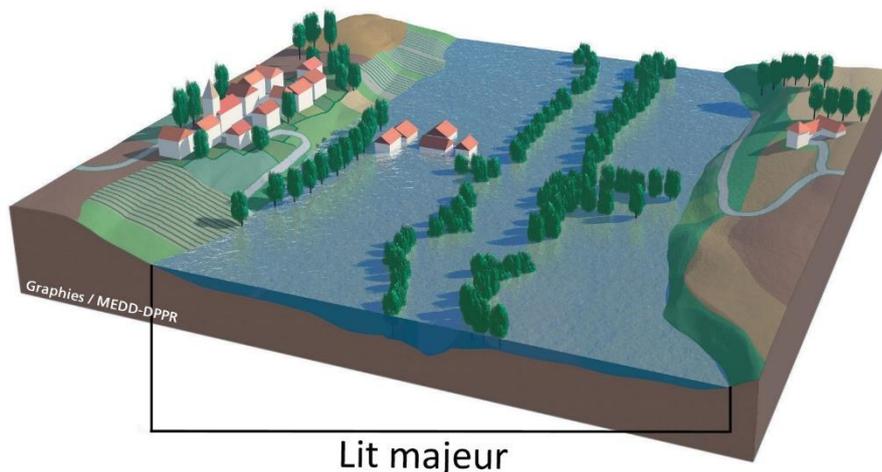


Figure n° I.1 : Inondation de plaine (georisques.gouv).

I.4.2. Les inondations par remontée de nappe :

Elles correspondent à des inondations par débordement indirect qui se manifestent par la remontée de la nappe phréatique qui affleure en surface et/ou par l'intrusion d'eau dans les différents réseaux d'assainissement. Les désordres liés à ce type d'inondation se traduisent par des remontées sous bâtisses, l'engorgement des ouvrages souterrains, la déstabilisation des pentes, des tassements de remblai, des glissements de terrain, des perturbations sur les réseaux publics et des pressions sous les constructions.



Figure n° I.2 : Inondation par remontée de nappe (georisques.gouv).

I.4.3. Les inondations par crues torrentielles :

Les crues torrentielles sont des phénomènes brusques et violents résultant d'épisodes pluvieux intenses et localisés. Les spécialistes retiennent cinq critères pour définir la crue torrentielle : la rapidité de la réponse du cours d'eau, sa pente, le nombre de Froude, le transport solide, les effets de ces crues. Les bassins versants qui peuvent être affectés par ces phénomènes sont celles qui ont de petite à moyenne superficie et une forte pente moyenne. Les dommages imputables à ces phénomènes sont avant tout liés à la vitesse du courant, renforcés par les matériaux que peuvent charrier les rivières générant de telles crues.

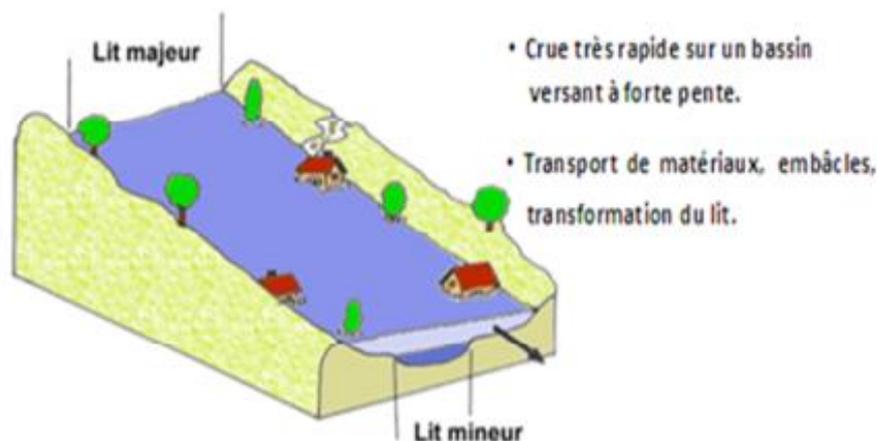


Figure n° I.3 : Inondation par crues torrentielles (BACHI, 2011).

I.4.4. Les inondations par ruissellement urbain :

Les inondations par ruissellement sont dues à des écoulements sur la voirie de volumes d'eau ruisselés sur le site ou à proximité, qui ne sont pas absorbés par le réseau d'assainissement superficiel et souterrain. Ces phénomènes se caractérisent par leur soudaineté et leur courte durée, ce qui les rend peu prévisibles et difficilement maîtrisables en période de crise.

Le ruissellement pluvial urbain provoque d'importantes inondations lorsque les terrains sont plus imperméables, le tapis végétal plus faible, la pente plus forte et les précipitations plus violentes. L'urbanisation intensive de petits bassins versants est à l'origine de l'imperméabilisation des sols, qui accroît et aggrave considérablement le ruissellement.



Figure n°I.4 : Inondation par ruissellement (BACHI, 2011).

I.4.5. Les inondations par rupture d'un ouvrage :

Dans ce type des inondations survient brutalement soit par débordement au-dessus de la digue, soit par rupture de la digue. Le phénomène peut être très brutal et d'autant plus dommageable quand les zones d'habitations sont proches de la digue.

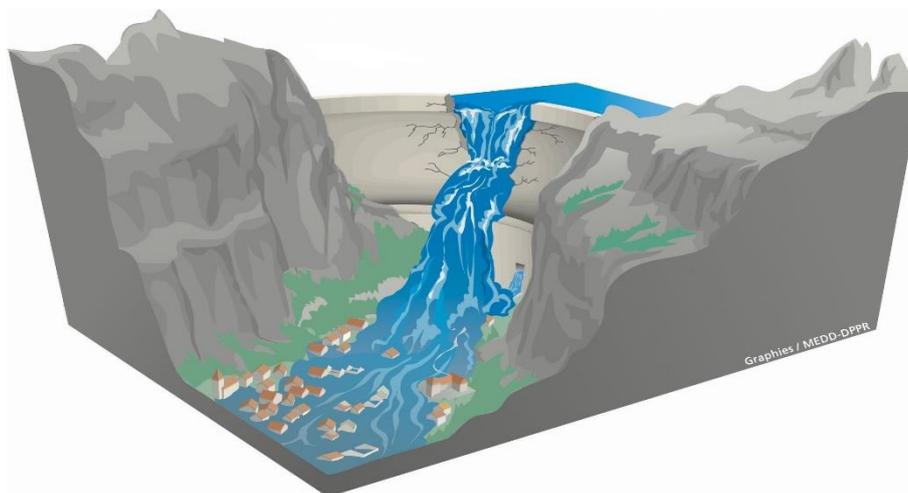


Figure n° I.5 : Inondation par rupture d'ouvrage (georisques.gouv).

I.4.6. Les inondations marines :

Les inondations marines sont des submersions temporaires de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (forte dépression et vent de mer) et marégraphiques sévères provoquant par exemple des ondes de tempête. Elles affectent en général des terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers.

I.4.7. Les inondations estuariennes :

Les zones riveraines d'un estuaire peuvent être inondées du fait de la conjonction d'une crue fluviale et d'un niveau de la mer exceptionnellement élevé bloquant ou ralentissant l'évacuation de la crue. Le niveau de cette submersion suit alors les fluctuations d'une ou plusieurs marées avec les modifications propres à l'estuaire et à la crue fluviale.

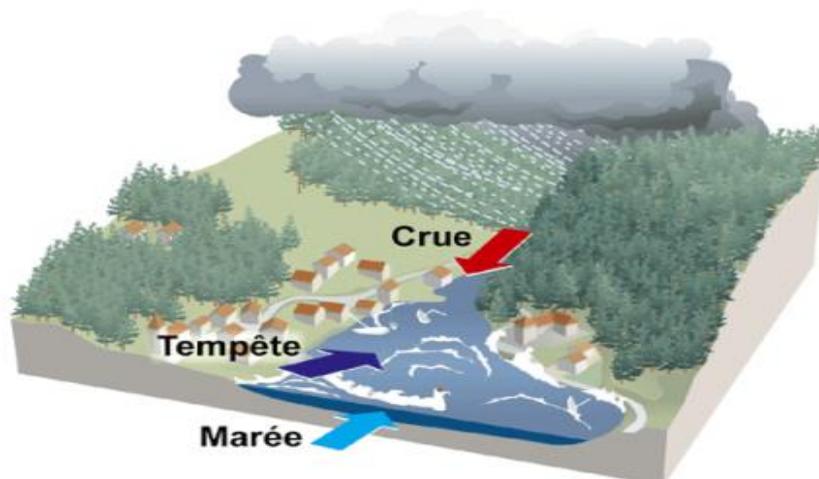


Figure n° I.6 : Inondation par estuariennes (georisques.gouv).

I.5. Conséquences dues aux inondations :

Les inondations ont plusieurs impacts sur l'environnement et l'être humaine, on cite à titre d'exemples :

- ◆ Les activités agricoles (les pertes de récoltes) qui sont les premières touchées et les plus fréquents.
- ◆ La destruction d'ouvrages d'arts (barrages, ponts), de voies de communication (routes et chemin de fer) et de construction (bâtiments collectifs, usines etc.).
- ◆ La perturbations de déplacement par la fermeture des routes.
- ◆ Des difficultés d'approvisionnement en eau sont possibles à cause de la pollution des captages.
- ◆ L'érosion des sols et des cours d'eau (berges emportées, affouillement, etc....).
- ◆ les victimes ce fut le cas des inondations de Bâb El Oued du 10 novembre 2001 à Alger, ont causé 750 morts et 120 personnes disparues et plus de 10000 familles sinistrées.

I.6. Gestion du risque inondation :

I.6.1. La prévision :

La prévention regroupe l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour réduire l'impact d'un phénomène naturel prévisible sur les personnes et les biens. L'inondation est un risque prévisible dans son intensité, mais il est difficile de connaître le moment où elle se manifesterà.

La surveillance météorologique est complétée par un suivi des débits dans la plupart des cours d'eau de plaine, à l'aide de réseaux de collecte de données. Les cours d'eau à crues brutales ne peuvent être couverts par ce système, car on ne pourrait pas en garantir la fiabilité lors d'une montée rapide des eaux.

L'amélioration de la prévision des crues passe ainsi par :

- ◆ La mise en place d'un réseau de surveillance météorologique permettant de mesurer les pluies couvrant les zones à risque.
- ◆ La mise en œuvre de modèles performants de prévision des crues.
- ◆ la mise à disposition des autorités locales d'une information plus compréhensible et plus fiable.

I.6.2. La prévention :

La prévention regroupe l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour réduire l'impact d'un phénomène naturel prévisible sur les personnes, les biens et l'environnement.

I.6.2.1. Réduire la vulnérabilité :

Les spécialistes préconisent d'agir sur la réduction de la vulnérabilité des enjeux, c'est-à-dire sur la limitation des éventuels dommages (mitigation). Celle-ci concerne les biens économiques tel que : les constructions, les bâtiments industriels et commerciaux, l'électricité, l'eau, la communication, etc.

La mitigation suppose notamment la formation des divers intervenants (architectes, ingénieurs en génie civil, entrepreneurs etc.) en matière de conception et de prise en compte des phénomènes naturels (climatiques et géologiques), ainsi que la définition de règles de construction.

I.6.2.2. Anticipation de la crise :

Une bonne anticipation de la crise est toujours nécessaire pour un bon plan se prépare à l'avance, afin d'éviter la panique au moment de l'événement. Il est recommandé d'y faire figurer des informations sur le signal d'alerte (s'il existe) et les consignes de sécurité, les numéros utiles (urgence, services de l'État, compagnie d'assurance, etc.), les fréquences radio et tous autres éléments à adapter à chaque situation familiale.

I.6.2.3. Réduction de la gravité des crues torrentielles :

La prévention en matière de crues torrentielles consiste à effectuer des travaux de correction active ou passive pour réduire le transport solide en provenance du lit et du bassin versant.

♦ **La correction active** : comprend l'ensemble des dispositions visant à réduire les transports solides en agissant directement sur les processus d'érosion et leur cause, exemple : reforestation.

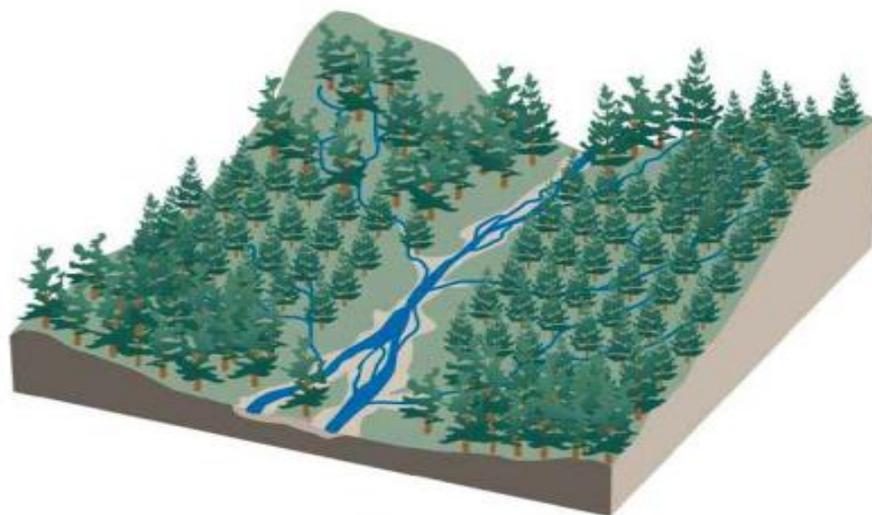


Figure n° I.7 : Exemple de correction active (georisques.gouv).

♦ **La correction passive** : consiste seulement à se protéger du phénomène en contrôlant le déroulement et les conséquences de la crue, exemple : barrage-seuil, plage de dépôt.

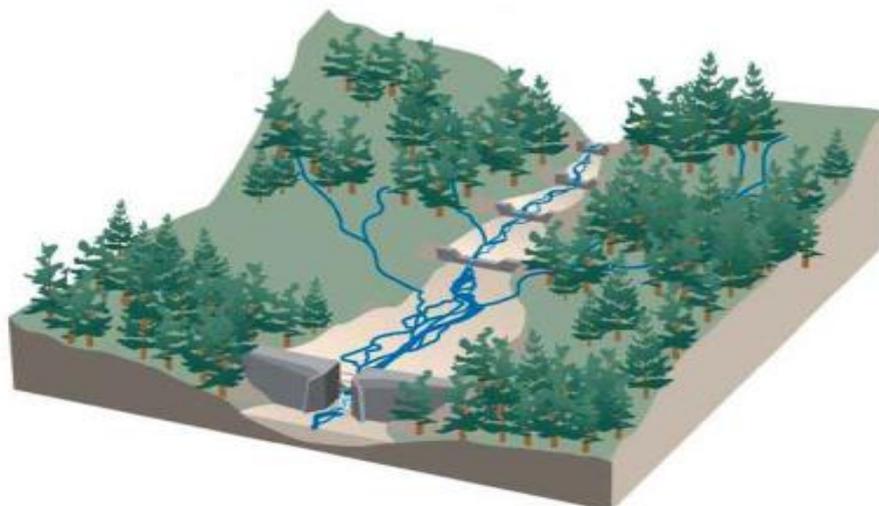


Figure n° I.8 : Exemple de correction passive (georisques.gouv).

I.7. Les inondations en Algérie :

L'Algérie est l'un des pays les plus confrontés aux phénomènes de crues et des inondations qui se manifestent de façon catastrophique. Plusieurs régions du pays sont menacées par ces catastrophes hydrologiques dont les effets sont souvent intensifiés par une urbanisation anarchique impliquant une occupation des terres inondées et même les rives des oueds.

Les précipitations se caractérisent par une très forte irrégularité entraînent ainsi des étiages extrêmement sévères des cours d'eau et des fortes crues et des inondations engendrant des dégâts humains et matériels considérables.

Dans un pays en voie de développement comme l'Algérie, les inondations ont marqué comme l'une des catastrophes naturelles les plus nombreuses, les plus dévastatrices sont :

- ◆ Inondations d'Octobre 2008 (Ghardaïa) : plus de 40 morts et des dégâts matériels très lourds.
- ◆ Inondations du 10-11 novembre 2001 (Bab El-Oued en Alger) : 733 décès et 3000 sans abri
- ◆ Inondations d'Octobre 2000 (ouest algérien) : plus de 24 décès.
- ◆ Inondations du 24 Octobre 2000 (Sidi Bel Abbès) : 02 décès et d'importants dégâts matériels.
- ◆ Inondations d'Octobre 1994 (plusieurs régions de pays) : 60 décès et des dizaines de blessés pendant 10 jours.
- ◆ Inondations d'Octobre 1993 (Oued R'hiou, wilaya de Ghilizane) : 22 décès et 14 blessés.

D'une manière générale, les causes de formation des inondations survenues en Algérie peuvent être classées en trois types :

- ◆ Des situations météorologiques remarquables se traduisant par une forte pluviosité.
- ◆ Des facteurs liés à l'effet de l'homme : la défaillance des réseaux d'assainissement, le gonflement des oueds par les débris et les détritiques.
- ◆ Des régions présentant un environnement topographique défavorable ou situées au pied d'une montagne.

I.8. Historique des inondations de Relizane :

Compte tenu du recensement effectué les inondations du bassin du Cheliff et des enquêtes de terrain menés par certains secteurs de l'ANRH, la wilaya de Relizane est considérée comme une région à grande risque au crues violentes surtout les zones suivantes : la ville de Relizane, la ville d'Oued R'hiou, plaine de la Mina.

Sur le tableau suivant, quelques inondations survenues dans la wilaya de Relizane et qui sont causées des pertes humaines et des destructions de constructions :

Tableau n° I.1 : Quelques inondations dans la wilaya de Relizane.

Dates	Inondations	Causes
07-janv-67	Inondation locale à Oued R'hiou	Pluies de longue durée
02-nov-82	Inondation de la plaine de Mina	Premières pluies d'automne
déc-86	Inondation à la ville d'Oued R'hiou	Pluies violentes
19-oct-93	Inondations catastrophiques à Oued R'hiou	Pluies intenses (60 mm en moins de 3h)
Hiver 2012	Inondations à la ville de Yellel	Pluies violentes

La ville de Yellel présente de grand risque des inondations car :

- ◆ Une situation hydrographique défavorable (la ville est traversée par un Oued).
- ◆ Urbanisation anarchique et non réglementée.

Conclusion :

Les inondations et les crues sont des phénomènes dangereux sur l'environnement et l'être humaine. Pour cela, il faut faire et la mise ouvre un programme de protection contre les crues afin de diminuer les risques et les dégâts en titre d'exemple : la limitation de l'urbanisme dans les zones à risque, faire des dérivations spéciales, renforcer les digues (barrage, rivière), isoler et protéger les réseaux publics, la création des bassins d'orage, le nettoyage des berges (rivière, fleuve), élimination des obstacles, l'aménagement de territoire.

Chapitre II :

Présentation de la zone d'étude

Introduction :

L'étude du site présente une étape nécessaire avant tout projet d'aménagement d'un Oued pour avoir et connaître les différentes données et les caractéristiques du lieu, ainsi que l'ensemble des facteurs déclenchant les inondations afin de l'élaboration de notre étude et de protéger contre les risques de ce phénomène et prévoir ces catastrophes.

II.1. Présentation du projet :

Le projet consiste d'aménager un tronçon de cours d'eau qui traverse la ville de Yellel dans la wilaya de Relizane pour la protection de la ville contre les eaux des crues et les inondations causées par les pluies.

II.2. Données naturelles de la zone d'étude :

II.2.1. Situation géographique :

Le centre de la ville de Yellel (s'appelée à une certaine époque Hilil) est situé à 20 km à l'ouest chef-lieu de Relizane (Longitude 0° 21'13'' ; Latitude 35° 43' 19''). Il s'explique par sa position stratégique aux croisements des voies de communications importantes RN n° 04 et le chemin de fer (Alger-Oran). Il est traversé par un oued appelé Oued de Yellel. On distingue donc deux rives : une rive gauche et une rive droite.

La commune de Yellel est délimitée comme suit :

- ◆ Au nord, la commune de Belhacel
- ◆ Au sud, le commune kalaa (wilaya de Relizane) et la commune d'El Bordj wilaya de Mascara.
- ◆ À l'ouest, la commune de El Mohamadia wilaya de Mascara, et Nord-Ouest par la commune de Bouguirate wilaya de Mostaganem.
- ◆ À l'est, la commune d'El-Matmar (wilaya de Relizane).



Figure n° II.1 : Situation Géographique de la ville de Yellel (ANIREF).

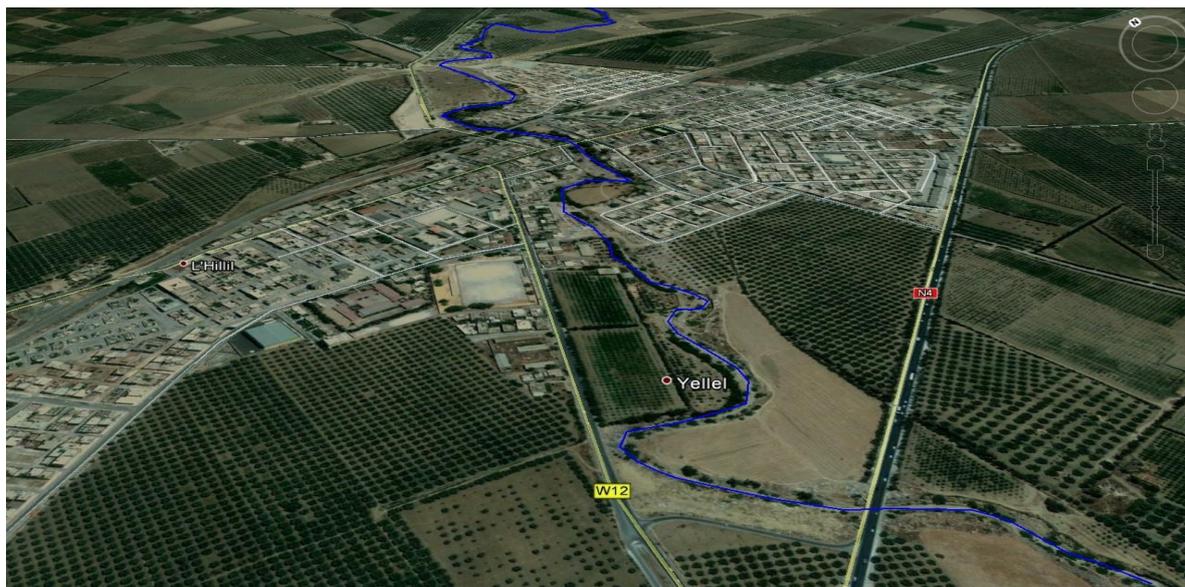


Figure n° II.2 : Image satellitaire de la ville de Yellel (google earth, mars 2018).

II.2.2. Caractéristiques climatiques :

Les données climatiques du secteur d'étude est basée sur les données climatologiques de plusieurs stations proches de la zone d'étude surtout celle de Yellel.

II.2.2.1. Température :

La région de Yellel possède un climat méditerranéen caractérisé par une température sèche et chaude de mai à septembre et par une température relativement humide d'octobre à avril. A titre d'exemple le tableau II.1 illustre les valeurs de températures (°C) enregistrées à la station de Matmeur qui s'éloignent à quelques km de la région. Pour la période (1970/1971-1999/2000).

Tableau n° II.1 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales (1970/2000).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Moy Ann
T _{moy}	24.1	19.6	14.7	11.1	10.2	11.7	13.3	15.5	19.5	24.0	27.7	28.1	17.46
T _{min}	17.7	13.9	9.3	6.9	5.2	6.4	7.5	9.7	13.2	17.4	20.4	20.9	12.38
T _{max}	31.1	25.5	20.1	16.1	15.3	17.0	19.2	21.4	25.5	30.7	35.0	35.3	24.35

Source : ANRH Oran.

Tel que : T_{min} : température minimale moyenne.
 T_{max} : température maximale moyenne.
 T_{moy} : température moyenne.

Interprétation : d'après le tableau précédent on constate que :

♦ Des minimas de température peuvent être enregistrés au mois de janvier (T = 5.2 °C) et mois de février (T = 6.4 °C).

- ◆ Des maxima de température peuvent être enregistrés au mois d'aout (T = 35.3 °C) et mois de juillet (T = 35 °C).
- ◆ La température moyenne annuelle est de 17.46 °C.

II.2.2.2. Pluviométrie :

Les données pluviométrie sont plus ou moins régulières, assez complètes et étalées sur une période d'observation assez longue (de 1969 à 2012).

Le tableau ci-dessous présente les données des précipitations mensuelles (mm) de la station de Yellel :

Tableau n° II.2 : Répartition mensuelle moyenne interannuelle de la précipitation.

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mais	Juin	Juill	Aout
P _{moy} (mm)	11.3	28.1	44.4	44.6	41.3	40.8	35.7	35.5	24.1	5.3	1.1	2.8

Source : ANRH Oran.

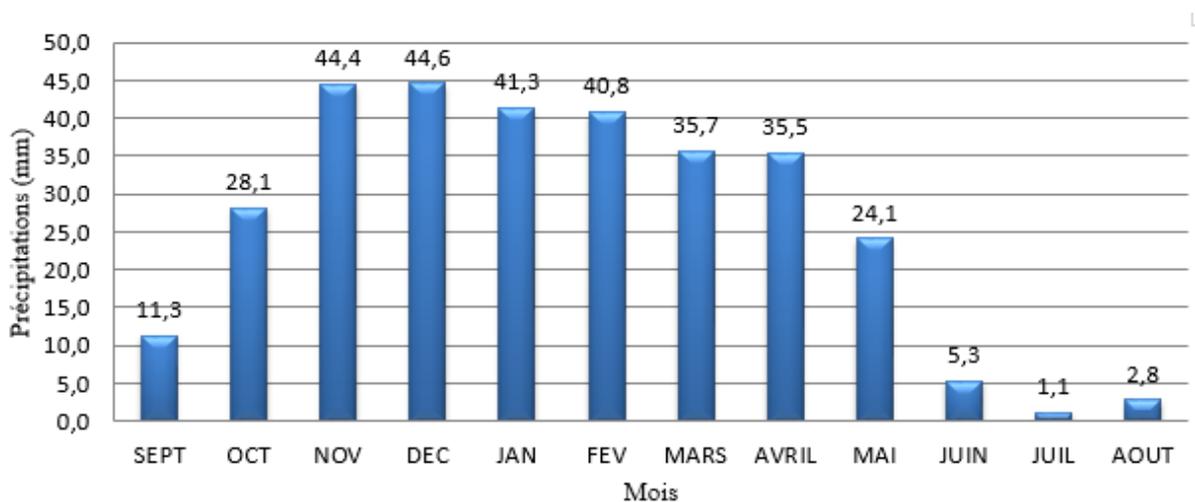


Figure n° II.3 : La répartition moyenne mensuelle des précipitations.

Interprétation : l'analyse des données pluviométriques montre que la hauteur maximale des précipitations est enregistrée au mois de décembre (44.6 mm), tandis que le minimum est atteint au mois de juillet (1.1 mm), la pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 280 mm.

II.2.2.3. Vent :

Les vents dominants soufflent de l'Ouest vers le Sud-Ouest. La valeur de la vitesse moyenne mensuelle variée généralement entre 2,3 m/s et 2,9 m/s. (Source : ANRH Oran)

II.2.2.4. Humidité :

L'humidité moyenne sur l'année est de 46 % à Relizane et ces environs. L'humidité mensuelle varie très peu d'un mois à un autre autour de la valeur moyenne. (Source : ANRH Oran)

II.2.3. Topographie :

La région d'étude est située dans la plaine de Semmar et les reliefs de Kalaa, les monts d'Oued Yellel sont formés en grande partie de chaînons et de collines qui relèvent progressivement du Nord-Ouest au Sud-Est. Le relief est dans l'ensemble aéré et peu élevé.

La topographie est relativement assez fort et ne présente que quelques ruptures de pentes accentuées par la distribution insuffisante et irrégulière des précipitations. L'écoulement des eaux pluviales se fait du Sud-Nord est caractérisé par plusieurs cours d'eau (les oueds et les chaabats).

II.2.4. Géologie et hydrogéologie :

Le zone d'étude se trouve, d'un point de vu géologique et lithostratigraphique, s'inscrit dans la région de Mascara. La plaine de Semmar se trouve au sien d'une formation continentale du pliocène supérieur ou du quaternaire ancien, constitué d'un placage complexe de cailloux roulés, d'éboulis remaniés, de travertins et de sables argileux plus ou moins consolidés est masquant le substratum imperméable formé de marnes schisteuses du crétacé. La plaine de Semmar est bordée par les montagnes de Kalaa formés de calcaires transgressifs sur la série crétacé. Le contact calcaires-marnes est masqués par des nappes d'éboulis qui se raccordent insensiblement aux alluvions plio-quaternaire de la plaine. Les eaux infiltrées et emmagasinées dans les horizons calcaires des reliefs de Kalaa. (Voir l'annexe 1)

II.2.5. Sismicité :

Le territoire national est divisé en 05 zones de sismicité croissante, définies comme suit :

- ◆ Zone 0 : sismicité négligeable.
- ◆ Zone I : sismicité faible.
- ◆ Zone II.a et II.b : sismicité moyenne.
- ◆ Zone III : sismicité élevée.



Figure n° II.4 : La carte des zones sismiques de l'Algérie (structure parasismic).

Interprétation : la région d'étude se trouve dans la zone sismique IIa qui est caractérisé par une sismicité moyenne.

II.3. Présentation du bassin versant d'Oued Yellel :

II.3.1. Bassin versant d'Oued Yellel :

Un bassin versant est une unité topographique tel que chaque goutte d'eau tombée non évaporée ou absorbé par infiltration est acheminée et s'écoulée en un seul point qui est la section droite du cours d'eau appelée l'exutoire qui peut être : un site de barrage, une confluence, une embouchure. Le bassin versant est limité par des frontières naturelles : lignes de crêtes ou lignes de partage des eaux.

Le bassin d'Oued Yellel est situé au Sud-Ouest de Relizane, il fait partie du bassin du Cheliff. Le bassin versant de l'oued Yellel dont les lignes de crête se situent entre 98 et 924 m. Le réseau hydrographique se caractérise par un écoulement suivant une direction Sud-Nord.

II.3.2. Etude hydromorphologique du bassin versant :

Les caractéristiques morphométriques et hydrographiques ont été calculées à partir de la carte d'élévation (modèle numérique du terrain-MNT) avec une résolution de 30 m et par l'utilisation du logiciel Arcgis V 10.4.1.

II.3.2.1. Paramètres morphométriques :

a - La surface S :

La surface topographique est le paramètre le plus important. Il permet de contrôler l'intensité de plusieurs phénomènes hydrologiques (apports solide et liquide, lame d'eau ruisselée, lame d'eau infiltrée, ...).

b - Le périmètre P :

Le périmètre correspond à la limite extérieure du bassin. Il sert uniquement à calculer l'indice de compacité.

c - Indice de compacité de Gravelius K_c :

Indice de Gravelius appelé aussi indice de forme. Cet indice caractérise la forme du bassin et exprime l'allongement des bassins versants. Il égale le rapport entre le périmètre du bassin P et le périmètre du cercle de surface équivalente :

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{S}} \approx 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

Avec : P : périmètre du bassin versant en (km).

S : surface du bassin versant en (Km²).

Il est égal à 1 pour un bassin circulaire (ramassé) et croît d'autant plus que la compacité diminue.

d - Rectangle équivalent :

C'est une transformation purement géométrique en un rectangle de même surface. Il permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue d'écoulement. Il est caractérisé par la longueur L et la largeur l définie par la formule suivante :

$$L, l = K_c \frac{\sqrt{S}}{1,128} \left(1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right) \dots\dots\dots \text{(II.2)}$$

Avec :

- L : longueur du rectangle (Km).
- l : largeur du rectangle (Km).
- K_c : indice de compacité de Gravelius.
- S : la surface du bassin versant (Km²).

Les résultats des paramètres morphométriques du bassin versant d'Oued Yellel sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n° II.3 : Résultats des paramètres morphométriques.

Bassin versant	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	K_c	Longueur (km)	Largeur (km)
Oued Yellel	168,78	95,81	2,06	43,58	3,87

Interprétation : pour notre bassin versant : $K_c = 2.06$ donc c'est un bassin versant de forme allongée.

II.3.2.2. Paramètres des reliefs :**a - Courbe hypsométrique :**

La courbe hypsométrique ou bien la courbe des fréquences altimétriques a une grande importance dans l'étude du relief d'un bassin versant car la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques (précipitations, températures, débits, etc.) étant fonction de l'altitude. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en ordonnée l'altitude en (m) et en abscisse la surface cumulée en (%).

Tableau n° II.4 : Surfaces partielles du bassin versant par tranche d'altitude.

Altitudes (m)	Surfaces partielles (km ²)	Surfaces partielles (%)	Surfaces cumulées (km ²)	Surfaces cumulées (%)
98 – 200	42,73	25,32	42,73	25,32
200 – 300	22,95	13,60	65,68	38,91
300 – 400	35,29	20,91	100,97	59,82
400 – 500	11,72	6,94	112,69	66,77
500 – 600	9,71	5,75	122,40	72,52
600 – 700	13,84	8,20	136,24	80,72
700 – 800	26,15	15,49	162,39	96,21
800 – 924	6,39	3,79	168,78	100,00
Totaux	168,78	100,00	168,78	

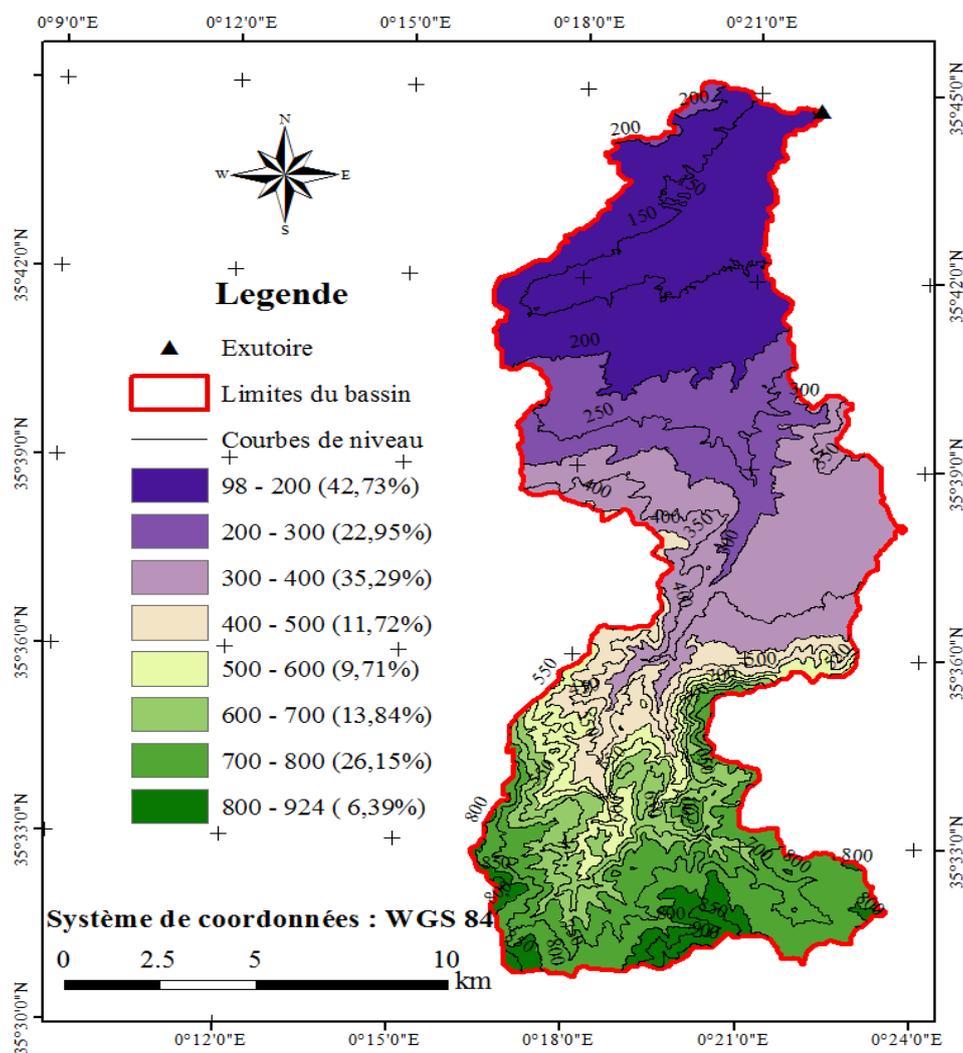


Figure n° II.5 : La carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Yellel.

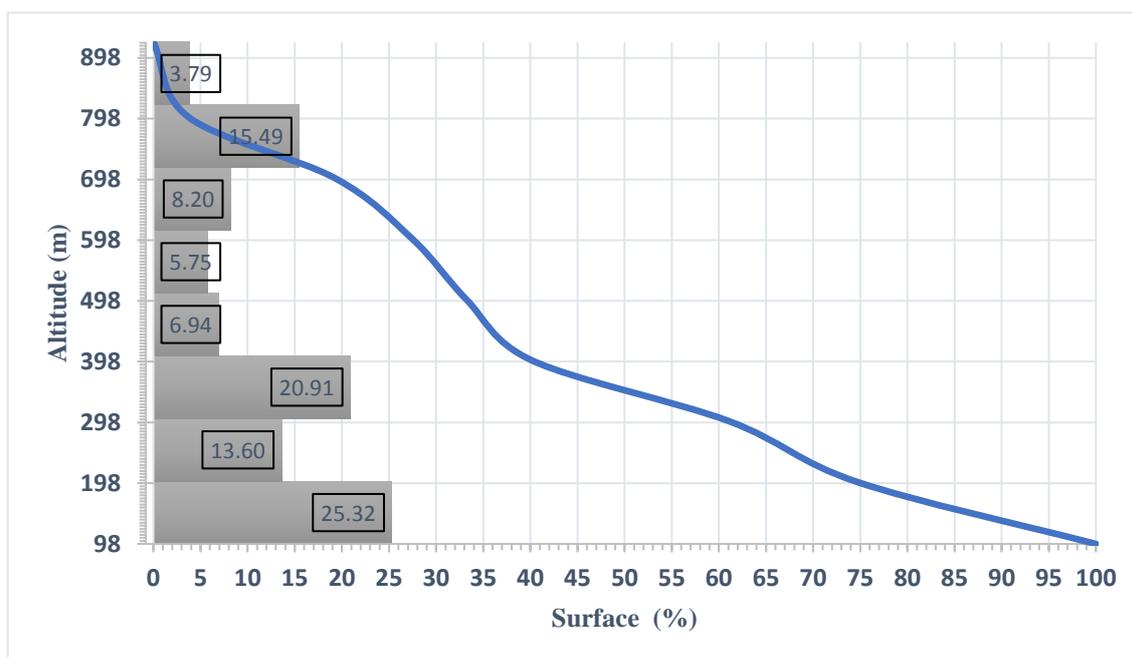


Figure n° II.6 : La courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Yellel.

b - Altitudes caractéristiques :

La courbe ci-dessus permet de déterminer les altitudes caractéristiques suivantes :

♦ **L'altitude maximale et minimale :**

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

♦ **Les altitudes de fréquence 5%, 50% et 95% :**

Sont les altitudes correspondant respectivement aux points d'abscisse 5%, 50% et 95% de la courbe hypsométrique.

♦ **L'altitude moyenne :**

Est calculée par la formule suivante :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i H_i}{S} \text{ [m]} \dots\dots\dots (\text{II.3})$$

Avec :

$$H_i = \frac{H_{n+1} + H_n}{2} \dots\dots\dots (\text{II.4})$$

S_i : surface partielle entre deux courbes de niveaux successives en (Km²).

S : surface totale du bassin versant en (Km²).

H_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveaux successives en (m).

Tableau n° II.5 : Calcul de l'altitude moyenne.

H _i (m)	S _i (km ²)	H _i * S _i
149	42,73	6366,77
250	22,95	5737,50
350	35,29	12351,50
450	11,72	5274,00
550	9,71	5340,50
650	13,84	8996,00
750	26,15	19612,50
862	6,39	5508,18
Somme	168,78	62820,18

Les résultats de calcul des différentes altitudes du bassin versant d'Oued Yellel sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau n° II.6 : Les différentes altitudes caractéristiques du bassin d'Oued Yellel.

Altitudes (m)	H _{max}	H _{min}	H _{5%}	H _{50%}	H _{95%}	H _{moy}
		924	98	792	353	118

c – Indices de pente :

Le relief d'un bassin versant est caractérisé par des indices qui ont été définis pour rendre compte de l'influence de la pente sur le régime hydrologique.

♦ Indice de pente globale I_g :

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

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \text{ [m/Km]} \dots\dots\dots \text{(II.5)}$$

Avec : D : dénivelée entre H_{5%} et H_{95%} (m.)
L : longueur du rectangle équivalent (Km).

♦ Indice de pente de Roche I_p :

L'indice de pente de Roche est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces comprises entre 2 courbes de niveau H_i et H_{i+1}. I_p est donné par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i (H_i - H_{i-1})} \dots\dots\dots \text{(II.6)}$$

Avec : L : longueur du rectangle (Km).
S_i : surface partielle (%) comprise entre 2 courbe de niveau H_i et H_{i-1} (m).

Tableau n° II.7 : Calcul de la pente de Roche.

Cotes (m)	H _i - H _{i-1} (m)	S _i (%)	S _i * (H _i - H _{i-1})
98 - 200	102	25,32	2582,64
200 - 300	100	13,60	1360,00
300 - 400	100	20,91	2091,00
400 - 500	100	6,94	694,00
500 - 600	100	5,75	575,00
600 - 700	100	8,20	820,00
700 - 800	100	15,49	1549,00
800 - 924	124	3,79	469,96
	Somme	100	10141,60

♦ **Indice de pente moyenne du bassin versant I_m :**

Elle est donnée par la formule :

$$I_m = \frac{\Delta H(0,5l_1 + l_2 + l_3 + \dots + 0,5l_n)}{S} [\%] \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

Avec : l_i : longueur totale de courbes de niveau (km).
 ΔH : équidistance entre deux courbes de niveau (Km).
 S : surface du bassin versant (km²).

Tableau n° II.8 : Longueur des courbes de niveau.

Cote de la courbe de niveau (m)	Longueur (km)
100	0,51
200	21,98
300	26,01
400	24,14
500	26,51
600	33,09
700	44,58
800	24,72
900	2,53

♦ **Dénivelée spécifique D_s :**

La dénivelée spécifique permet définir les différents types du relief des bassins versants quelque soient leurs superficies. Elle est définie comme suit :

$$D_s = I_g \sqrt{S} [m] \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

Avec : I_g : indice de pente globale (m/Km).
 S_i : surface du bassin versant (Km²)

Tableau n° II.9 : Les types de reliefs en fonction de Dénivelée spécifique.

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

Les résultats de calcul des différents indices de pente du bassin versant d'Oued Yellel sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau n° II.10 : Les différents indices de pente.

Indices	I_g (m/Km)	I_p	I_m (%)	D_s (m)
	15,47	15,25	12	201

Interprétation : le bassin versant d'Oued Yellel est caractérisé par un relief assez fort.

II.3.2.3. Réseau hydrographique :

♦ Ordre du bassin versant :

Le travail consiste à classer les cours d'eau suivant la classification de Schumm, dont le principe est résumé à la manière suivante :

- Tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1.
- Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre.
- Au confluent de deux cours d'eau de même ordre n , le cours d'eau résultant est d'ordre $n+1$.

Tableau n° II.11 : Nombre et longueur des talwegs.

Ordre	Nombre du cours d'eau	Longueur (km)
1	85	70,18
2	41	28,42
3	39	26,74
4	26	20,22
Somme	191	145,56

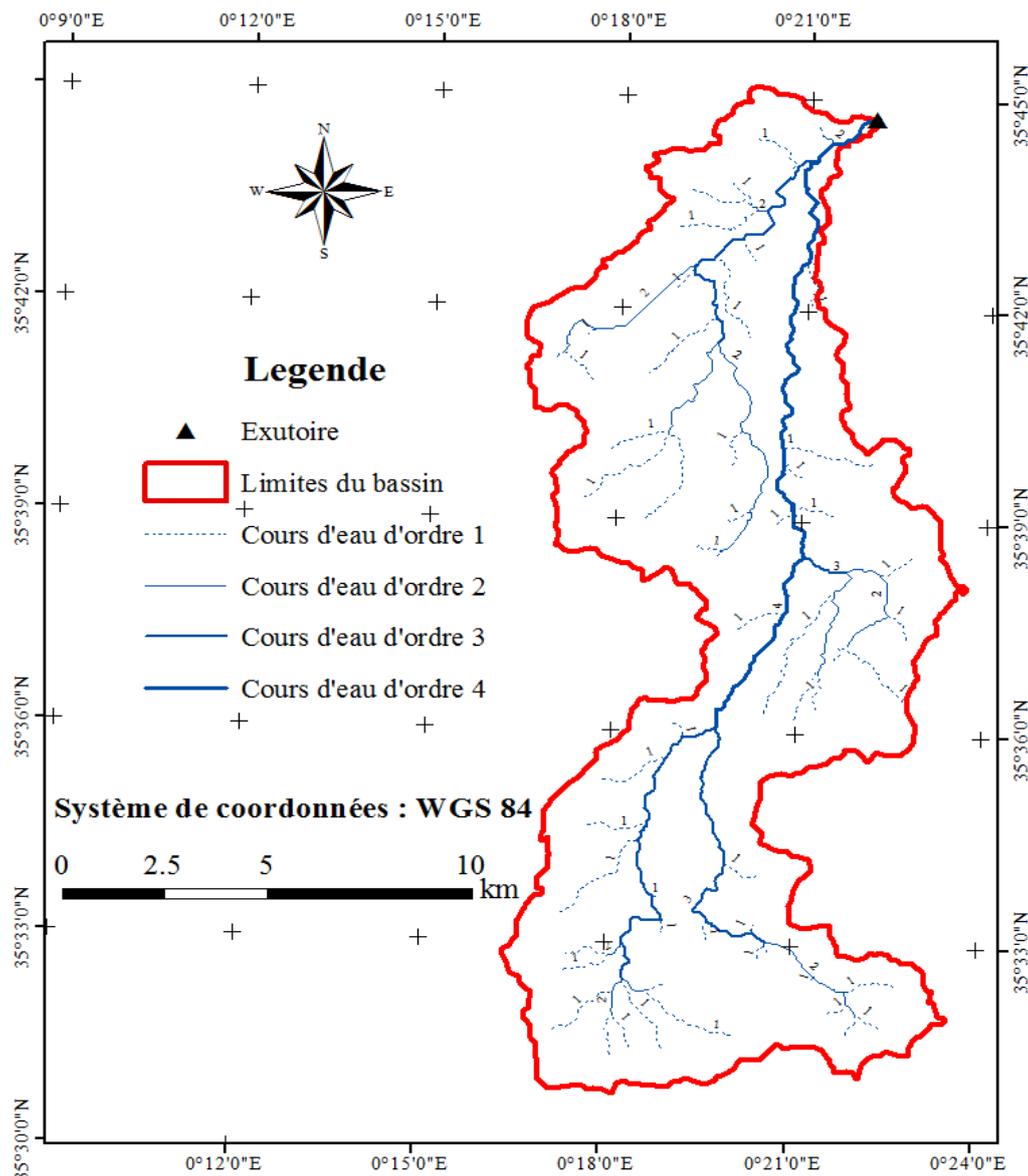


Figure n° II.7 : Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Yellal (classification de Schumm).

◆ **Densité de drainage D_d :**

La densité de drainage a une relation directe avec la dissection des reliefs. Elle est définie comme étant le rapport entre la longueur totale de tous les talwegs du bassin versant, à la surface totale. Elle donné par la formule suivante :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \left[\text{Km/Km}^2 \right] \dots\dots\dots (\text{II.9})$$

Avec : $\sum_{i=1}^n L_i$: longueur des cours d'eau (Km).
 S : surface du bassin versant (Km²).

♦ **La pente moyenne du cours d'eau principale I_c :**

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse d'écoulement jusqu'à arriver à l'exutoire du bassin. Elle a une influence sur le temps de concentration par suite sur le débit maximal. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$I_c = \frac{\Delta H}{L_{cp}} [\%] \dots\dots\dots (\text{II.10})$$

Avec : ΔH : dénivellation maximale de la rivière (km).
 L_{cp} : longueur du cours d'eau principal (km).

♦ **Temps de concentration T_c :**

Il existe dans la littérature technique plusieurs formules estimer le temps de concentration. Nous citons ici les formules les plus utilisées tel que : Giandotti, Ventura, Kirpich, California, Passini. Pour notre cas, on opte pour la formule de Kirpich car le bassin versant d'Oued Yellel satisfait seulement les conditions et les limites de cette formule :

$$T_c = 0.000325 \frac{L_{cp}^{0.77}}{I_c^{0.385}} [\text{h}] \dots\dots\dots (\text{II.11})$$

Avec : L_{cp} : longueur du cours d'eau principal (m).
 I_c : la pente moyenne du cours d'eau principale en (m/m).

♦ **Vitesse moyenne de ruissellement V_r :**

La vitesse de ruissellement est calculée en utilisant le temps de concentration de la formule de kirpich. Cette vitesse est donnée par la formule :

$$V_r = \frac{L_{cp}}{T_c} [\text{Km/h}] \dots\dots\dots (\text{II.12})$$

Avec : L_{cp} : longueur du cours d'eau principal (km).
 T_c : temps de concentration (h).

Les résultats de calcul des différents paramètres de réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Yellel sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau n° II.12 : Les différents paramètres du réseau hydrographiques.

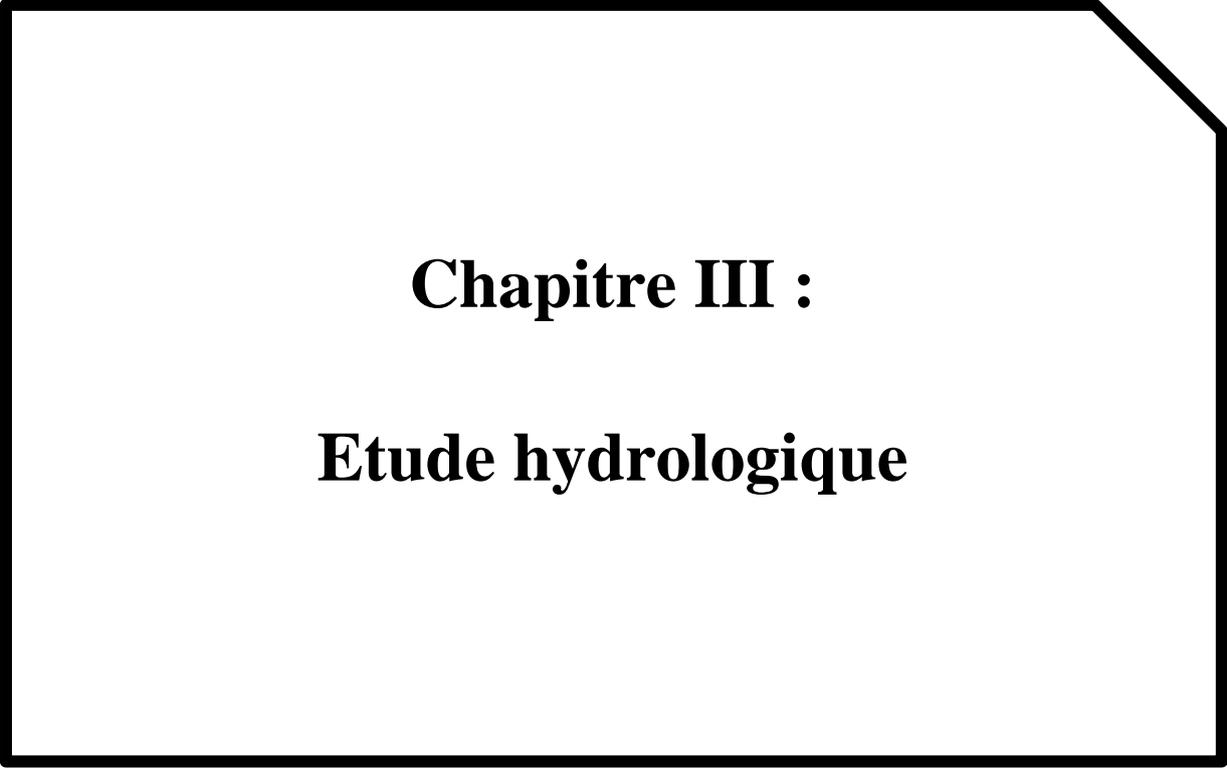
Bassin versant	Densité de drainage (Km/Km ²)	Longueur du cours d'eau principal (Km)	I_c (%)	T_c (h)	V_r (km/h)
Oued Yellel	0.86	33.02	2.1	4.34	7.61

Tableau n° II.13 : Récapitulatif des caractéristiques hydromorphologiques du bassin versant d'Oued Yellel.

Caractéristiques		Symboles	Unités	Valeurs
Morphométrie				
Superficie		S	Km ²	168,78
Périmètre		P	Km	95,81
Coefficient de compacité de Gravelius		K _c	-	2,06
Rectangle équivalent	Longueur	L	Km	43,58
	Largeur	l	Km	3,87
Reliefs				
Altitudes	Maximale	H _{max}	m	924
	Moyenne	H _{moy}	m	372
	Minimale	H _{min}	m	98
	Altitudes de fréquence 5%	H _{5%}	m	792
	Altitudes de fréquence 95%	H _{95%}	m	118
	Altitudes de fréquence 50%	H _{50%}	m	353
Indice de pente globale		I _g	m/Km	15,47
Indice de pente de Roche		I _p	%	15,25
Indice de pente moyenne du bassin versant		I _m	%	12
Dénivelée spécifique		D _s	m	201
Réseau hydrographique				
Longueur du cours d'eau principal		L _{cp}	Km	33,02
Pente moyenne du cours d'eau		I _c	%	2,1
La somme des longueurs des talwegs		ΣL _i	km	145,56
Densité de drainage		D _d	Km/Km ²	0,86
Temps de concentration		T _c	h	4,34
Vitesse de ruissellement		V _r	Km/h	7,61

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons dégagé et analysé toutes les informations et les caractéristiques géographiques, climatologiques, topographiques, géologiques, hydrogéologiques et hydromorphologiques de la région d'étude pour une présentation fautive de la zone et afin d'estimer la crue.



Chapitre III :
Etude hydrologique

Introduction :

L'étude hydrologique pour la réalisation d'un ouvrage hydrotechnique révèle une importance considérable. Le but est donc d'analyser les données pluviométriques pour la détermination de la pluie maximale fréquentielle et les pluies de courte durée qui sont généralement génératrices des inondations et par conséquent la détermination des débits de pointes des crues d'Oued Yellel convenants aux différentes périodes de retour.

III.1 Présentation de la station pluviométrique :

Pour l'étude de précipitation, nous prenons directement les données de mesure du poste pluviométrique de Yellel. Cette station est la plus proche, et ayant une période de fonctionnement longue et suffisante (de 1969 à 2012). Elle se trouve aux coordonnées Lambert Algérie suivantes :

Tableau n° III.1: Caractéristiques du poste pluviométrique Yellel.

Station	Code	Coordonnées		
		X (Km)	Y (Km)	Z (m)
Yellel	13507	288.65	272	125

Source : ANRH Oran.

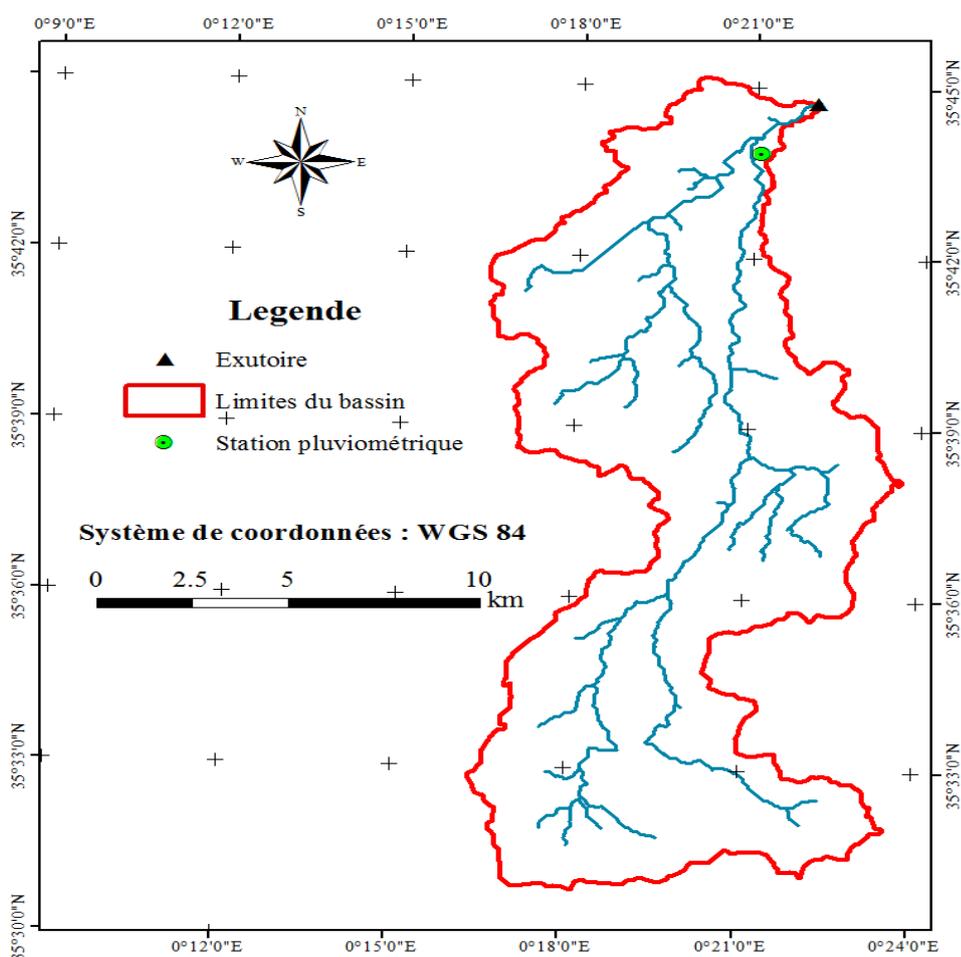


Figure n° III.1: Localisation de la station pluviométrique de Yellel.

III.2 Etude des précipitations maximales journalières :

Dans le but de l'estimation des pluies maximales fréquentielles, on a construit une série de pluies maximales journalières. Le travail sur cette dernière se fera de la manière suivante :

- ◆ Calcul des paramètres statistiques de la série.
- ◆ Ajustement à une loi statistique (calcul des quantiles pour différentes périodes de retour).
- ◆ Choix de la loi adéquate.
- ◆ Calcul des pluies et intensités de courte durée.

Le calcul des paramètres de la série, l'ajustement à des lois, le calcul des quantiles et l'adéquation sont tous fait par l'utilisation du logiciel Hyfran.

Tableau n° III.2 : Série des pluies maximales journalières de la station de Yellel.

Année	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avrl	Mai	Juin	Juil	Aout	P _{jmax} (mm)
1969	0.0	14.5	3.0	9.0	3.8	2.5	13.0	15.0	9.5	0.0	0.0	0.0	15.0
1970	2.3	6.0	6.5	11.0	23.0	14.0	20.0	24.0	64.0	5.0	0.0	0.0	64.0
1971	11.0	6.0	38.0	11.5	32.0	24.0	28.0	5.5	26.5	1.5	0.5	5.0	38.0
1972	10.0	20.5	8.5	22.0	39.5	21.5	18.5	18.0	1.0	19.0	0.0	0.5	39.5
1973	24.0	0.0	6.5	26.5	8.0	18.0	14.0	33.5	0.5	12.0	0.0	5.0	33.5
1974	3.5	22.5	30.5	0.0	10.0	13.0	37.5	33.5	12.5	2.0	0.0	3.0	37.5
1975	6.5	0.5	13.5	7.0	21.0	11.5	6.5	13.0	12.5	12.5	1.5	12.1	21.0
1976	12.0	12.0	5.0	22.0	15.8	5.3	7.8	6.5	25.1	14.0	0.7	0.0	25.1
1977	0.0	8.3	13.2	16.8	29.2	3.9	14.0	20.7	11.0	0.0	0.0	0.0	29.2
1978	0.0	36.5	12.4	11.5	8.2	21.5	7.5	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	36.5
1979	8.5	12.6	7.2	54.0	12.9	16.1	18.2	21.9	17.3	0.0	0.0	0.0	54.0
1980	7.2	6.4	3.0	30.2	23.9	20.3	17.1	7.8	1.7	3.2	0.0	0.0	30.2
1981	0.5	0.0	0.0	7.1	6.4	16.8	2.4	6.3	5.2	0.0	0.0	0.2	16.8
1982	2.0	30.5	33.0	18.6	0.0	16.5	8.2	1.8	0.4	0.0	0.0	0.9	33.0
1983	0.0	0.0	16.8	7.6	11.8	17.3	24.8	9.2	15.9	4.9	0.0	0.0	24.8
1984	8.0	4.8	32.0	20.9	15.2	5.1	10.6	8.1	12.1	0.0	0.0	0.0	32.0
1985	3.2	19.4	10.4	29.4	22.7	18.1	12.4	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	29.4
1986	14.2	16.2	2.6	8.9	21.8	16.2	1.9	0.0	8.8	0.0	1.5	0.0	21.8
1987	1.2	14.0	21.0	12.2	30.0	10.5	4.3	6.7	21.7	0.0	0.0	0.0	30.0
1988	1.5	2.3	11.2	16.0	3.8	7.7	35.3	10.5	1.6	5.7	0.0	3.7	35.3
1989	3.0	0.0	5.6	9.0	15.2	1.2	11.2	19.0	19.3	0.0	3.4	3.0	19.3
1990	9.9	5.0	16.4	12.4	10.7	13.4	29.1	1.9	8.8	0.0	1.7	3.0	29.1
1991	13.4	14.9	31.1	6.0	8.2	4.0	24.5	7.6	10.6	11.1	1.0	0.0	31.1
1992	0.0	3.0	12.8	19.3	0.0	11.9	5.2	20.2	21.9	1.2	0.0	0.4	21.9
1993	4.6	22.3	12.2	8.8	13.8	20.3	0.0	13.4	3.4	0.0	0.0	0.0	22.3
1994	7.3	13.5	17.2	2.9	8.2	11.6	25.3	5.8	0.4	0.9	0.0	12.7	25.3
1995	9.8	32.7	26.7	7.5	21.6	20.8	9.2	23.9	4.0	4.5	22.6	0.0	32.7
1996	5.6	3.5	1.7	7.7	21.2	6.5	0.0	51.1	4.0	0.0	0.0	3.2	51.1

Suite du tableau n° III.2 : Série des pluies maximales journalières de la station de Yellel.

Année	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avrl	Mai	Juin	Juil	Aout	P _{jmax} (mm)
1997	16.3	15.9	32.6	16.9	5.6	4.8	4.6	11.8	19.4	0	0	0	32.6
1998	0.8	3.4	6.2	36.6	18.3	14.3	35	0	5.5	0	0	0	36.6
1999	18.2	7.6	9.7	16.4	0	0	6.2	1.9	7.6	0	0	0	18.2
2000	19.9	52.7	28.4	8.2	10.2	21.9	1.5	30.5	5.2	0	0	0	52.7
2001	9.8	10.4	85.4	7.2	3.8	0.3	8.8	16.9	37.4	0	0	3.5	85.4
2002	0	16.7	12.9	5.3	19.9	11.7	1.8	40	13.4	1.5	0	0	40
2003	0	9.6	15.8	42.2	13.7	9.8	7.9	10.2	33.4	6.5	0	0	42.2
2004	4.8	12.7	22	65.2	4.8	26.3	8.2	5.2	0	0	0	0	65.2
2005	6.2	11.2	40	7.8	41.5	12	8.2	10.8	35.8	5.8	0	0	41.5
2006	6.6	0	0	30.6	26.7	8	21.5	25.9	4.9	0	0	0	30.6
2007	10.1	27.4	20.6	4	13.7	3.7	8.9	11.7	15	0.7	5.4	0	27.4
2008	4.8	18.4	33.2	22.1	14.1	8.4	13.2	17.1	3	0	0	0	33.2
2009	27.2	2.2	13.9	12.8	18.8	26.8	26.3	10.4	8.8	0	0	21.4	27.2
2010	2.9	17.7	8.8	6.5	26.3	18.5	10.7	18.2	11.9	14.4	0	0	26.3
2011	4.5	6	14.7	10.7	9.8	15.7	12.2	25.4	0.7	0	0	0	25.4
2012	6.2	16.7	24.6	19.4	30.6	8.2	15.3	21.1	16.4	0	0	0	30.6

Source : ANRH Oran.

La variabilité chronologique des pluies maximales journalières durant 44 ans d'enregistrement est représentée dans la figure ci-dessous :

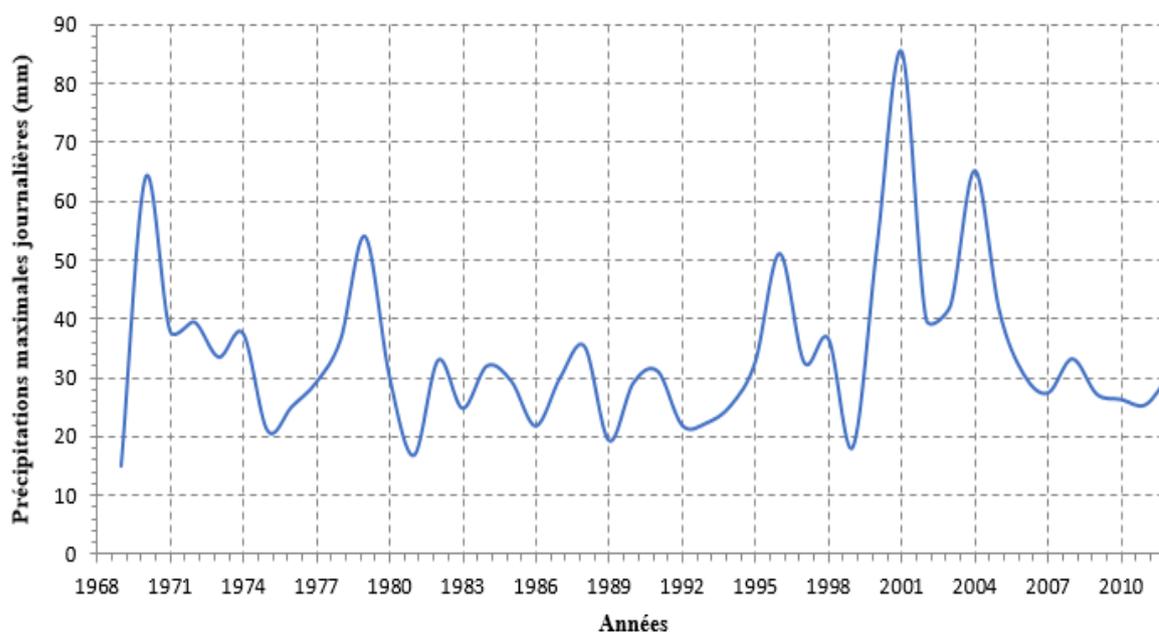


Figure n° III.2 : Variabilité chronologique des pluies maximales journalières.

III.2.1 Paramètres statistiques de la série :

Les paramètres empiriques de la série des pluies maximales journalières sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau n° III.3 : Caractéristiques statistiques de la série $P_{j \max}$.

Nombre d'observations	44
Minimum	15
Maximum	85,4
Moyenne	34,0
Ecart-type	13,7
Médiane	30,9
Coefficient de variation Cv	0,40

III.2.2 Ajustement statistique :

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, les caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel, qui est une description mathématique du comportement d'une variable aléatoire.

On a effectué l'ajustement de la série des pluies maximales journalières à :

- ◆ Loi de Gumbel.
- ◆ Loi de Galton (ou log-normale ou de Gibrat-Gauss).
- ◆ Loi des extrêmes généralisée (GEV ou loi de Jenkinson).

Pour l'estimation des différents paramètres de ces lois on a choisi la méthode du maximum de vraisemblance car il est démontré que la méthode du maximum de vraisemblance est la plus efficace.

III.2.2.1 Ajustement à la loi de Gumbel :

Elle est dite aussi loi doublement exponentielle ou loi des valeurs extrêmes. La fonction de répartition de la loi s'exprime de la manière suivante :

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

$$u = \frac{x - x_0}{\alpha} \dots\dots\dots(\text{III.2})$$

Avec : u : la variable réduite de Gumbel.
 x : la précipitation maximale journalière (mm)
 x_0 : le paramètre de position (ordonnée à l'origine).
 α : le paramètre d'échelle.

L'équation de la droite de Gumbel sera : $x = \alpha u + x_0$ (III.3)

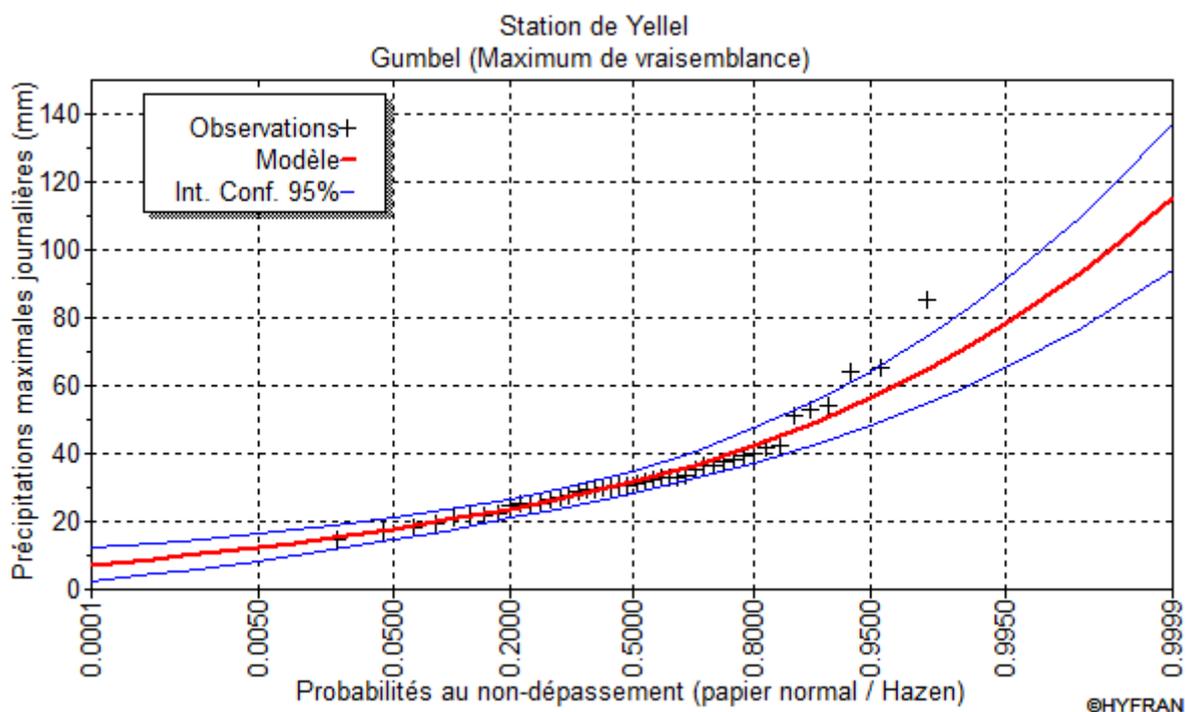


Figure n° III.3 : Représentation graphique de l'ajustement à la loi de Gumbel.

Le résultat de l'estimation des paramètres de la loi de Gumbel sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau n° III.4 : Les paramètres de la loi de Gumbel.

x_0	28,19
α	9,47

Les résultats de calcul des quantiles sont exposés dans le tableau suivant :

Tableau n° III.5 : Quantiles théoriques de Gumbel.

Période de retour T (ans)	Fréquence non dépassement q (%)	Valeurs théoriques $P_{\max j}(q\%)$	Ecart type σ	Intervalle de confiance 95%
100	99	71,7	5,84	60,3 - 83,2
50	98	65,1	5,08	55,2 - 75,1
20	95	56,3	4,08	48,3 - 64,3
10	90	49,5	3,33	43,0 - 56,0
5	80	42,4	2,58	37,3 - 47,5
2	50	31,7	1,67	28,4 - 34,9

III.2.2.2 Ajustement à la loi de Galton :

La loi de Galton s'appelle également loi log-normale ou loi de Gibrat-Gauss. La fonction de répartition est donnée par la représentation suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \dots\dots\dots(III.4)$$

La variable réduite est de la forme : $u = \frac{\ln x - \overline{\ln x}}{\sigma_{\ln x}} \dots\dots\dots(III.5)$

- Avec : u : la variable réduite de Galton.
- $\overline{\ln x}$: la moyenne de la série $\ln x_i$.
- $\sigma_{\ln x}$: écart type de la série $\ln x_i$.

Donc l'équation de la droite présentée sur le papier Gausso-logarithmique sera :

$$\ln x = \overline{\ln x} + \sigma_{\ln x} u \dots\dots\dots(III.6)$$

Le résultat de l'estimation des paramètres de la loi de Galton sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n° III.6 : Les paramètres de la loi de Galton.

$\overline{\ln x}$	3,46
$\sigma_{\ln x}$	0,36

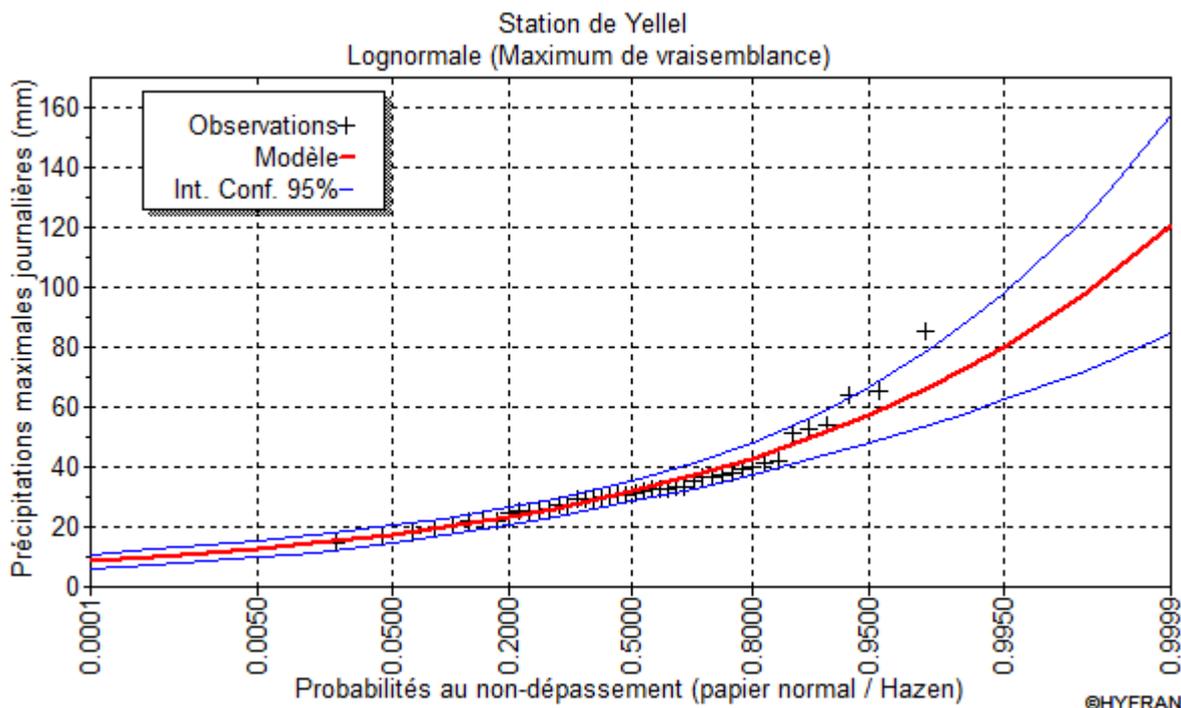


Figure n° III.4 : Représentation graphique de l'ajustement à la loi de Galton.

Les résultats de calcul des quantiles sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau n° III.7 : Quantiles théoriques de Galton.

Période de retour T (ans)	Fréquence non dépassement q (%)	Valeurs théoriques P _{max j} (q%)	Ecart type σ	Intervalle de confiance 95%
100	99	73,3	7,71	58,2 - 88,4
50	98	66,5	6,40	53,9 - 79,0
20	95	57,4	4,80	48,0 - 66,8
10	90	50,4	3,70	43,1 - 57,6
5	80	43,0	2,72	37,7 - 48,3
2	50	31,8	1,72	28,4 - 35,1

III.2.2.3 Ajustement à la loi GEV :

La distribution des valeurs extrêmes généralisées est une loi d’ajustement à trois paramètres qui a une fonction de distribution qui s’écrit comme suit :

$$F(x) = e^{-\left[1 - \frac{k(x - x_0)^{\frac{1}{\alpha}}}{\alpha}\right]} \dots\dots\dots(III.7)$$

- Avec : x₀ : le paramètre de position.
- α : le paramètre d’échelle.
- k : le paramètre de forme.

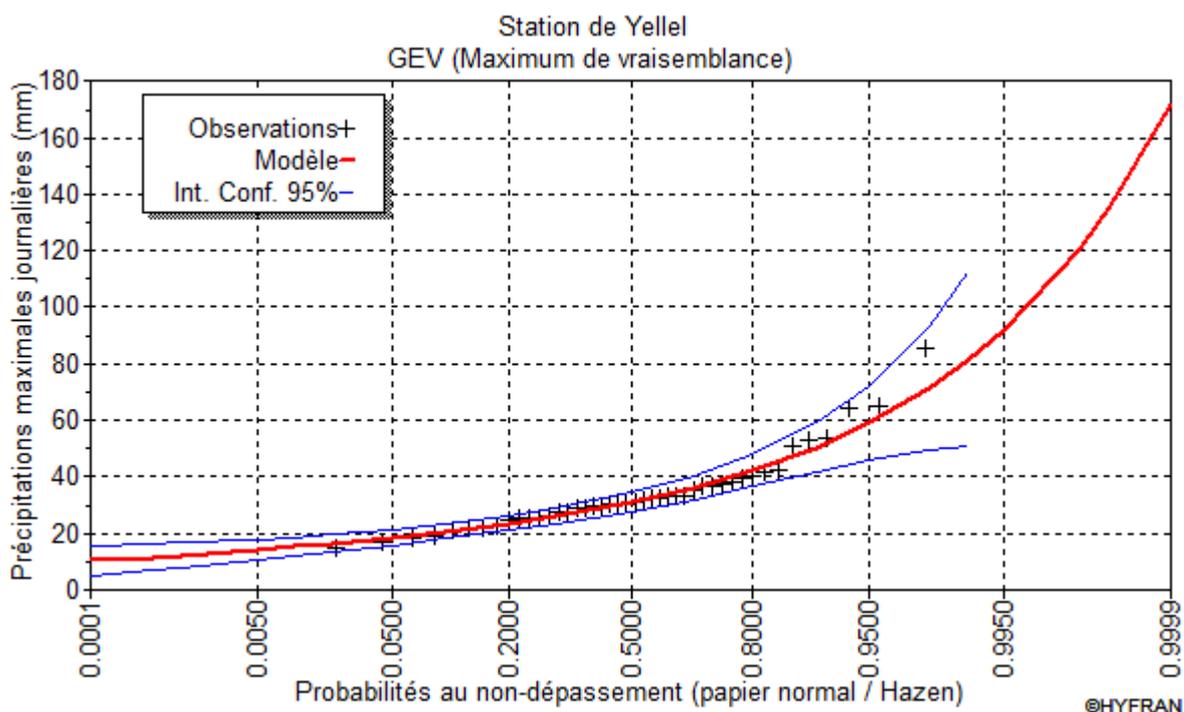


Figure n° III.5 : Représentation graphique de l’ajustement à la loi GEV.

Les résultats de l'estimation des paramètres de la loi GEV sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° III.8 : Les paramètres de la loi GEV.

α	8,89
k	- 0,11
x_o	27,72

Les résultats de calcul des quantiles sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n° III.9 : Quantiles théoriques de GEV.

Période de retour T (ans)	Fréquence non dépassement q (%)	Valeurs théoriques Pmax j (q%)	Ecart type σ	Intervalle de confiance 95%
100	99	81,3	15,70	50,5 - 112
50	98	71,3	11,10	49,6 - 93,0
20	95	59,1	6,62	46,1 - 72,1
10	90	50,5	4,35	42,0 - 59,0
5	80	42,2	2,87	36,6 - 47,9
2	50	31,0	1,74	27,6 - 34,5

III.2.3 Test de validité d'un ajustement :

III.2.3.1 Test d'adéquation du χ^2 (χ^2) :

Le test χ^2 est un test non paramétrique servant à l'adéquation et par conséquent le choix du meilleur ajustement des lois statistiques. Le test basé sur la comparaison entre les variables, $\chi^2_{\text{théorique}}$ et $\chi^2_{\text{calculé}}$ à un risque de 5% autrement dit à un seuil de signification de 95%.

Les résultats du test d'adéquation sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n° III.10 : Résultats du test d'adéquation de χ^2 .

Lois statistiques	Degré de liberté	$\chi^2_{\text{calculée}}$	$\chi^2_{\text{théorique}}$
Gumbel	6	6,32	12,59
Galton	6	6,32	12,59
GEV	5	3,4	11,07

Interprétation : à partir du tableau ci-dessus, les trois lois sont adéquates car $\chi^2_{\text{calculé}}$ est inférieur à $\chi^2_{\text{théorique}}$. Mais, on remarque que l'écart le plus grand entre $\chi^2_{\text{calculé}}$ et $\chi^2_{\text{théorique}}$ est correspondant à celui de la loi GEV donc initialement c'est le modèle qui s'ajusterait le mieux.

III.2.3.2 Test visuel :

Le test visuel est lié directement à l’ajustement graphique. Pour comparer les trois modèles, nous devons tracer sur le même graphe les trois courbes d’ajustement.

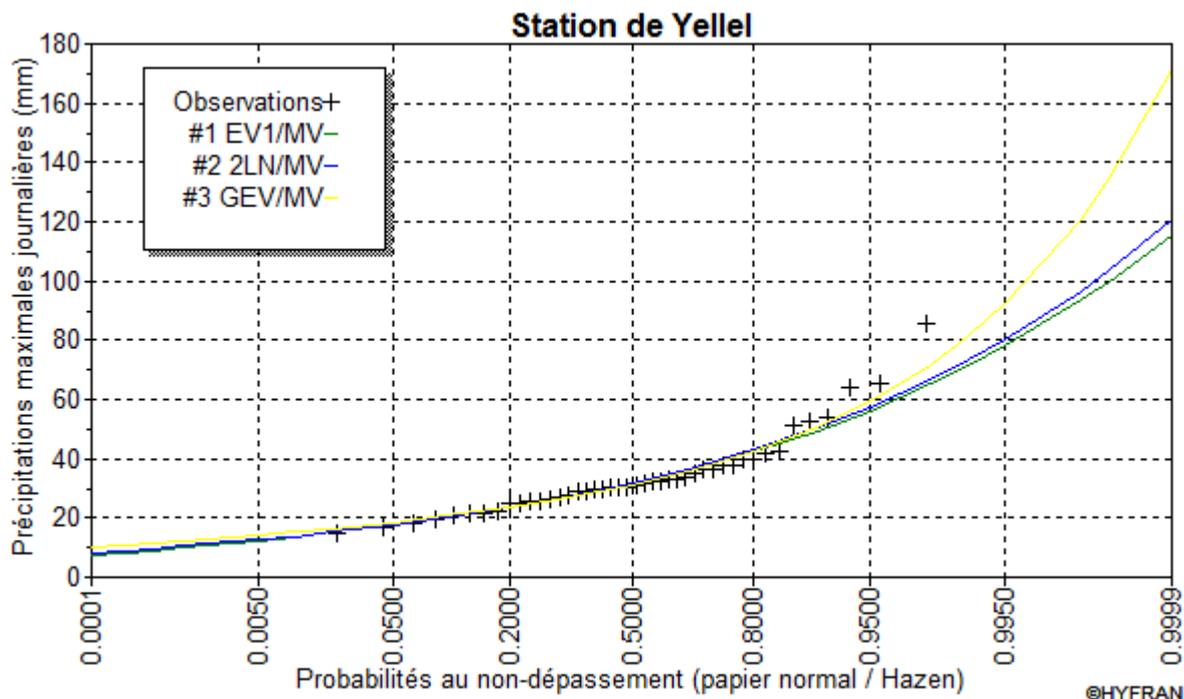


Figure n° III.6 : Représentation graphique de l’ajustement des trois lois.

Interprétation : dans la figure n° III.6, on remarque que l’ajustement issu de la loi GEV est le meilleur, du moment que la position des données expérimentales sont plus proches de la courbe théorique et ça sa confirme la remarque précédente, donc on opte pour cette loi.

III.2.4 Pluies de courte durée :

La pluie de courte durée est utilisée pour l’estimation des crues. Le calcul des pluies de courtes durées pour différentes fréquences a été effectuée à l’aide de la relation de K.Body exprimée par :

$$P_{ct, p\%} = P_{max j, p\%} \left(\frac{t}{24} \right)^b \text{ [mm]} \dots\dots\dots(III.8)$$

- Avec : $P_{ct, p\%}$: pluie de courte durée correspondante à une fréquence donnée.
- $P_{max j, p\%}$: pluie maximale journalière correspondante à une fréquence donnée (mm).
- t : durée de l’averse ($t \leq 24h$).
- b : exposant climatique ($b = 0,39$ selon les études régionales de l’ANRH).

Les intensités maximales sont calculées par la relation suivante :

$$I_{ct, p\%} = \frac{P_{ct, p\%}}{t} \text{ [mm/h]} \dots\dots\dots(III.9)$$

Avec : $I_{ct, p\%}$: intensité maximale d'une durée t (h) correspondante à une période de retour T (ans).

$P_{ct, p\%}$: pluie de courte durée correspondante à une fréquence donnée (mm).

t : durée de l'averse (h).

Les pluies et les intensités maximales journalières nous permette de la mise en œuvre des courbes pluies-durées-fréquences (PDF) et des courbes intensités-durées-fréquences (IDF).

Les précipitations et les intensités d'un pas de temps voulu pour une fréquence voulue sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° III.11 : Récapitulatif des pluies, intensités maximales de durée t (h) et de période de retour T (ans).

T (ans)	10		20		50		100	
t (h)	P_{ct} (mm)	I_t (mm/h)						
0,5	11,16	22,32	13,06	26,12	15,75	31,51	17,96	35,93
1	14,62	14,62	17,11	17,11	20,64	20,64	23,54	23,54
2	19,16	9,58	22,42	11,21	27,05	13,53	30,85	15,42
3	22,44	7,48	26,27	8,76	31,69	10,56	36,13	12,04
4	25,11	6,28	29,38	7,35	35,45	8,86	40,42	10,11
5	27,39	5,48	32,06	6,41	38,67	7,73	44,10	8,82
6	29,41	4,90	34,42	5,74	41,52	6,92	47,35	7,89
7	31,23	4,46	36,55	5,22	44,10	6,30	50,28	7,18
8	32,90	4,11	38,50	4,81	46,45	5,81	52,97	6,62
9	34,45	3,83	40,31	4,48	48,64	5,40	55,46	6,16
10	35,89	3,59	42,01	4,20	50,68	5,07	57,78	5,78
11	37,25	3,39	43,60	3,96	52,60	4,78	59,97	5,45
12	38,54	3,21	45,10	3,76	54,41	4,53	62,04	5,17
13	39,76	3,06	46,53	3,58	56,14	4,32	64,01	4,92
14	40,93	2,92	47,90	3,42	57,78	4,13	65,89	4,71
15	42,04	2,80	49,20	3,28	59,36	3,96	67,68	4,51
16	43,11	2,69	50,46	3,15	60,87	3,80	69,41	4,34
17	44,15	2,60	51,66	3,04	62,33	3,67	71,07	4,18
18	45,14	2,51	52,83	2,93	63,73	3,54	72,67	4,04
19	46,10	2,43	53,95	2,84	65,09	3,43	74,22	3,91
20	47,03	2,35	55,04	2,75	66,41	3,32	75,72	3,79
21	47,94	2,28	56,10	2,67	67,68	3,22	77,17	3,67
22	48,82	2,22	57,13	2,60	68,92	3,13	78,59	3,57
23	49,67	2,16	58,13	2,53	70,13	3,05	79,96	3,48
24	50,50	2,10	59,10	2,46	71,30	2,97	81,30	3,39

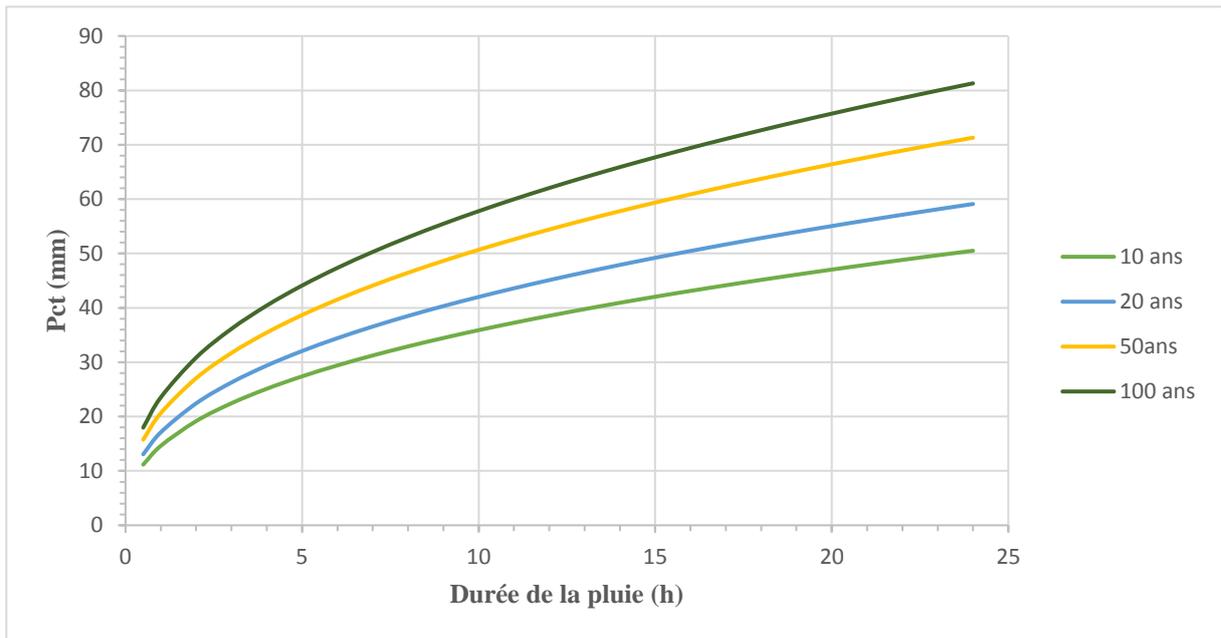


Figure n° III.7 : Courbes pluies-durées-fréquences (PDF).

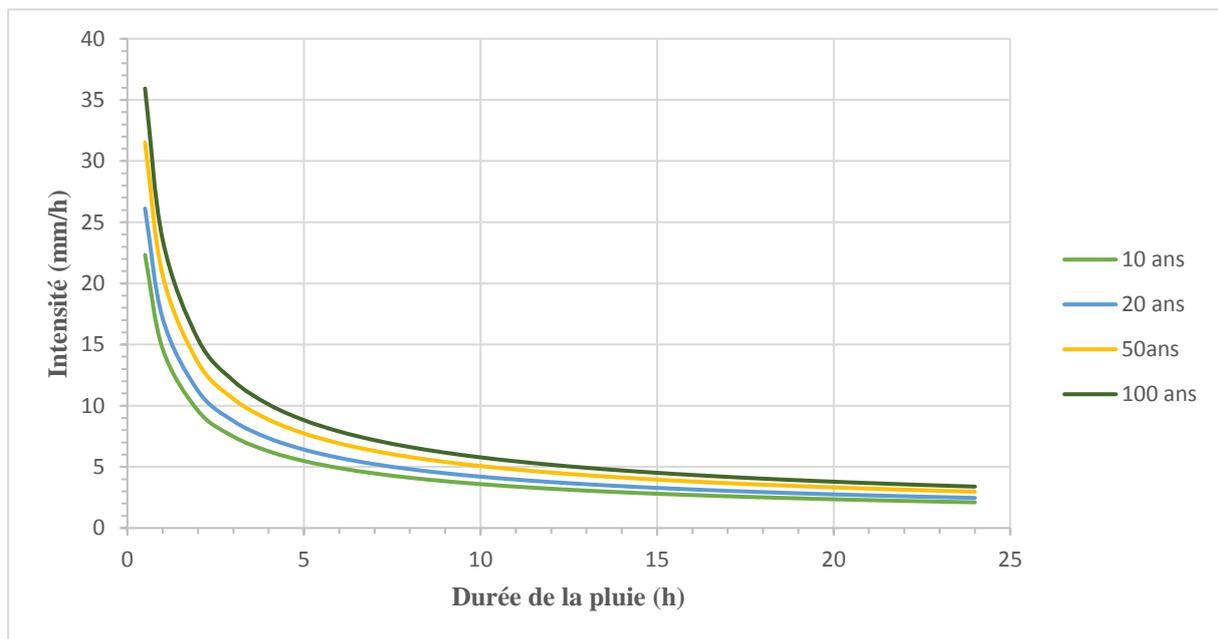


Figure n° III.8 : Courbes intensités-durées-fréquences (IDF).

III.3 Etude des crues :

Les techniques utilisées pour l'estimation des débits de crues de différents temps de retour dépendent pour une grande part des données disponibles (morphologiques, pluviométriques, occupation du sol, etc.). Dans notre travail, on a opté de travailler avec deux approches différentes et de choisir celle qui conviendra le mieux à notre contexte.

Les méthodes utilisées sont les suivantes :

- ◆ Le modèle de MEDDI et TOUMI.
- ◆ Les formules empiriques (Sokolovsky, Giandotti, etc.).

III.3.1 Le modèle de MEDDI et TOUMI :

Le Professeur Mohamed MEDDI et le Dr. Samir TOUMI ont remédiés au problème de l'absence de mesures de débit maximum dans les bassins non jaugés et l'insuffisance des longueurs des séries de débits mesurés pour des bassins équipés de stations hydrométriques par la mise au point d'un modèle pour l'estimation des débits extrêmes de crues pour différentes périodes de retour. Ce modèle est donné par la formule suivante :

$$Q_{\max} (F) = Q_{\max} * q (F) [m^3/s] \dots\dots\dots(III.10)$$

Avec : Q_{\max} : débit max calculé par le modèle correspondant à la région concernée en fonction de la surface du bassin versant (S) en km² et la pente du cours d'eau principal (I_c) sans unité.
 $q (F)$: fonction quantile correspondante.

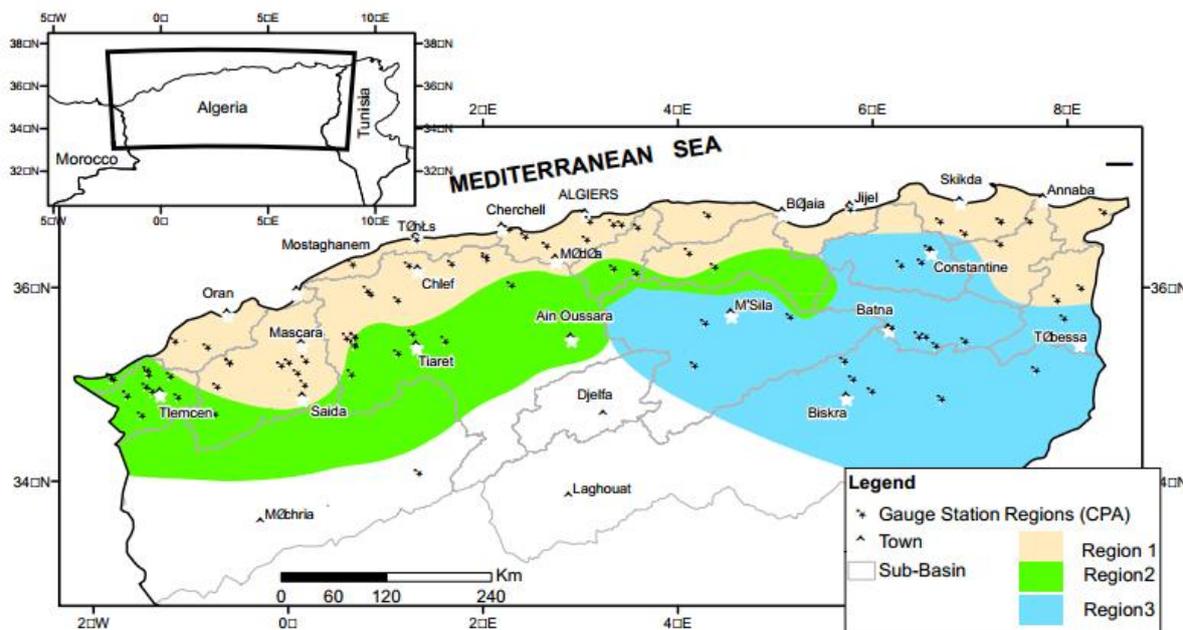


Figure n° III.9 : Carte de la situation géographique des bassins versants.

Les équations de l'estimation du débit sont données dans le tableau ci-après :

Tableau n° III. 12 : Equations du modèle pour l'estimation du Q_{max} (MEDDI et TOUMI, 2017).

Région	Equations
Tous les régions	$Q_{max} = 4.99 * S^{0.64} * I_c^{0.16}$
Région I	$Q_{max} = 3.52 * S^{0.96} * I_c^{0.54}$
Région II	$Q_{max} = 2.73 * S^{0.35} * I_c^{0.44}$
Région III	$Q_{max} = 1.26 * S^{0.16} * I_c^{-1.04}$

Les valeurs de la fonction quantile sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° III. 13 : Fonction quantile q(F).

Période de retour	2	5	10	20	50	100
Région I	0.74	1.54	2.14	2.74	3.53	4.13
Région II	0.59	1.47	2.27	3.22	4.74	6.14
Région III	0.71	1.62	2.29	2.94	3.77	4.37

Les résultats de calcul des débits de pointe sont résumés dans le tableau suivante :

Tableau n° III. 14 : Débit maximale de crue pour différentes périodes de retour (modèle MEDDI et TOUMI).

Période de retour	2	5	10	20	50	100
q (F)	0.74	1.54	2.14	2.74	3.53	4.13
Q_{max} (F) (m^3/s)	44,47	92,54	128,59	164,65	212,12	248,17

III.3.2. Les formules empiriques :

III.3.2.1 La formule de Sokolovsky :

Cette méthode a un usage très courant dans les services d'hydrologie de états indépendantes de l'ex URSS ainsi qu'en Algérie. Le débit maximum probable est donné par la formule suivante :

$$Q_{max,p\%} = 0.28 \frac{(P_{ct,p\%} - H_o) * \alpha_{p\%} * S * f}{t_m = t_c} [m^3/s] \dots\dots\dots(III.11)$$

- Avec :
- S : surface du bassin versant (km).
 - t_c : temps de concentration du bassin versant (h).
 - $P_{ct,p\%}$: précipitation en mm de probabilité p% correspondant à un temps t_c .
 - H_o : pertes initiales en mm, au Nord de l'Algerie $H_o = 7mm$.
 - $\alpha_{p\%}$: coefficient de ruissellement pour la crue probable.

$$\alpha_{p\%} = \frac{\sqrt{P_{ct,p\%}} - \sqrt{H_o}}{\sqrt{P_{ct,p\%}} + \sqrt{H_o}} \dots\dots\dots(III.12)$$

f : coefficient de forme de la crue. Il peut être calculé par la formule :

$$f = \frac{12}{4 + 3\gamma} \dots\dots\dots(\text{III.13})$$

- ◆ Pour $S \leq 50 \text{ km}^2$, on a : $\gamma = 2$.
- ◆ Pour des bassins versants non boisés, sol peu perméable, on a : $\gamma = 2 : 2,5$.
- ◆ Pour des bassins versant boisé, sol peu perméable, on a : $\gamma = 3 : 4$.

Dans notre cas, pour lesquels on appliquera la formule précédente en prenant :

- ◆ Le coefficient $\gamma = 2$ (bassins versants non boisés et sol peu perméable).
- ◆ Le temps de concentration calculé par la formule de Kirpich.
- ◆ Les pluies de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans.

Tableau n° III. 15 : Débit maximale de crue pour différentes périodes de retour (formule de sokolovsky).

Période de retour	2	5	10	20	50	100
$P_{tc, p\%}$ (mm)	15,91	21,66	25,92	30,33	36,60	41,73
$\alpha_{p\%}$	0,20	0,28	0,32	0,35	0,39	0,42
Q_{max} (m ³ /s)	23,6	52,7	78,1	107,0	151,4	190,1

III.3.2.2 La formule de Giandotti :

La méthode de Giandotti s’inspire des lois de ruissellement basées sur les caractéristiques morphométriques du bassin versant ainsi que le temp de concentration :

$$Q_{max, p\%} = \frac{C * S * P_{tc, p\%} \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}{4\sqrt{S} + 1,5L_{cp}} [m^3/s] \dots\dots\dots(\text{III.14})$$

- Avec :
- S : surface du bassin versant (km²).
 - L_{cp} : longueur du cours d’eau principale (km).
 - H_{moy} : altitude moyenne (m).
 - H_{min} : altitude minimale (m).
 - $P_{tc, p\%}$: lame d’eau précipitée pour une probabilité donnée et d’une durée égale au temps de concentration des eaux (mm)
 - C : coefficient topographique variant entre 0.066 et 0.166 (on prend $c = 0.166$).

Tableau n° III. 16 : Débit maximale de crue pour différentes périodes de retour (formule de Giandotti).

Période de retour	2	5	10	20	50	100
$P_{tc, p\%}$ (mm)	15,91	21,66	25,92	30,33	36,60	41,73
Q_{max} (m ³ /s)	72,7	99,0	118,4	138,6	167,2	190,7

III.3.2.3 La formule de Possenti :

Cette méthode est donnée par la relation suivante :

$$Q_{\max, p\%} = \frac{\mu * P_{\max j, p\%} * S}{L_{cp}} [m^3/s] \dots\dots\dots(III.15)$$

- Avec : $P_{\max j, p\%}$: pluie maximale journalière correspondante à la période de retour donnée (m)
 μ : coefficient compris entre 700 – 800 (on prend $\mu = 750$).
 L_{cp} : longueur du cours d'eau principal (km).

Tableau n° III. 17 : Débit maximale de crue pour différentes périodes de retour (formule de Possenti).

Période de retour	2	5	10	20	50	100
$P_{\max j, p\%}$ (mm)	31	42,2	50,5	59,1	71,30	81,3
Q_{\max} (m ³ /s)	118,8	161,8	193,6	226,6	273,3	311,7

Le tableau suivant nous donne tous les résultats de calcul de toutes les méthodes de calcul :

Tableau n° III. 18 : Débits fréquentiels calculés par les différentes méthodes.

Période de retour T (ans)	Q_{\max} (m ³ /s).			
	MEDDI et TOUMI	Sokolovsky	Giandotti	Possenti
2	44,5	23,6	72,7	118,8
5	92,5	52,7	99	161,8
10	128,6	78,1	118,4	193,6
20	164,7	107,0	138,6	226,6
50	212,1	151,4	167,2	273,3
100	248,2	190,1	190,7	311,7

Interprétation : d’après le tableau précédent on constate que :

- ◆ Les résultats obtenus par la méthode de Possenti sont plus grands par rapport aux valeurs données par les autres méthodes et que cette formule surestime les débits donc les quantiles de cette formule sont rejetés.
- ◆ Du moment que l’objectif de cette étude est la protection contre les inondations. Autrement dit, une protection des biens publics et privés et les équipements et pour des raisons de sécurité des ouvrages à projeter, nous optons pour les plus grandes valeurs que peut atteindre le débit de crue. Ainsi que le modèle de MEDDI et TOUMI a été développé en Algérie donc nous adoptons les résultats obtenus par ce modèle.

III.3.3. Hydrogramme de crue :

La méthode de Sokolovsky consiste à considérer que l’hydrogramme est assimilé à deux équations paraboliques, l’une pour la montée, l’autre pour la décrue :

◆ Pour la montée :
$$Q_m = Q_{\max} \left(\frac{t}{t_m} \right)^n \left[m^3/s \right] \dots\dots\dots(III.16)$$

◆ Pour la décrue :
$$Q_d = Q_{\max} \left(\frac{t_d - t}{t_d} \right)^m \left[m^3/s \right] \dots\dots\dots(III.17)$$

Avec : t_m : le temps de concentration ou bien le temps de la montée ($t_m = t_c$).
 t_d : le temps de décrue $t_d = \gamma * t_m$, où γ c’est un coefficient estimé à partir de certaines caractéristiques physiques du cours d’eau et de son bassin versant.
 On prend une valeur égale à 2, donc la durée de crue sera : $t_b = t_m + t_d = 3t_m$.
 m, n : puissances des équations $m = 2$ pour la montée, $n = 3$ pour la décrue.

Les résultats du calcul des débits de la crue pour les différentes périodes de retour sont représentés dans le tableau suivant ainsi que l’hydrogramme correspondant.

Tableau n° III. 19 : Débit de crue et les décrue pour différentes périodes de retour.

Débits de crue pour différentes périodes de retour.						
T (h)	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,59	1,23	1,71	2,19	2,82	3,29
1,00	2,36	4,91	6,83	8,74	11,26	13,18
1,50	5,32	11,05	15,36	19,67	25,34	29,65
2,00	9,45	19,64	27,31	34,98	45,04	52,70
2,50	14,77	30,69	42,67	54,65	70,38	82,35
3,50	28,94	60,16	83,64	107,11	137,94	161,40
4,00	37,80	78,57	109,24	139,91	180,17	210,81
4,34	44,50	92,50	128,60	164,70	212,10	248,17
5,00	35,10	72,96	101,44	129,91	167,32	195,76
5,50	28,94	60,15	83,62	107,10	137,94	161,38
6,00	23,54	48,93	68,03	87,13	112,21	131,28
6,50	18,86	39,20	54,50	69,80	89,90	105,18
7,00	14,85	30,86	42,90	54,94	70,76	82,79
8,00	8,61	17,89	24,88	31,86	41,03	48,01
9,00	4,42	9,19	12,77	16,36	21,07	24,65
10,00	1,87	3,90	5,42	6,94	8,93	10,45
11,00	0,56	1,17	1,62	2,08	2,67	3,13
12,00	0,07	0,15	0,21	0,27	0,34	0,40
13,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

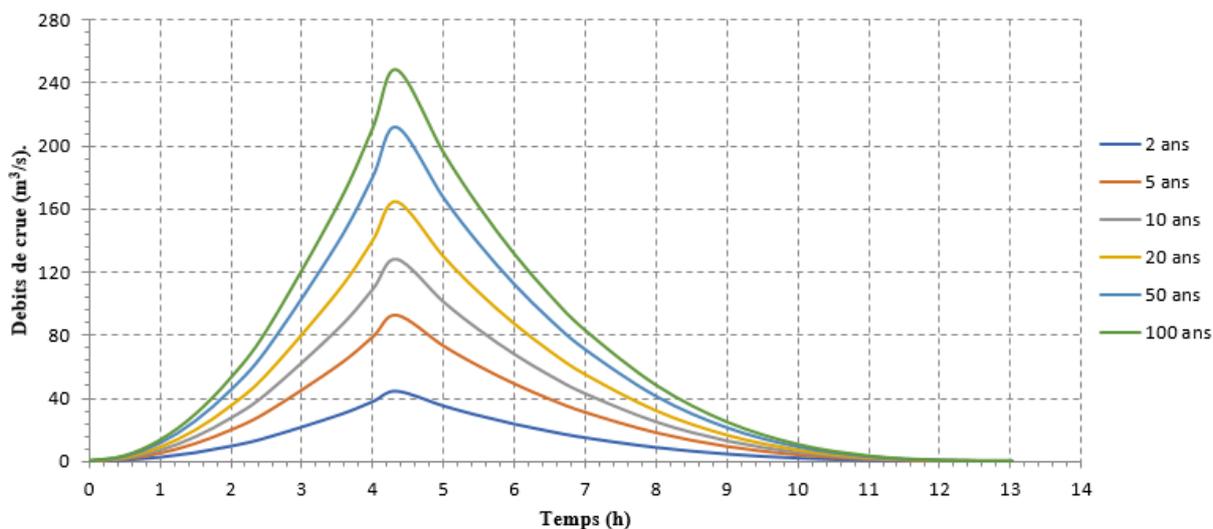


Figure n° III.10 : Hydrogrammes de crues du bassin versant d'Oued Yellel.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a déterminé le modèle fréquentiel le plus adéquat pour notre série pluviométrique présenté par la loi GEV. Ensuite, nous avons estimé les débits des crues par différentes méthodes afin de choisir un résultat représentatif qui est le modèle de MEDDI et TOUMI.

A la fin, on a établi les hydrogrammes des crues pour voir l'évolution des crues dans le temps. Cette évaluation permis de fixer les valeurs des crues qui traversent la zone d'étude qui nous permettront de faire le dimensionnement et le calcul hydraulique des ouvrages de protection contre les risques des inondations pour la ville de Yellel.

Chapitre IV :

Diagnostic et modélisation du cours d'eau non aménagé

Introduction :

Dans ce chapitre, on décrit l'état générale d'Oued Yellel afin de modéliser un écoulement réel à surface libre du cours d'eau. Notre objectif est d'avoir le comportement des lames d'eaux correspondantes aux différents débits issus de l'étude hydrologique pour être utilisées dans la détermination des zones inondables et par la suite, pour mettre en place un programme d'aménagement du cours d'eau répondant aux exigences bien définies.

IV.1 Etat d'Oued Yellel :

Nous intéressons à la partie avale de l'Oued. En effet, cette zone est bordée de constructions exposées à un risque d'inondation. Dans cette partie de l'étude, il existe des ouvrages d'infrastructures routières et ferroviaires, il s'agit de l'aval vers l'amont suivant le point kilométrique :

- ◆ Pont de RN 04 (PK 66).
- ◆ Deux ponts existants au centre de la ville (PK 961 et PK 1450).
- ◆ Pont existant au niveau de chemin de fer (PK 1597).

Ces ouvrages peuvent avoir des conséquences, notamment occasionner des pertes de charge locales et inciter des embâcles (accumulations de bois flottants) d'une côté. De l'autre côté, ils peuvent être eux-mêmes mis en danger par la dynamique de l'Oued, de façon spéciale les phénomènes d'érosion éventuels (érosion du fond, érosion des berges).



Figure n° IV.1 : Pont existant au niveau de la route national
RN 04 PK 66 (DRE Relizane, 2012).



Figure n° IV.2 : Pont existant au centre de la ville PK 961
(DRE Relizane, 2012).



Figure n° IV.3 : Pont existant au centre de la ville PK 1450
(DRE Relizane, 2012).



Figure n° IV.4 : Pont existant au niveau de chemin de fer PK 1596 (DRE Relizane, 2012).

Après l'observation de terrain et l'état d'Oued nous constatons que les problèmes du phénomène des inondations de la zone d'étude sont résumés ci-dessous :

- ◆ La transgression du domaine public hydraulique, au niveau de plusieurs tronçons du cours d'eau et la construction anarchique sur les deux rives.
- ◆ L'absence des opérations de curage et de nettoyage du cours d'eau.
- ◆ Les décharges publiques au niveau du lit d'oued faisant obstacle à l'écoulement.

IV.2 Modélisation de l'écoulement :

IV.2.1 Présentation du logiciel HEC-RAS :

HEC-RAS est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre et d'évaluer les débits et hauteurs d'eau sur l'ensemble des sections d'une rivière. Il a été conçu par l'Hydrologic Engineering Center du U.S Army Corps of Engineers. Ce logiciel englobe plusieurs aspects hydrologiques et hydrauliques : analyse du ruissellement des précipitations, hydraulique fluviale, analyse des dommages d'inondation, simulation des écoulements permanents et non permanents, le transport de sédiments, analyse de la qualité d'eau et certaines fonctions facilitant la conception d'ouvrages hydrauliques.

Ce logiciel utilise des équations d'hydraulique à surface libre (Saint-Venant 1D, Manning-Strickler...) pour le calcul des différents paramètres hydrauliques qui nous permettent d'analyser de la capacité de cours d'eaux (risques de débordement, inondations).

IV.2.2 Etapes de simulation par HEC-RAS :

La simulation de l'écoulement d'eau par HEC-RAS passe par les étapes suivantes :

- ◆ Création du projet HEC-RAS.
- ◆ Préparation des données géométriques de l'Oued.
- ◆ Choix des paramètres hydrométriques et conditions aux limites.
- ◆ Simulation hydraulique.

IV.2.2.1 Création d'un nouveau projet :

Cette étape consiste à choisir un nom et un titre de projet ainsi que l'emplacement des fichiers.

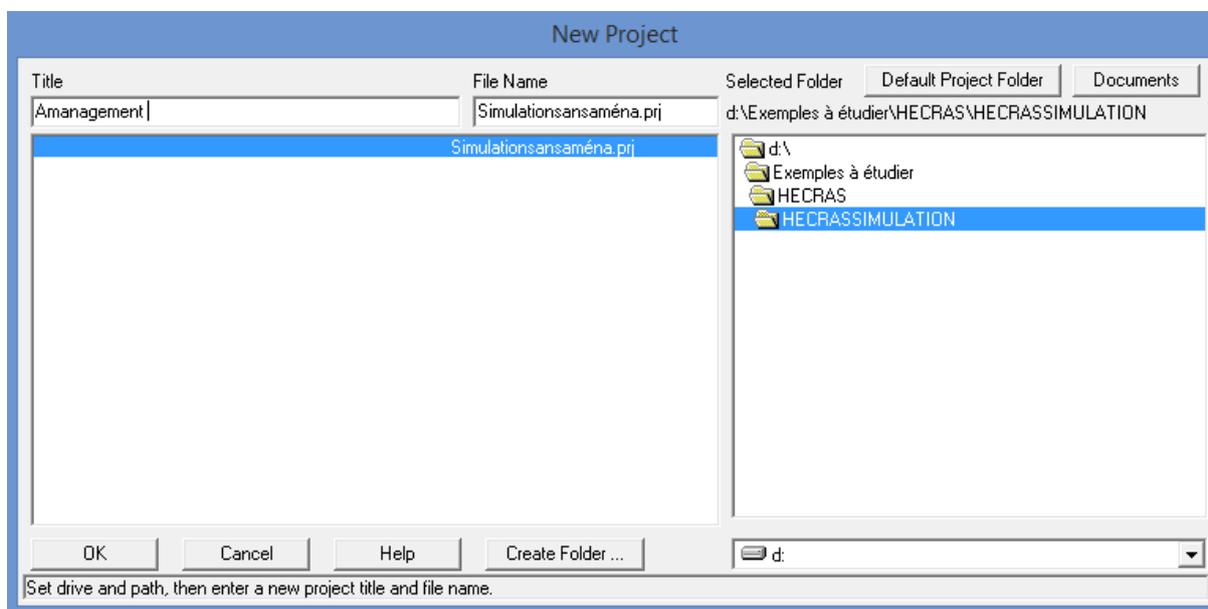


Figure n° IV.5 : Création de nouveau projet HEC-RAS.

IV.2.2.2 Données géométriques :

Dans cette étape on va définir les données géométriques du l'oued tel que : les sections transversales et les données d'ouvrages hydrauliques et d'arts existants (ponts, structures latérales, déversoirs, etc.) à partir d'un levé topographique du cours d'eau a aménagé sur une longueur d'environ 4 km.

Pour la génération des profils en travers représentatifs de la géométrie d'Oued Yellel, nous avons utilisé le logiciel AutoCad Civil 3D (version 2017) afin de les charger ces profils sur le logiciel HEC-RAS version 4.1.0.

Le travail consiste à définir l'axe de l'Oued et les berges gauche et droite. Ensuite nous avons procédé à une tabulation automatique, dont nous avons fixé les distances suivantes :

- ◆ L'équidistance entre deux sections transversales est de 25 m.
- ◆ La largeur d'une section transversale est fixée à 70 m.

Dans cette démarche, le profil en travers est l'élément géométrique primordial. Il doit respecter certaines règles pour qu'il soit représentatif :

- ◆ Les profils doivent être perpendiculaires à la direction de l'écoulement des eaux.
- ◆ Ils ne doivent pas se croiser, recouper toute la plaine d'inondation et décrire le profil en long du cours d'eau (cela n'est pas toujours facile à réaliser dans le cas d'un cours méandrique avec une large plaine d'inondation).
- ◆ Ils doivent encadrer les ouvrages structurants du cours d'eau (ponts, seuils...).

Selon l'ANRH, la rugosité est variée entre 0,022 et 0,025, donc pour notre cas on opte pour une valeur de 0,025.

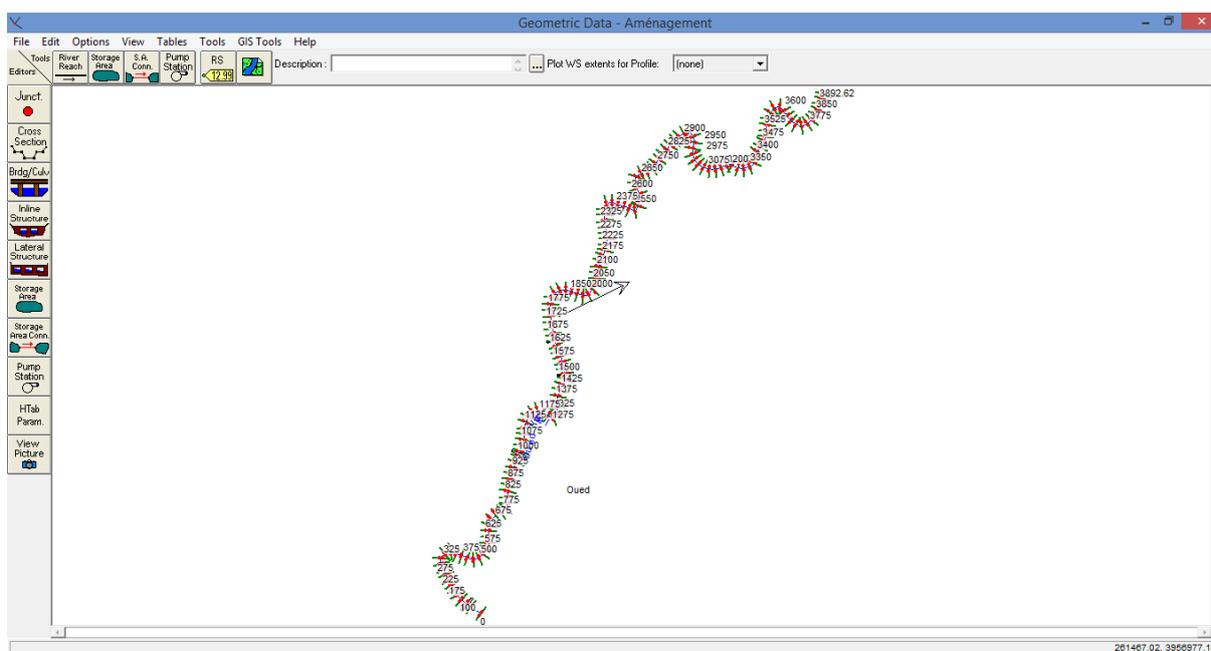


Figure n° IV.6 : Les profils en travers d'Oued Yellel.

IV.2.2.3 Données hydrométriques et conditions aux limites :

Après avoir saisi les données géométriques de chaque section, l'étape suivante de la modélisation hydraulique par HEC-RAS est de spécifier les débits d'entrée et toutes les conditions aux limites nécessaires pour pouvoir exécuter le calcul des profils de la surface de l'eau en chaque section du l'Oued.

Pour les données de débit, on utilise directement les résultats obtenus à partir du modèle de MEDDI et TOUMI pour la période de retour de 100 ans.

Dans notre cas, nous allons choisir la hauteur critique comme une condition aux limites, puisque on ne dispose pas d'information comme la courbe de débit-hauteur, ou bien des mesures complètes qui pourraient nous permettre d'utiliser les autres alternatives (la hauteur normale et la hauteur d'eau connue).

IV.2.2.4 Simulation :

Les calculs peuvent être effectués pour plusieurs débits simultanément, soit en régime torrentiel, soit en régime fluvial, ou pour les deux régimes d'écoulements. Dans ce dernier cas, HEC-RAS utilise l'équation de quantité de mouvement pour déterminer les changements de régime torrentiel fluvial, caractérisés par un ressaut.

Une fois tous les données (géométriques et hydrométriques) et les conditions de notre Oued sont introduit, nous avons lancé la simulation en supposant un régime d'écoulement mixte.

IV.2.2.5 Résultat de la simulation :

Les résultats numériques des paramètres hydrauliques pour la fréquence centennale sont donnés dans le tableau en annexe.

Un plan du cours d'eau en trois dimensions du modèle géométrique ainsi que le profil en long du tronçon simulé sont montrés respectivement sur les figures (IV.7 et IV.8) pour l'évènement hydrométéorologique considéré.

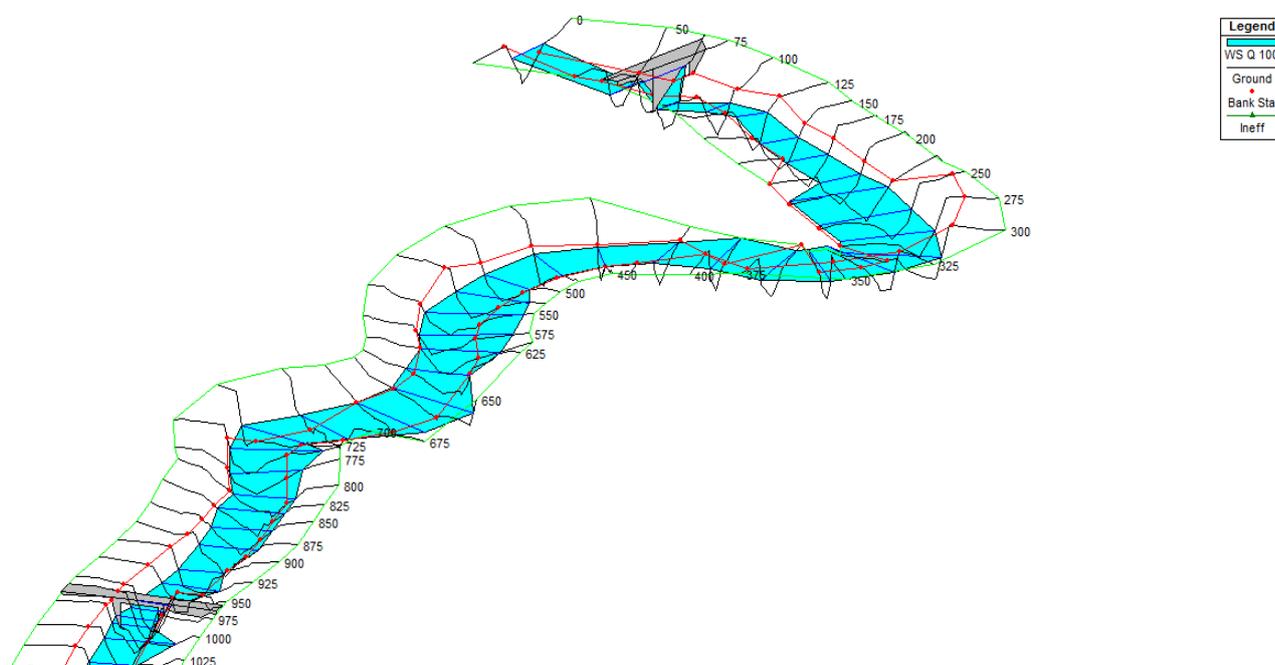


Figure n° IV.7 : Vue en Plan en 3D du tronçon d'Oued Yellel avec les ouvrages d'arts, après la simulation.

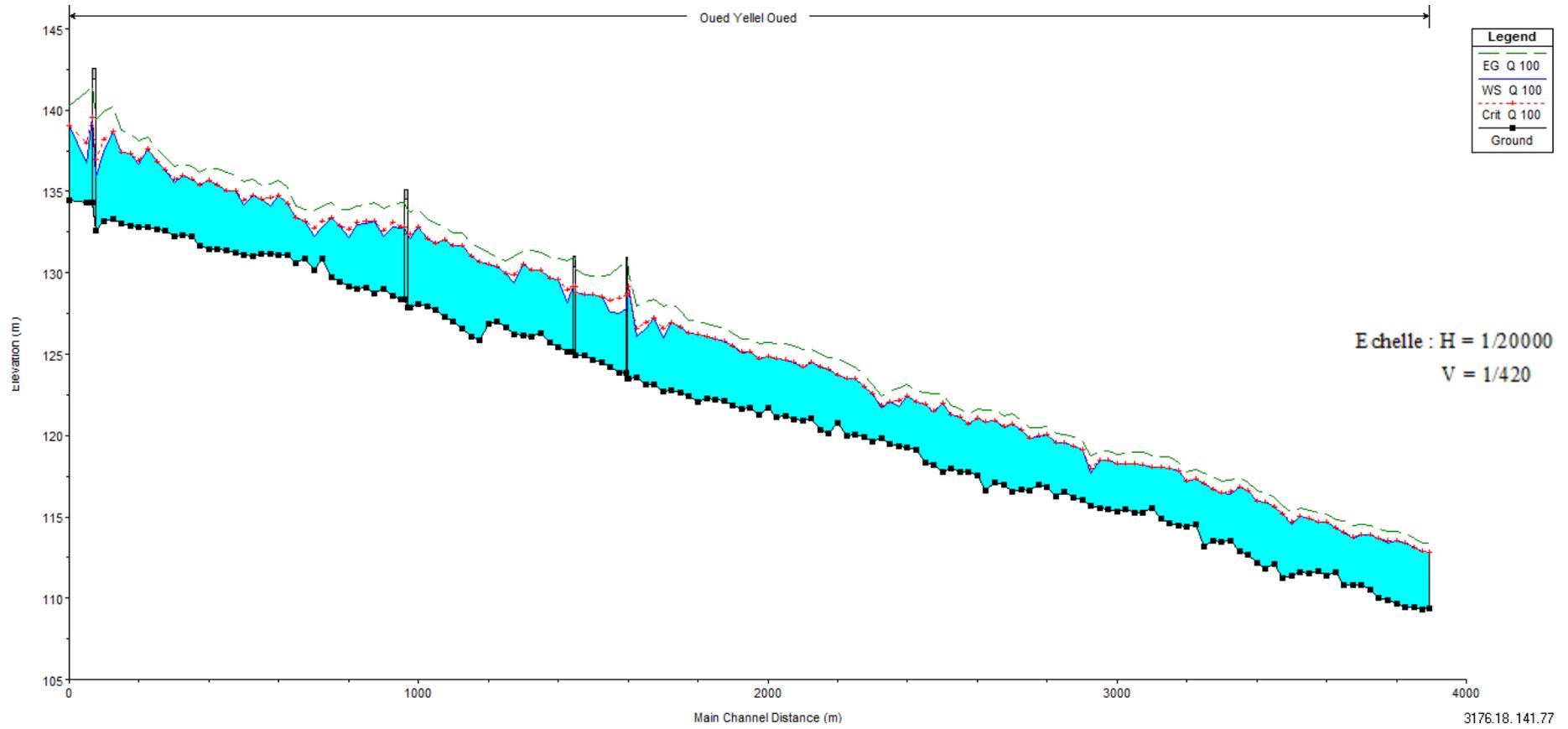


Figure n° IV.8 : Profil en long du tronçon simulé d'Oued Yellel avec la ligne de surface de l'eau

Les figures des ouvrages et les sections inondées après la simulation par HEC-RAS sont présentées dans les figures ci-dessous :

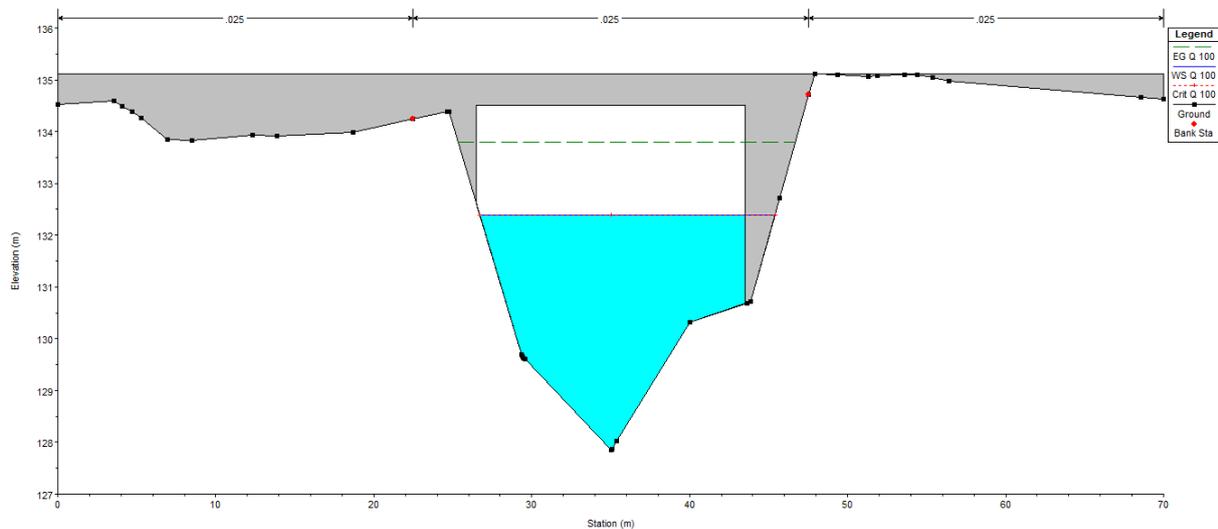


Figure n° IV.9 : Section en travers d'Oued Yellel au niveau du pont de RN 04 (PK 66).

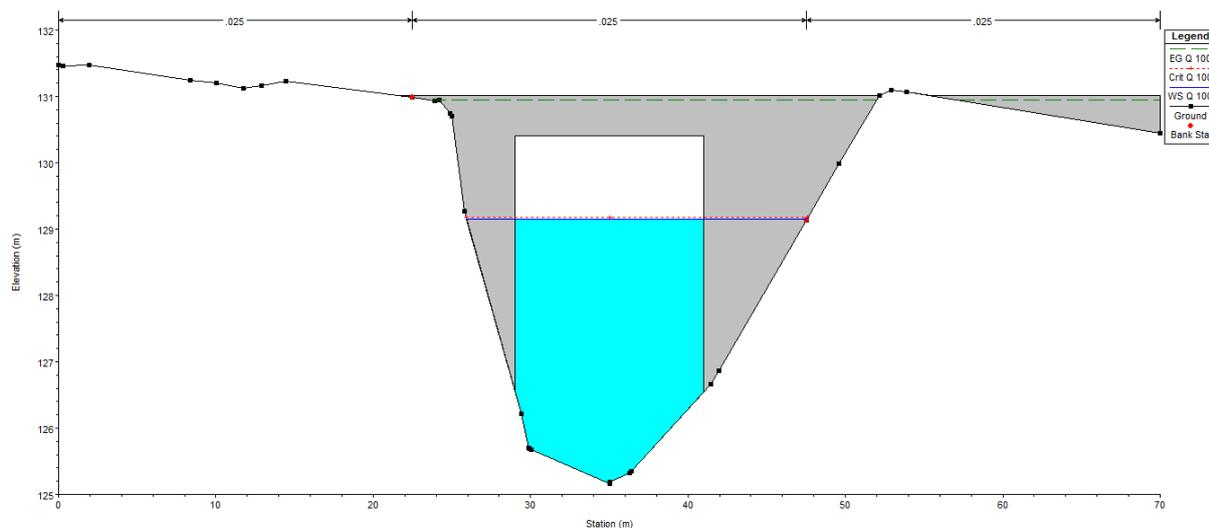


Figure n° IV.10 : Section en travers d'Oued Yellel d'un pont existant au centre de la ville (PK 1450).

Interprétation : dans les figures (IV.9 et IV.10) correspondantes à la section en travers d'Oued Yellel au niveau du pont de RN 04 (PK 66) et le pont existant au centre de la ville (PK 1450), on remarque qu'il n'y a pas de dépassement de la ligne d'eau, donc aucun débordement pour une crue centennale. Cela est justifié par le bon dimensionnement des ouvrages.

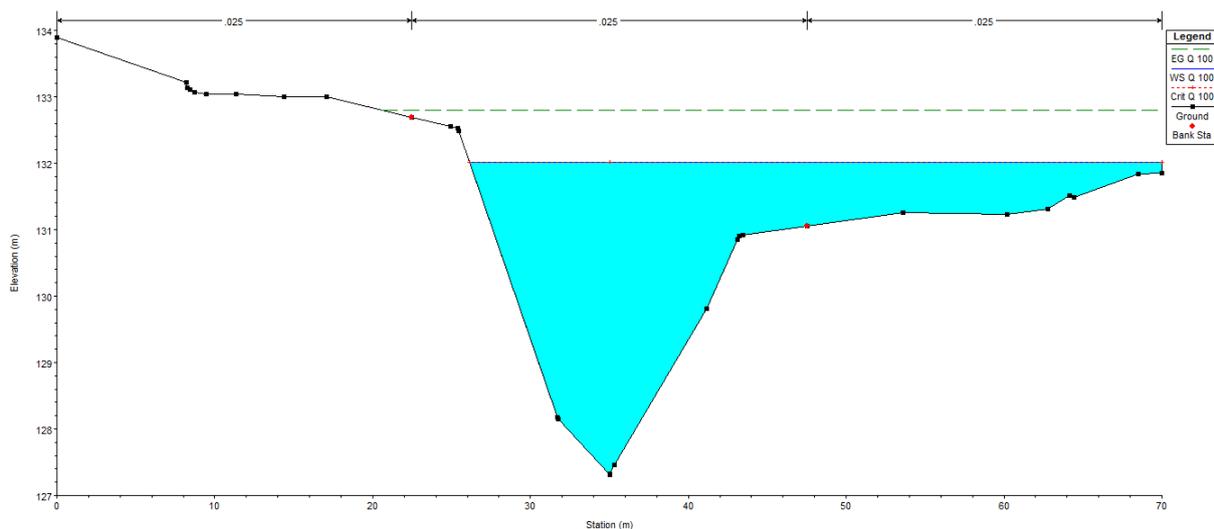


Figure n° IV.11 : Section en travers d'Oued Yellel (PK 1075) avec les positions de la ligne de surface de l'eau.

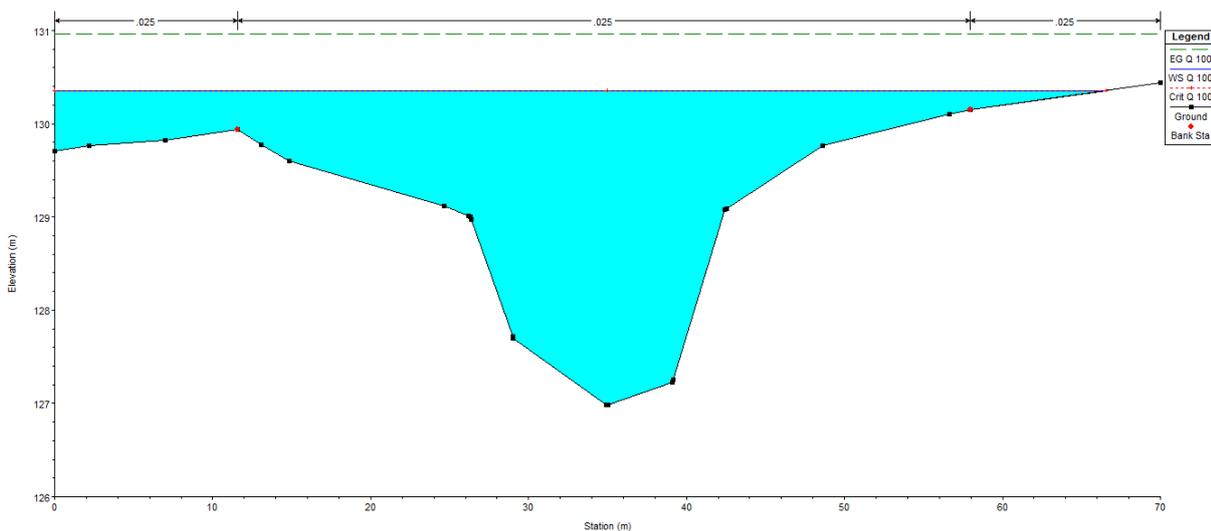


Figure n° IV.12 : Section en travers d'Oued Yellel (PK 1225) avec les positions de la ligne de surface de l'eau.

Interprétation :

- ◆ La vitesse d'écoulement moyenne dans l'Oued est de 4,3 m/s et atteint dans certaines sections des valeurs de 5 et 6 m/s.
- ◆ La hauteur d'eau moyenne est de 3,5 m et varie entre 2,06 m et 5,6 m.
- ◆ La variation du régime d'écoulement le long de l'Oued. Cette constatation est confirmée par les valeurs du nombre de Froude qui varient entre 0,77 et 1,5.

IV.3 Les zones inondables :

La simulation de l'état naturel du cours d'eau dans le cas de la crue centennale qui a été faite par le logiciel HEC-RAS s'impose dans le but de déterminer les points de débordement ou en générale la délimitation des zones inondables, afin d'envisager des solutions adéquates pour l'aménagement.

Dans cette partie nous avons basé sur les résultats de la simulation précédente avec utilisation de l'application RAS-Mapper intégré dans HEC-RAS version 4.1.0.

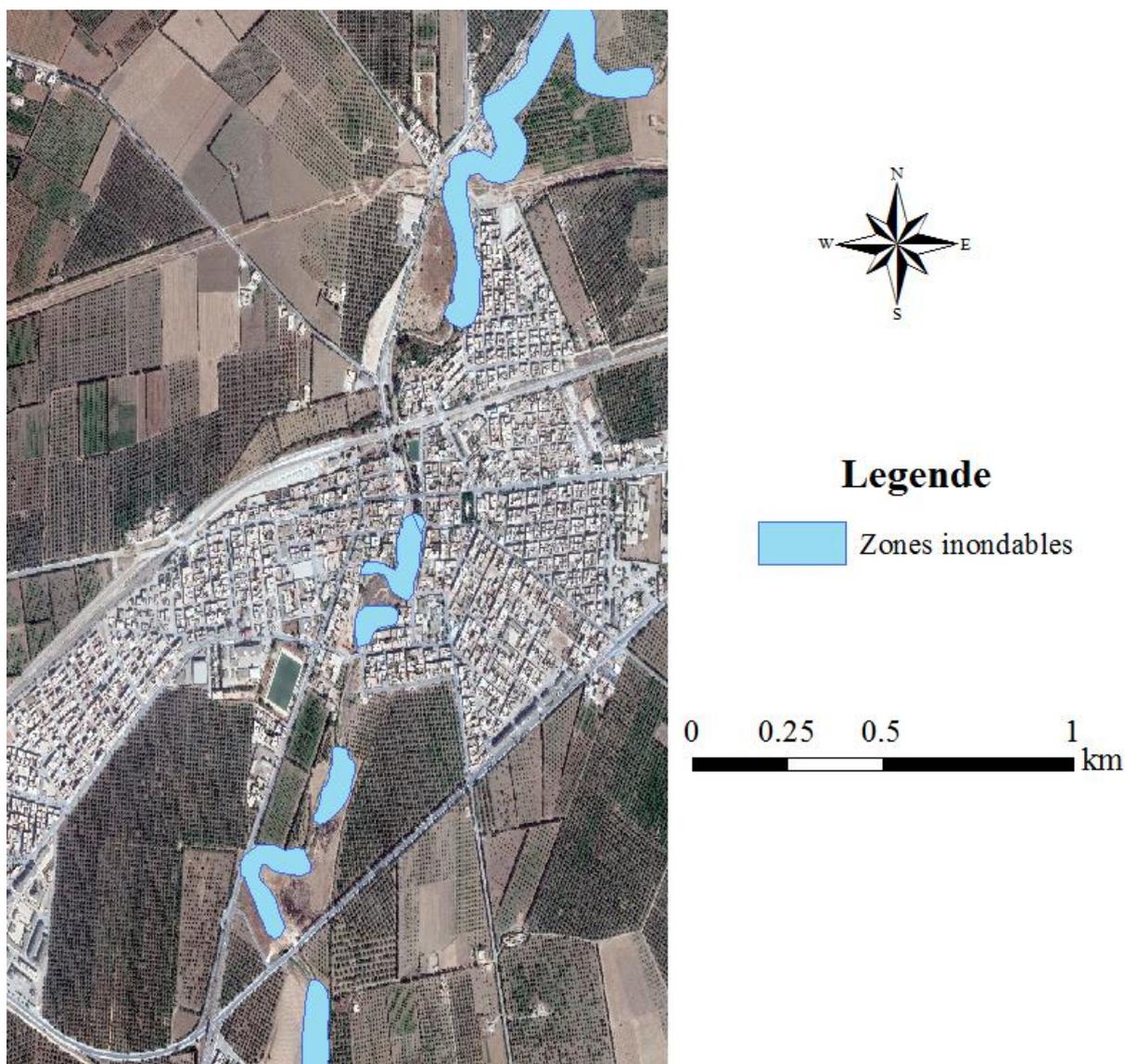


Figure n° IV.13 : Les zones inondables.

Conclusion :

La détermination des zones inondables par la modélisation hydraulique d'Oued Yellel donne une vision claire et simple pour les différentes variantes optimales et scénarios d'aménagement à être réalisés afin de protéger la vie, les biens matériels et les terres agricoles avoisinantes.

Chapitre V :

Etudes des variantes d'aménagement

Introduction :

Dans ce chapitre, différentes variantes d'aménagements seront proposées sur la base des résultats obtenus à partir des chapitres précédents et en fonction de l'analyse de notre zone d'étude afin de rétablir les dysfonctionnements observés au niveau du cours d'eau.

V.1 Principe d'aménagement :

V.1.1 Les différents types d'aménagements envisageables :

V.1.1.1 Curage :

Qui permet une nette amélioration des conditions d'écoulement suite à l'élimination de tous les obstacles et les dépôts entravant l'écoulement des eaux dans le cours d'eau pour diminuer la rugosité et accroître la débitance.

V.1.1.2 Recalibrage :

Qui permet d'élargir et d'approfondir les sections des cours d'eau pour augmenter leur capacité d'évacuation des eaux et assurer une section mouillée répondant aux critères de protections désirées.

V.1.1.3 Réalisation des canaux :

Permet de régénérer le couloir initial de l'oued. Cette solution est indispensable dans le cas où le lit de l'oued et son domaine hydraulique ont été complètement occupés par les bâtiments ou par la voirie.

V.1.1.4 Protection des berges :

Qui comprend tout ouvrage visant à maintenir la stabilité des terres en dépit de l'action de l'eau. Les berges sont en effet attaquées par des courants perturbateurs générés par les crues. De même, les terres glissent par suite de l'infiltration de l'eau après le retrait de la crue. La protection des berges est également nécessaire au voisinage de certains ouvrages tels que les ponts.

V.1.1.5 Création des canaux périphériques :

De dérivation des eaux vers les oueds permettant de les restituer vers des zones situées en dehors des aires à protéger. Cette déviation pourrait concerner une partie ou la totalité des eaux d'un oued vers un autre.

V.1.2 Les formules de dimensionnement des canaux :

La formule utilisée pour le dimensionnement est celle de Manning Strickler, elle donnée par la relation suivante :

$$Q = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} S_m I^{\frac{1}{2}} \left[\text{m}^3 / \text{s} \right] \dots\dots\dots (\text{V.1})$$

Où les différents paramètres sont :

Q : débit de dimensionnement (m³/s).

n : rugosité du canal.

S_m : section mouillée du canal en (m²).

I : pente du tronçon de cours d'eau (pente du fond) en (m/m).

R_h : rayon hydraulique en (m) tel que :

$$R_h = \frac{S_m}{P_m} \dots\dots\dots(V.2)$$

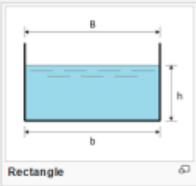
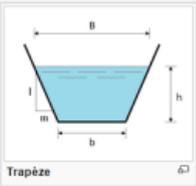
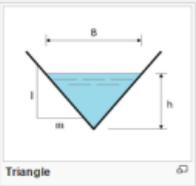
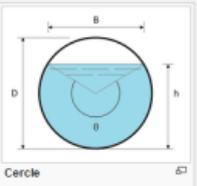
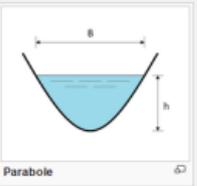
					
	Rectangle	Traپéze	Triangle	Cercle	Parabole
Largeur, B	b	$b + 2 \times mh$	$2 \times mh$	$(\sin \frac{\theta}{2}) \cdot D$ ou $2\sqrt{h \cdot (D - h)}$	$\frac{3S}{2h}$
Surface, S	$b \times h$	$(b + mh) \cdot h$	$m \times h^2$	$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta) \cdot D^2$	$\frac{2}{3}Bh$
Périmètre mouillé, P	$b + 2h$	$b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2}$	$2h \cdot \sqrt{1 + m^2}$	$\frac{1}{2}\theta \cdot D$	$B + \frac{8h^2}{3B}$
Rayon hydraulique, R _h	$\frac{bh}{b + 2h}$	$\frac{(b + mh) \cdot h}{b + 2h \cdot \sqrt{1 + m^2}}$	$\frac{mh}{2 \cdot \sqrt{1 + m^2}}$	$\frac{1}{4} \left[1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right] D$	$\frac{2B^2h}{3B^2 + 8h^2}$
Profondeur hydraulique, D _h	h	$\frac{(b + mh)h}{b + 2 \times mh}$	$\frac{1}{2}h$	$\left[\frac{\theta - \sin \theta}{\theta} \right] D$	$\frac{2}{3}h$

Figure n° V.1 : Eléments géométriques pour des sections ouvertes diverses (Wikipédia).

V.1.3 Choix des paramètres de dimensionnement :

V.1.3.1 La pente du projet :

Le choix de la pente du projet relève d'une grande importance avant de procéder au calcul hydraulique. Pour notre cas, nous avons choisis une pente uniforme de l'ordre 0.64%.

V.1.3.2 Le coefficient de rugosité :

La rugosité du canal dépendant de la nature du revêtement, les valeurs de la rugosité de certain revêtement à titre d'exemple est donnée dans le tableau suivant :

Tableau n° V.1 : Les valeurs du coefficient de rugosité (uclouvain.be).

Caractéristiques du lit ou du revêtement	Valeur de la rugosité n
<ul style="list-style-type: none"> ● Canal avec revêtement en béton. ● Canal en terre ● Canal en pierre ● Canal en Gabion. 	<p>0.014</p> <p>0.022</p> <p>0.025</p> <p>0.030</p>

V.1.4 Revanche des canaux :

Dans les canaux à surface libre, il faut toujours prévoir une revanche de sécurité au-dessus de la ligne d'eau calculée afin de tenir compte de l'accumulation de dépôt solide, de croissance de la végétation, des vagues provoquées par le vent, etc.

Pour le dimensionnement du canal, on opte une pour une revanche de 0.75 m à 1 m.

V.2 Etude des variantes :

Dans cette étude, les variantes proposées pour l'aménagement du cours d'eau sont :

- ◆ Recalibrage du lit naturel.
- ◆ Recalibrage du lit naturel (avec recouvrement des berges de pierres taillées et un lit nu).
- ◆ Un canal en béton armé de forme trapézoïdale.
- ◆ Un canal en gabion.
- ◆ Un canal mixte (recalibrage du lit naturel et le gabion).

Un calcul hydraulique de chaque variante sera fait en vérifiant l'état d'écoulement par une simulation avec HEC-RAS pour chaque tronçon du cours d'eau, et une description des variantes d'aménagement proposés pour pouvoir choisir la variante la plus adaptés d'un point de vue technico-économique.

V.2.1 Recalibrage du lit naturel :

La première variante proposée est un recalibrage du terrain naturel par une section trapézoïdale non revêtue (berges et lit). La section trapézoïdale présente le profil le plus rentable hydrauliquement, pour sa grande capacité de transit des eaux, le champ de l'écoulement est maximal.

V.2.1.1 Dimensionnement :

Pour le calcul des dimensions de ce canal, en remplaçant les formules du canal trapézoïdale du figure (V.1) dans la formule (V.1) on trouve :

$$Q = \frac{I^{\frac{1}{2}} [(b + mh)h]^{\frac{5}{3}}}{n \left[b + 2h\sqrt{1 + m^2} \right]^{\frac{2}{3}}} \left[m^3/s \right] \dots\dots\dots(V.3)$$

Les termes Q, n, I étant connus on procède à un calcul itératif en fixant b suivant la largeur moyenne du lit naturel, en choisissant un fruit de talus $m = 2$ pour que l'angle du talus θ avec l'horizontale est inferieur à l'angle du repos du matériau φ .

Les résultats de calcul pour les différents tronçons sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau n° V.2 : Dimensions de l'aménagement d'Oued Yellel (recalibrage du lit naturel).

Tronçons	Section départ	Section arrivée	Longueur (m)	Pente projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond b (m)	Hauteur du canal H (m)
1	0	1000	1000	0.64	2	10	3.8
2	1000	2000	1000	0.64	2	8	4
3	2000	3900	1000	0.64	2	12	3.6

V.2.1.2 Les paramètres d'écoulement :

Les résultats de la simulation seront représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° V.3 : Paramètres d'écoulement de la variante recalibrage du lit naturel.

Profil	Débit Q (m³/s)	Vitesse (m/s)	Froude	Tirant d'eau (m)	Section Mouillée (m²)	Périmètre mouillé (m)	Rayon hydraulique (m)	Remarque
1	248.2	5.66	1.26	2.81	43.83	22.55	1.94	régime torrentiel
2	248.2	5.75	1.26	3.06	43.13	21.67	1.99	régime torrentiel
3	248.2	5.56	1.25	2.60	44.64	23.61	1.89	régime torrentiel

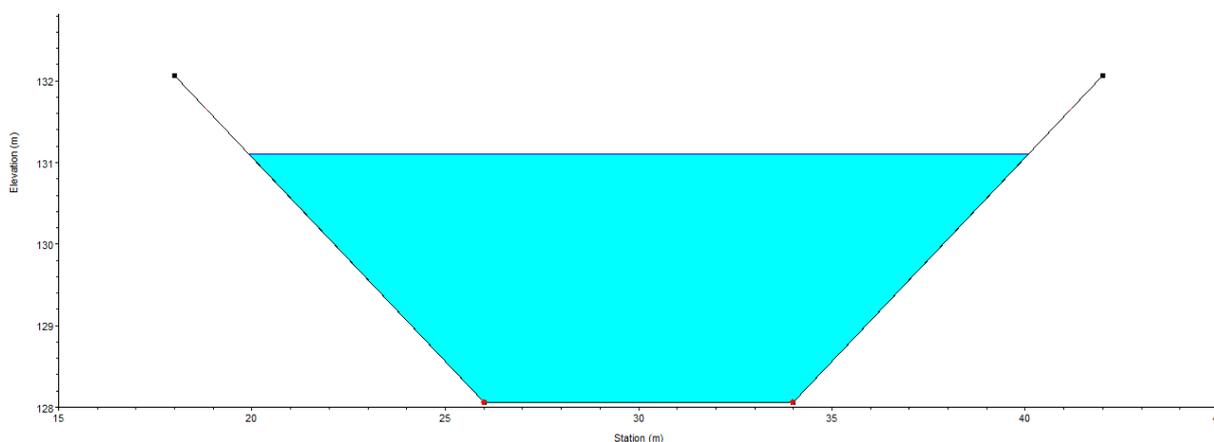


Figure n° V.2 : Profil en travers d'Oued Yellel aménagé avec un recalibrage du lit naturel.

Interprétation : on remarque que la largeur en miroir du 2ème tronçon du canal projeté est de 24 m. Or, la largeur maximale est de 22 m à cause de l'existence d'habitation au niveau de la rive gauche et droite de l'oued donc on va éliminé la possibilité d'envisager un aménagement de ce genre au niveau de la zone urbaine.

V.2.2 Recalibrage du lit naturel avec recouvrement des berges :

Un recalibrage du terrain naturel par une section trapézoïdale avec recouvrement des berges par pierres taillées avec jointures en mortier et un lit nu c'est la deuxième variante proposée. Pour le fruit de talus, nous prenons $m = 1$ pour des raisons pratiques (facilité de réalisation sur terrain) d'autant plus que ça se rapproche de la valeur optimale.

V.2.2.1 Dimensionnement :

Les dimensions de l'aménagement sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau n° V.4 : Dimensions de l'aménagement d'Oued Yellel (recalibrage du lit naturel avec recouvrement des berges).

Tronçons	Section départ	Section arrivée	Longueur (m)	Pente projet (%)	Fruit de talus m	Largeur fond b (m)	Hauteur du canal H (m)
1	0	1000	1000	0.64	1	10	4.2
2	1000	2000	1000	0.64	1	8	4.5
3	2000	3900	1900	0.64	1	12	3.8

V.2.2.2 Les paramètres d'écoulement :

Les résultats de la simulation seront représentés dans le tableau suivant :

Tableau n° V.5 : Paramètres d'écoulement de la variante recalibrage du lit naturel avec recouvrement des berges.

Tronçons	Débit Q (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	Froude	Tirant d'eau (m)	Section Mouillée (m ²)	Périmètre mouillé (m)	Rayon hydraulique (m)	Remarque
1	248.2	5.56	1.09	3.34	44.61	19.46	2.29	régime torrentiel
2	248.2	5.67	1.08	3.73	43.77	18.55	2.36	régime torrentiel
3	248.2	5.44	1.09	3.03	45.62	20.58	2.22	régime torrentiel

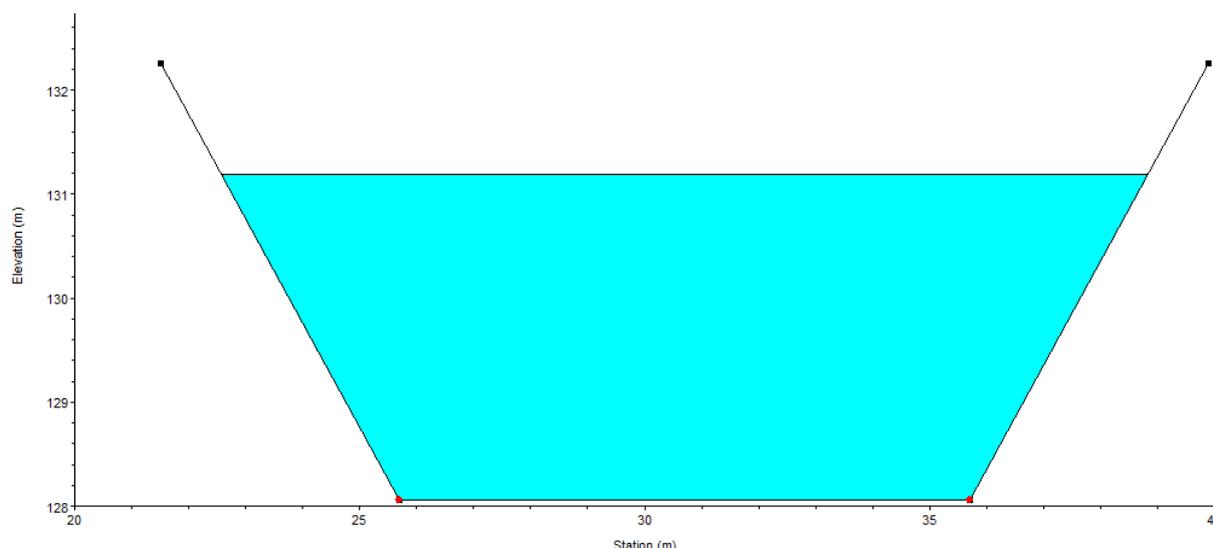


Figure n° V.3 : Profil en travers d'Oued Yellel aménagé avec un recalibrage du lit naturel et recouvrement des berges.

Interprétation : après avoir lancé la simulation on constate que la vitesse d'écoulement atteint les 5.67 m/s ce qui peut représenter un danger sur le fond de ce fait une étude de stabilité du fond est établie pour cette variante, on remarque aussi que le régime dans les trois tronçons est torrentiel.

V.2.2.3 Etude de la stabilité du canal :

Le dimensionnement d'un canal où le fond est nu et constitué par des matériaux non cohérents nécessite de garantir la stabilité, afin d'éviter les érosions provoquées par les forces hydrodynamiques engendrées par l'écoulement.

Les conditions dans lesquelles les particules du matériau non cohérent qui constituent le fond d'un canal commencent à se déplacer, appelées conditions critiques, peuvent s'exprimer en fonction des vitesses de l'écoulement (vitesses critiques), ou des tensions tangentielles exercées sur les particules (forces tractrices critiques).

Dans notre démarche, on va s'intéresser au tronçon où la vitesse est importante, dans notre cas le tronçon 2 et on va se baser sur le critère de la tension critique pour l'étude de la stabilité du fond.

Les étapes de l'étude de stabilité du fond du canal suivant cette méthode sont comme suit :

- ◆ Détermination de la contrainte tangentielle admissible à partir du diamètre moyen des grains et avec l'utilisation de l'abaque présenté dans la figure (V.4).
- ◆ Calculer la contrainte tangentielle au fond par la formule suivante :

$$\tau_o = \gamma_w Ri \left[N/m^2 \right] \dots\dots\dots(V.4)$$

- Avec :
- τ_o : la tension tangentielle critique exercée sur le fond (N/m^2).
 - R : le rayon hydraulique (m).
 - γ_w : poids volumique de l'eau (N/m^3).
 - i : la pente du fond.

♦ Vérification que la contrainte tangentielle au fond τ_o est inférieure à la contrainte admissible.

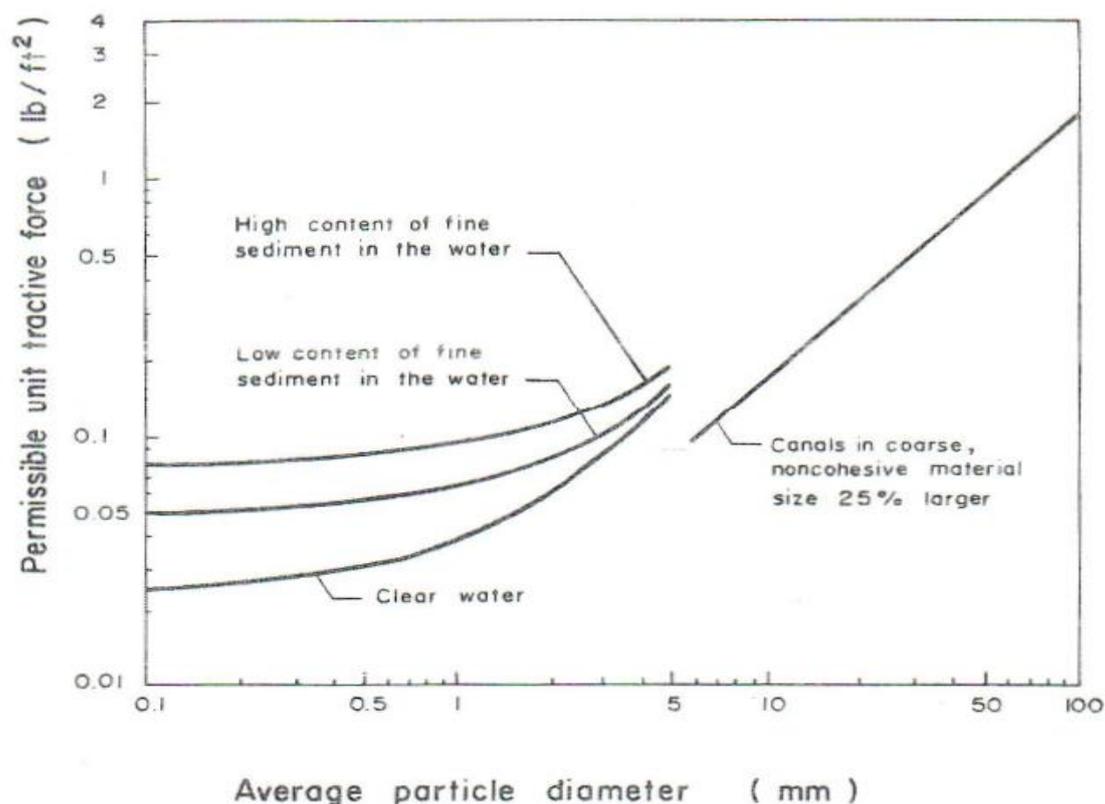


Figure n° V.4 : Efforts tangentiels critiques pour des matériaux non cohésifs (Chaudhry, 2014).

Pour notre cas, on a un sol sableux argileux avec un diamètre $d_{50\%}$ de 2 mm. Les résultats de calcul sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n° V.6 : résultats des contraintes tractrices.

Contrainte tractrice	τ_o	τ_{adm}
Valeur (N/m^2)	0.15	0.28

Interprétation : vu que la contrainte tangentielle au fond τ_o est inférieure à la contrainte admissible, la stabilité du fond est bien vérifiée et la réalisation d'un tel aménagement est possible.

V.2.2.4 Estimation du coût de la variante :

A partir des quantités des terrassements et des volumes du pierres et du béton propreté calculés par HEC-RAS (pour les pierres on prend une épaisseur de 20 cm et pour le béton de propreté on prend une épaisseur de 5 cm), l'estimation du cout de la variante est comme suit :

Tableau V.7 : Devis de la variante (recalibrage du lit naturel avec recouvrement des berges).

Désignation des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblai	m ³	42343	250	10585750
	Remblai	m ³	15448	200	3089600
Béton de propreté		m ³	5582	6000	33492000
Pierre		m ³	21744	5000	108720000
Total					155887350

V.2.3 Canal en béton armé :

La troisième variante proposée consiste à projeter un canal trapézoïdal en béton armé. Pour le fruit de talus, nous choisissons m = 1 pour la facilité technique de réalisation d'un angle de 45 ° sur le terrain.

V.2.3.1 Dimensionnement :

Les résultats de calcul sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau n° V.8 : Dimensions de l'aménagement d'Oued Yellel (canal en béton armé).

Tronçons	Section départ	Section arrivée	Longueur (m)	Pente projet (%)	Fruit de talus m	Largeur fond b (m)	Hauteur du canal H (m)
1	0	1000	1000	0.64	1	9	3.4
2	1000	2000	1000	0.64	1	7	3.7
3	2000	3900	1900	0.64	1	11	3

V.2.3.2 Les paramètres d'écoulement :

Les résultats de la simulation seront représentés dans le tableau suivant :

Tableau n° V.9 : Paramètres d'écoulement de la variante canal en béton armé.

Tronçons	Débit Q (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	Froude	Tirant d'eau (m)	Section Mouillée (m ²)	Périmètre mouillé (m)	Rayon hydraulique (m)	Remarque
1	248.2	8.48	1.88	2.54	29.26	16.17	1.81	régime torrentiel
2	248.2	8.70	1.86	2.88	28.51	15.16	1.88	régime torrentiel
3	248.2	8.23	1.89	2.27	30.14	17.42	1.73	régime torrentiel

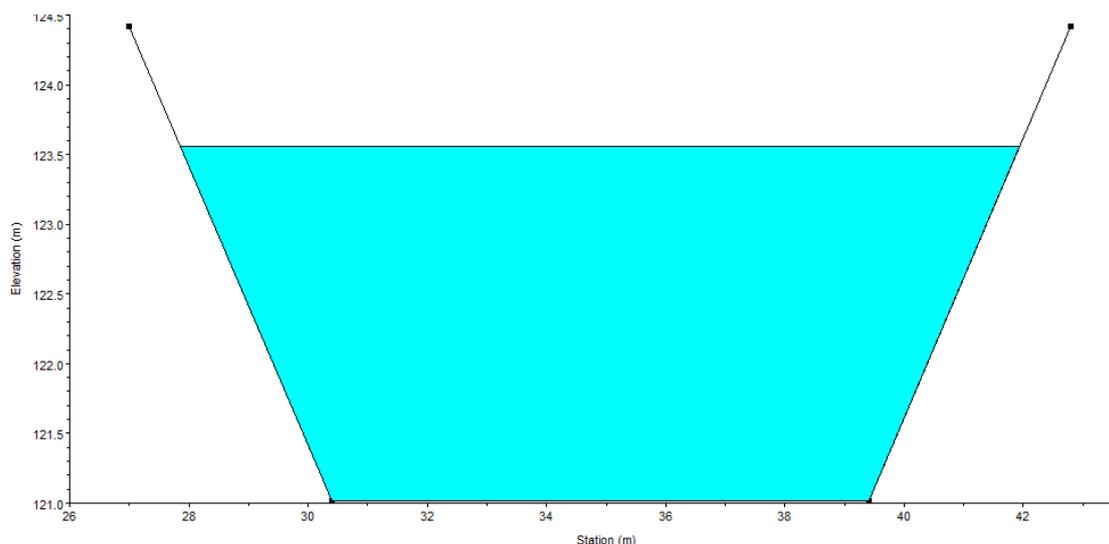


Figure n° V.5 : Profil en travers d'Oued Yellel aménagé avec un canal en béton armé.

V.2.3.3 Estimation du coût de la variante :

On prend une épaisseur de 15 cm pour le béton et pour le béton de propreté on prend une épaisseur de 5 cm. l'estimation du cout de la variante est donnée dans le tableau suivant :

Tableau V.10 : Devis de la variante (canal en béton armé).

Désignation des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblai	m ³	39806	250	9951500
	Remblai	m ³	17530	200	3506000
Béton de propreté		m ³	4443	6000	26658000
Béton armé		m ³	15172	32000	485504000
Total					525619500

V.2.4 Canal en gabion :

Les matelas en gabions sont utilisés principalement pour réaliser les revêtements et les protections anti-affouillements. Ils se présentent sous forme de dimensions variées, dont les plus courant sont 2 * 1 * 1 m et 2 * 1 * 0.5 m. Les canaux en gabion, sont mis en œuvre d'une façon spéciale ; les sacs sont agencés de manière à créer un escalier qui renforce la stabilité des berges.

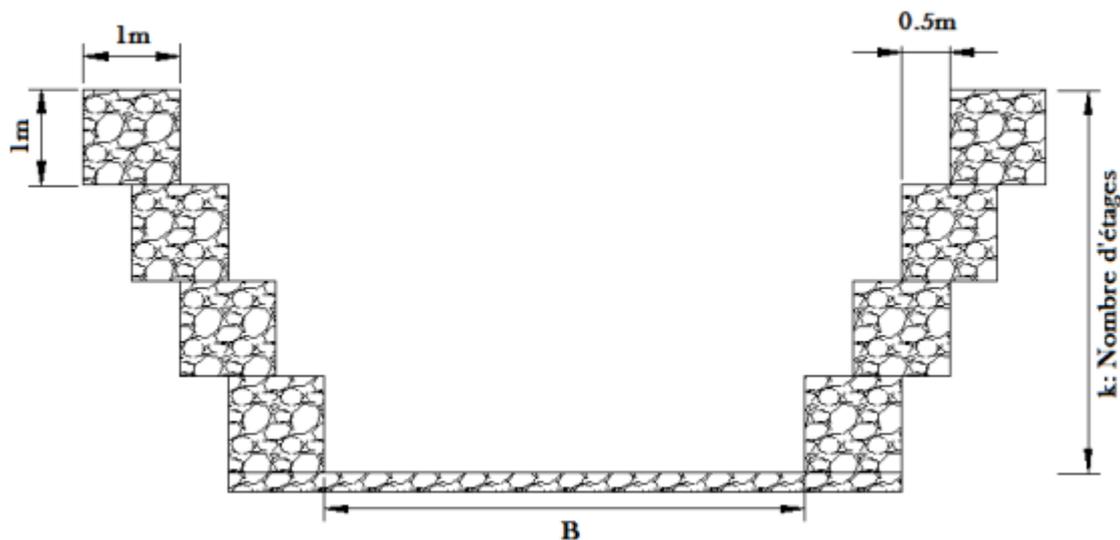


Figure n° V.6 : Coupe en travers d'un canal en gabion

Tableau V.11 : Caractéristiques géométriques de la section gabionnée.

Caractéristique	Section (m ²)	Périmètre (m)	Rayon hydraulique (m)
Relation	$\frac{1}{2} k (k-1) + bk$	$b + 3k - 1$	$\frac{0.5k (k - 1) + bk}{b + 3k - 1}$

Avec : k : nombre d'étages.
b : base canal.

V.2.4.1 Dimensionnement :

Les dimensions de l'aménagement sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau n° V.12 : Dimensions de l'aménagement d'Oued Yellel (canal en gabion).

Tronçons	Section départ	Section arrivée	Longueur (m)	Pente projet (%)	Largeur fond b (m)	Hauteur du canal H (m)
1	0	1000	1000	0.64	13	4
2	1000	2000	1000	0.64	10	5
3	2000	3900	1900	0.64	13	4

V.2.4.2 Les paramètres d'écoulement :

Les résultats de la simulation seront représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° V.13 : Paramètres d'écoulement de la variante canal en gabion.

Tronçons	Débit Q (m3/s)	Vitesse (m/s)	Froude	Tirant d'eau (m)	Remarque
1	248.2	5.6	0.98	3.31	régime critique
2	248.2	5.06	0.99	3.88	régime critique
3	248.2	5.6	0.98	3.31	régime critique

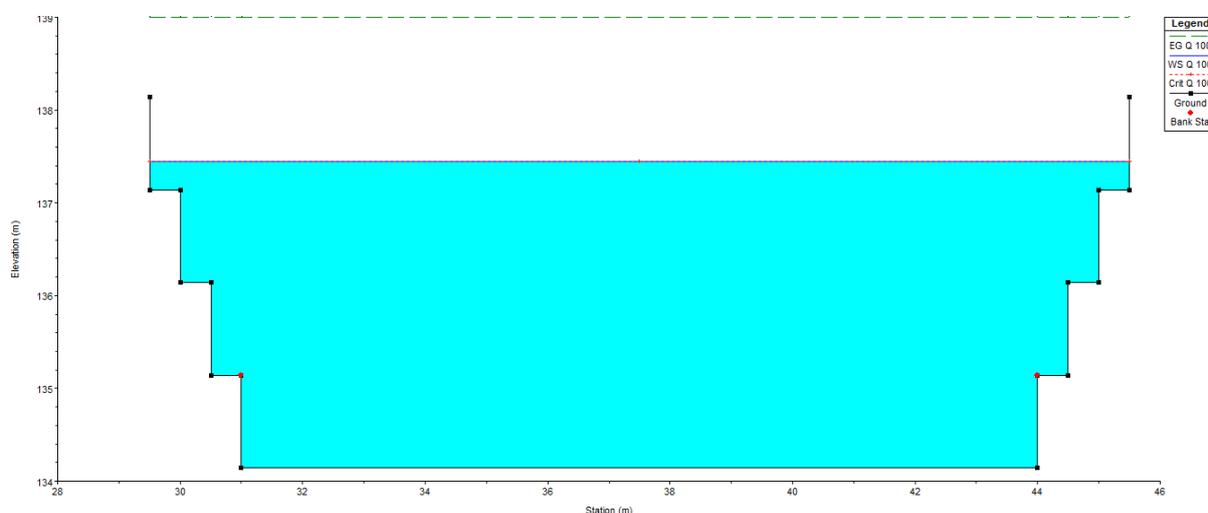


Figure n° V.7 : Profil en travers d'Oued Yellel aménagé avec un canal en gabion.

V.2.4.3 Estimation du coût de la variante :

Tableau V.14 : Devis de la variante (canal en gabion).

Désignation des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblai	m ³	67258	250	16814586
	Remblai	m ³	23227	200	4645450
Gabion		m ³	102310	4500	460395000
Total					481855036

V.2.5 Canal mixte :

Cette variante est décomposée en deux parties : un canal en gabion pour le tronçon qui traverse la ville (tronçon 2) et un recalibrage du terrain naturel par une section trapézoïdale non revêtue (berges et lit) pour les deux autres tronçons.

V.2.5.1 Dimensionnement :

Les résultats de calcul sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau n° V.15 : Dimensions de l'aménagement d'Oued Yellel (canal mixte).

Tronçons	Section départ	Section arrivée	Longueur (m)	Pente projet (%)	Fruit de talus m	Largeur fond b (m)	Hauteur du canal H (m)
1	3900	2000	1900	0.64	2	10	3.8
2	2000	1000	1000	0.64	#	10	5
3	1000	0	1000	0.64	2	12	3.6

V.2.5.2 Les paramètres d'écoulement :

Les résultats de la simulation seront représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° V.16 : Paramètres d'écoulement de la variante canal en mixte.

Tronçons	Débit Q (m3/s)	Vitesse (m/s)	Froude	Tirant d'eau (m)	Remarque
1	248.2	5.66	1.26	2.81	régime torrentiel
2	248.2	5.06	0.99	3.88	régime critique
3	248.2	5.56	1.25	2.60	régime torrentiel

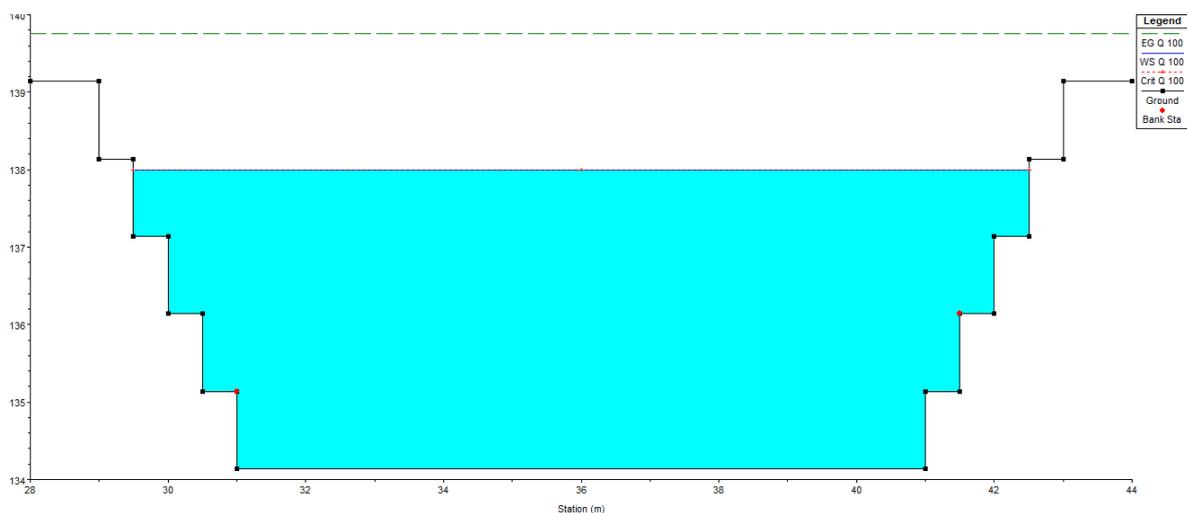


Figure n° V.8 : Profil en travers d'Oued Yellel aménagé avec un canal mixte.

V.2.5.3 Etude de la stabilité du canal :

Nous avons montré déjà la stabilité du fond donc il reste de vérifier la stabilité des berges. Pour cela on suit les étapes suivantes :

- ◆ Calculer le paramètre de réduction K tel que :

$$K = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}} \dots\dots\dots(\mathbf{V.5})$$

Avec : θ : l'angle du talus avec l'horizontale avec $m = \text{ctg } \theta$ (pour notre cas $\theta = 26.6^\circ$).
 φ : l'angle du repos du matériau ($\varphi = 31^\circ$).

- ◆ Calculer la contrainte tangentielle admissible des talus en multipliant K par la contrainte tangentielle admissible du fond τ_{adm} .

- ◆ Calculer la contrainte tangentielle au niveau des berges par la formule suivante :

$$\tau_{o\text{ berge}} = 0.76 \gamma_w Ri \left[\text{N/m}^2 \right] \dots\dots\dots(\mathbf{V.6})$$

Avec : $\tau_{o\text{ berge}}$: la tension tangentielle critique exercée sur les berges (N/m²).
 R : le rayon hydraulique (m).
 γ_w : poids volumique de l'eau (N/m³).
 i : la pente du fond.

- ◆ Vérification que la contrainte tangentielle au fond $\tau_{o\text{ berge}}$ est inférieur à la contrainte admissible $\tau_{adm\text{ berge}}$.

Les résultats de calcul sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n° V.17 : résultats des contraintes tractrices.

Contrainte tractrice	$\tau_{o\text{ berge}}$	$\tau_{adm\text{ berge}}$
Valeur (N/m ²)	0.11	0.13

Interprétation : on remarque que la contrainte tangentielle au niveau des berges $\tau_{o\text{ berge}}$ est inférieur à la contrainte admissible $\tau_{adm\text{ berge}}$, la stabilité des berges est bien vérifiée et la réalisation d'un tel aménagement est possible.

V.2.5.4 Estimation du coût de la variante :

Tableau V.18 : Devis de la variante (canal mixte).

Désignation des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblai	m ³	46547	250	11636750
	Remblai	m ³	16991	200	3398200
Gabion		m ³	33000	4500	148500000
Total					163534950

V.3 Choix de la variante d'aménagement :

V.3.1 Critères d'évaluation :

Le choix de la variante se fera en fonction de plusieurs critères :

- ◆ **Efficacité hydraulique** : correspond au potentiel d'amélioration de la capacité hydraulique que peuvent apporter les mesures.
- ◆ **Difficultés de réalisation** : correspond au degré de difficulté de la réalisation technique.
- ◆ **Enjeux environnementaux** : ce critère tient compte de l'utilisation du sol au voisinage (zone urbaine, agricole,) et des déficits ou richesses environnementaux actuels.
- ◆ **Durabilité** : correspond à la durée de vie de l'aménagement.
- ◆ **Entretien** : correspond à l'ampleur et à la fréquence des entretiens nécessaires.
- ◆ **Coût** : correspond à l'appréciation du coût de construction.

V.3.2 La variante choisit :

Les quatre variantes semblent pouvoir évacuer le débit de crue sans débordement mais d'un point de vue financier, les deux variantes : canal en béton armé et canal en gabion seraient rejetées car le coût est plus élevé donc la projection d'un canal mixte ou bien un recalibrage du lit naturel avec recouvrement des berges par des pierres paraît plus économique.

On opte pour la variante d'un canal mixte car :

- ◆ Le gabion est une solution solide et durable.
- ◆ La simplicité de la réalisation.
- ◆ Une bonne perméabilité qui permet un drainage naturel suffisant.
- ◆ Le gabion diminue la vitesse d'eau et dispersé l'énergie.
- ◆ Formant une belle harmonie avec la nature.

En recommandation, on préconise toujours de recouvrir les talus en terre avec des espèces végétales spéciales qui favorise le maintien des talus stables et se cadre avec l'aspect environnementale du projet.

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, cinq variantes d'aménagement ont été proposées pour la protection des zones urbaines et agricoles d'Oued Yellel contre les inondations. Par la suite, une étude technico- économique a été élaborée pour choisir la plus favorable.

Le choix final consiste principalement à la projection d'un canal mixte. En projetant un canal en gabion dans la zone urbaine et un recalibrage du lit naturel avec une section trapézoïdale en dehors de cette zone.

Chapitre VI :

Organisation de chantier

Introduction :

L'organisation de chantier est une démarche visant à rechercher constamment, la meilleure façon d'utiliser économiquement la main d'œuvre et les autres moyens mis en œuvre pour gérer le chantier. Elle permet d'organiser les travaux et de choisir les engins nécessaires influençant sur les coûts et le délai d'exécution du projet.

VI.1 Généralités :

VI.1.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier :

L'équipe de réalisation d'un projet est composée principalement par :

VI.1.1.1 Maître de l'ouvrage :

C'est une personne physique ou morale pour laquelle s'exécutent les travaux, il définit le but à atteindre et assure le financement. Le maître de l'ouvrage doit assumer certaines responsabilités, par exemple :

- ◆ Gérer la réalisation du projet.
- ◆ Transmettre l'information pertinente relative au projet.
- ◆ Remplir les obligations établies par les documents contractuels.
- ◆ Assurer la coordination et la cohésion de l'équipe de projet, la bonne conduite des contrats et la réalisation des travaux.
- ◆ Prendre possession du projet.

VI.1.1.2 Maître d'œuvre :

C'est une personne physique ou morale désignée par le maître d'ouvrage pour concevoir l'ouvrage tout en assurant le contrôle de l'exécution. Le maître d'œuvre d'un chantier est celui qui détient la responsabilité réelle de l'exécution des travaux et qui exerce une autorité réelle sur le chantier.

VI.1.1.3 L'entreprise :

Personne physique ou morale, titulaire d'un marché de travaux conclu avec le maître d'ouvrage, chargé de :

- ◆ Réaliser un ouvrage de qualité par le contrôle de la qualité de son travail.
- ◆ Gérer les coûts et les travaux.
- ◆ Elaborer le planning d'exécution des travaux.
- ◆ Répondre aux obligations établies par les documents contractuels
- ◆ Réaliser les travaux définis dans son contrat.
- ◆ Respecter les délais.

VI.1.2 Définitions des engins utilisés :

Le matériel utilisé est le matériel classique des chantiers de travaux publics. L'utilisation de gros engins mécaniques va réduire considérablement le prix et le temps des terrassements.

Tableau VI. 1 : Engins utilisés.

Taches	Engins	Actions
Travaux de préparation	Dozers	Enlever les obstacles et les herbes
	Chargeurs	
	Pelles	
	Camions	
Terrassement	Pelles	Donner la forme exacte du canal
	Chargeurs	
	Dozers	
	Niveleuse	
	Camions	
	Dumpers	
Compactage	Tous types de compacteurs à rouleaux lisses	Consolider les berges de l'oued pour éviter l'affaissement
	Compacteurs à pieds de mouton	

VI.2 Devis quantitatif et estimatif du projet :

Les estimations des prix des ouvrages et aménagements donnés :

- ◆ Prix unitaire des terrassements.
- ◆ Prix unitaire de fourniture et pose de (gabionnage, tout venant).

Le tableau suivant donne les montants de réalisation de la variante retenue :

Tableau VI.2 : Le devis des différents travaux d'Oued Yellel.

Désignation des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblai	m ³	46547	250	11636750
	Remblai	m ³	16991	200	3398200
Evacuation		m ³	29556	200	5911200
Tout venant		m ³	4000	1200	4800000
Gabion		m ³	33000	4500	148500000
Montant HT					174246150
TVA 19%					33106769
Total TTC					207352919.00

Le devis du projet est estimé à : **deux cent deux millions trois cent cinquante deux mille Neuf cent dix-neuf dinars algérien.**

VI.3 La Planification :

VI.3.1 Définition :

C'est l'activité qui consiste à déterminer et à ordonnancer les tâches du projet et à déterminer les profils nécessaires à leur réalisation. Autrement dit, c'est une méthode dont dispose le cadre opérationnel pour rendre son travail efficace. Les objectifs du planning sont les suivants :

- ◆ L'installation des postes de travail.
- ◆ L'observation instantanée.
- ◆ L'analyse des tâches.
- ◆ Le chronométrage.
- ◆ La simplification des méthodes.

VI.3.2 Techniques de la planification :

Il existe deux principales méthodes de planification à savoir :

- ◆ Méthodes basées sur le réseau.
- ◆ Méthodes basées sur le graphique.

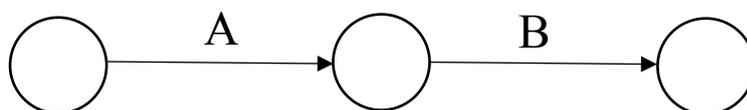
VI.3.2.1 Méthodes basées sur le réseau :

a. Définition :

Le réseau est une représentation graphique d'un projet qui permet d'indiquer la relation entre les différentes opérations qui peuvent être successives, simultanées, convergentes et la durée de réalisation. On distingue deux types de réseaux :

◆ Réseau à flèches :

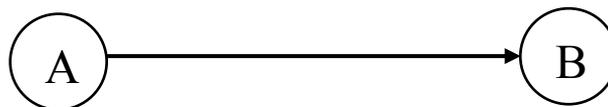
L'opération est représentée par une flèche et la succession des opérations par des nœuds.



L'opération A précède l'opération B.

◆ Réseau à nœuds :

L'opération est représentée par un nœud et la succession des opérations par des flèches.



L'opération **B** ne peut commencer que si l'opération **A** est complètement achevée.

b. Construction du réseau :

Pour construire un réseau, il convient d'effectuer les six opérations suivantes :

◆ Etablissement d'une liste des tâches : Il s'agit dans cette première phase de procéder à un inventaire très précis et détaillé de toutes les opérations indispensables à la réalisation d'un projet.

◆ Détermination des tâches antérieures : Après avoir dressé la liste des tâches à effectuer, il n'est pas toujours facile de construire un réseau car il n'est pas aisé de dire si les tâches antérieures doivent être successives ou convergentes.

◆ Construction des graphes partiels.

◆ Regroupement des graphes partiels.

◆ Détermination des tâches de début de l'ouvrage et de fin de l'ouvrage.

◆ Construction du réseau.

c. Différentes méthodes basées sur le réseau :

◆ **Méthode C.P.M (Méthode française) :**

L'objectif de cette méthode est de réduire les temps de réalisation d'un ouvrage en tenant compte de trois phases.

1 ère phase : l'effectif nécessaire pour effectuer le travail considéré.

2 ème phase : analyser systématiquement le réseau, heure par heure, jour par jour, selon l'unité de temps retenu.

3 ème phase : adapter le réseau aux conditions ou contraintes fixées par l'entreprise.

◆ **Méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technical):**

C'est-à-dire technique d'ordonnancement des tâches et contrôle des programmes, c'est une méthode consistant à mettre en ordre sous forme de réseau plusieurs tâches qui grâce à leur chronologie et leur dépendance concourent toutes à l'obtention d'un produit fini.

VI.3.2.2 Méthodes basées sur le graphique :

a. Méthode linéaire (ligne of balance technic) :

Cette méthode est destinée à la planification des projets de construction dont les travaux sont répétitifs.

b. Méthode à barres :

Cette technique consiste à déterminer deux réseaux et un diagramme à barres (plan de travail).

VI.3.3 Les étapes de la planification :

La planification est le processus de la ligne de conduite des travaux à réaliser, elle comprend des étapes suivantes :

VI.3.3.1 Collection des informations :

L'établissement d'une synthèse d'analyse des informations acquises par des études comparatives permet l'usage correct du plan de réalisation du projet.

VI.3.3.2 Décomposition du projet :

C'est une partie importante car chaque projet peut être analysé de diverses manières. Nous attribuons à chaque tâche un responsable et ses besoins en matériels.

VI.3.3.3 Relations entre les tâches :

Il existe deux relations essentielles entre les tâches lors de la réalisation. L'une porte sur un enchaînement logique et l'autre sur un enchaînement préférentiel.

VI.3.4 Choix de la méthode de calcul :

Le choix de la méthode de calcul repose essentiellement sur le type d'ouvrage construire. Il est préférable dans le cas où les opérations se suivent comme dans notre cas d'opter pour la méthode C.P.M.

VI.3.4.1 Les paramètres de calcul dans la méthode C.P.M

Les paramètres indispensables dans l'exécution de cette méthode sont les suivants :

DCP	t_r
DFP	DCPP
DFPP	MT

Avec :

t_r : temps de réalisation.

DCP : date de commencement au plus tôt.

DCPP : date de commencement au plus tard.

DFP : date de finition au plus tôt.

DFPP : date de finition au plus tard.

MT : marge totale, intervalle de temps nécessaire pour le déroulement de l'opération tel que :

$$DFP = DCP + t_r$$

$$DCPP = DFPP - t_r$$

VI.3.4.2 Chemin critique (C.C) :

C'est le chemin qui donne la durée totale du projet (DTR) reliant les opérations possédant la marge totale nulle (0).

Donc pour retrouver un chemin critique il suffit de vérifier la double condition suivante :

$$MT = 0 \text{ et } \sum t_{rcc} = DTP$$

VI.3.5 Diagramme de Gantt :

Le diagramme de Gantt, couramment utilisé en gestion de projet, est l'un des outils les plus efficaces pour représenter visuellement l'état d'avancement des différentes activités (tâches) qui constituent un projet. La colonne de gauche du diagramme énumère toutes les tâches à effectuer, tandis que la ligne d'en-tête représente les unités de temps les plus adaptées au projet (jours, semaines, mois etc.). Chaque tâche est matérialisée par une barre horizontale, dont la position et la longueur représentent la date de début, la durée et la date de fin. Ce diagramme permet donc de visualiser d'un seul coup d'œil :

- ◆ Les différentes tâches à envisager.
- ◆ La date de début et la date de fin de chaque tâche.
- ◆ La durée escomptée de chaque tâche.
- ◆ Le chevauchement éventuel des tâches, et la durée de ce chevauchement.
- ◆ La date de début et la date de fin du projet dans son ensemble.

En résumé, un diagramme de Gantt répertorie toutes les tâches à accomplir pour mener le projet à bien, et indique la date à laquelle ces tâches doivent être effectuées (le planning).

VI.3.6 Elaboration du réseau selon la méthode CPM :

La méthode du CPM est une méthode de planification, elle a pour objectif de réduire le temps et le coût de réalisation de projet et augmenter le rendement du travail. Pour la construction du réseau il faut d'abord établir les différentes tâches des travaux. Ces derniers sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau VI.3 : Liste des opérations avec leurs durées.

Désignation d'opération	Code	Durée (Jours)
Installation du chantier	A	15
Travaux de terrassement sur tronçon 1	B	45
Compactage sur tronçon 1	C	20
Travaux de terrassement sur tronçon 2	D	50
Compactage sur tronçon 2	E	25
Pose de gabion	F	90
Travaux de terrassement sur tronçon 1	G	85
Compactage sur tronçon 1	H	40
Déménagement du chantier	I	15

Dans le tableau suivant on présente chaque tache avec celles qu'elle précède dans le phasage des travaux :

Tableau VI.4 : Succession des taches.

Opération	Durée (Jours)	Précède
A	15	B
B	45	C
C	20	D
D	50	E
E	25	F, G
F	90	I
G	85	H
H	40	I
I	15	#

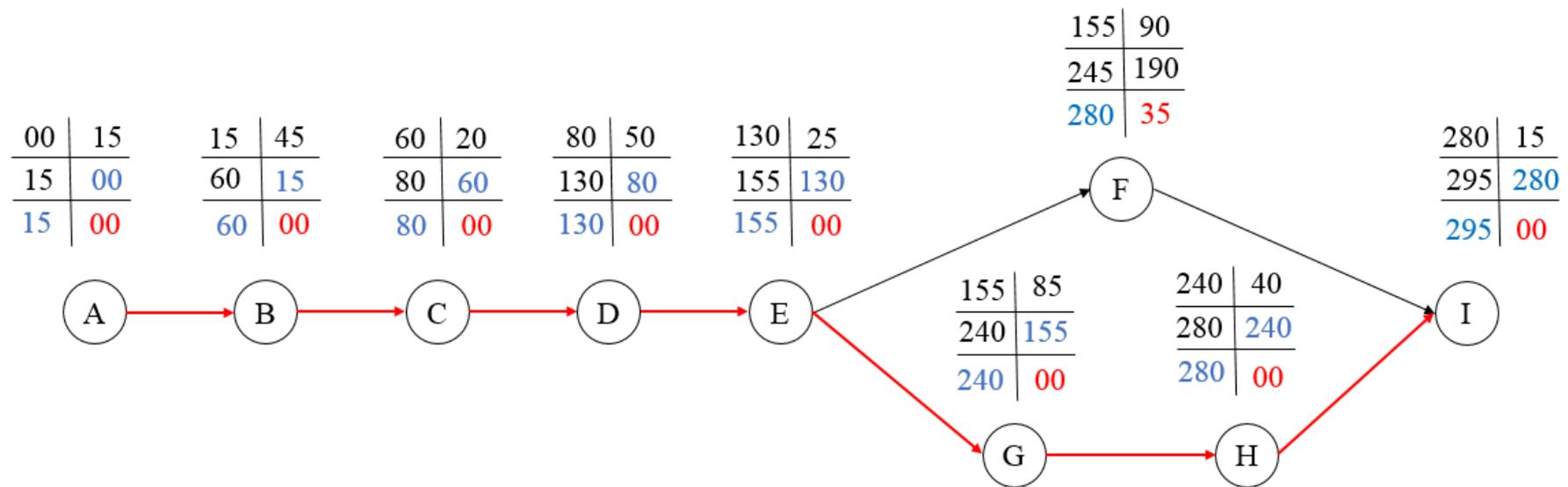


Figure IV.3 : Réseau de planification des taches par la méthode CPM.

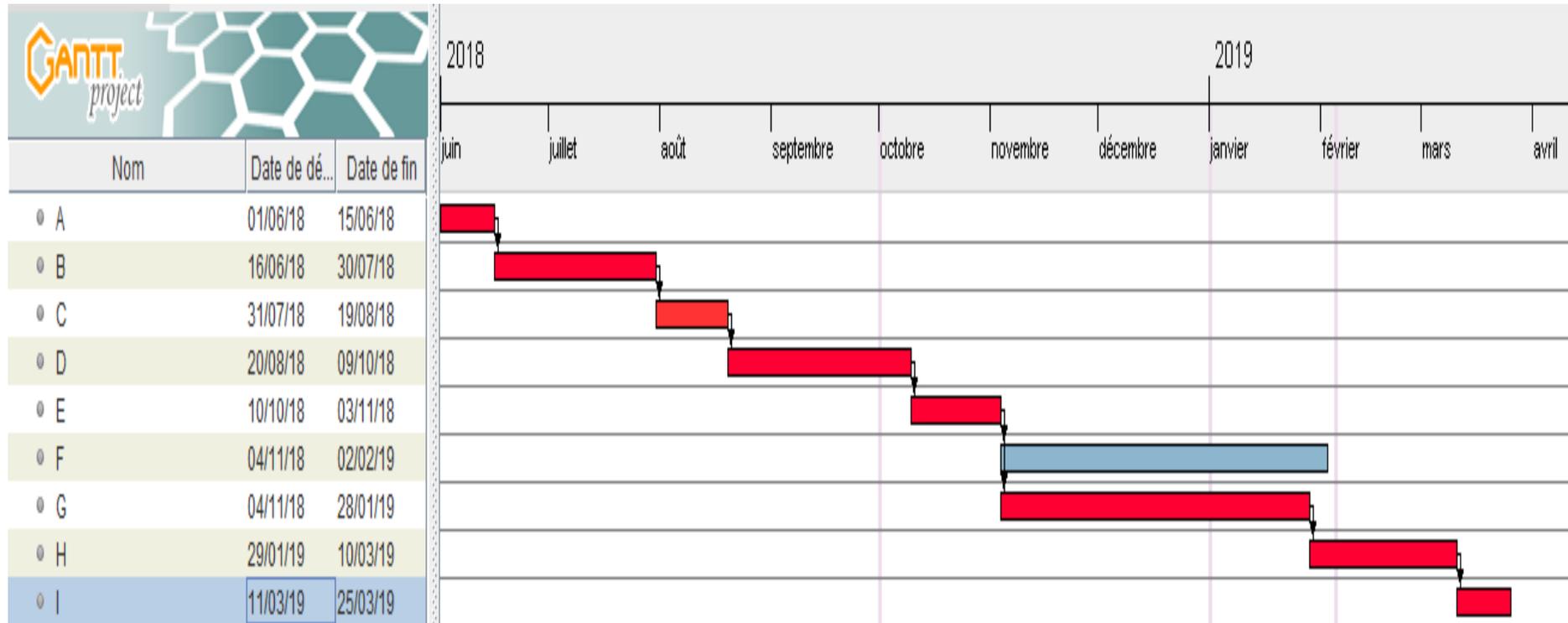
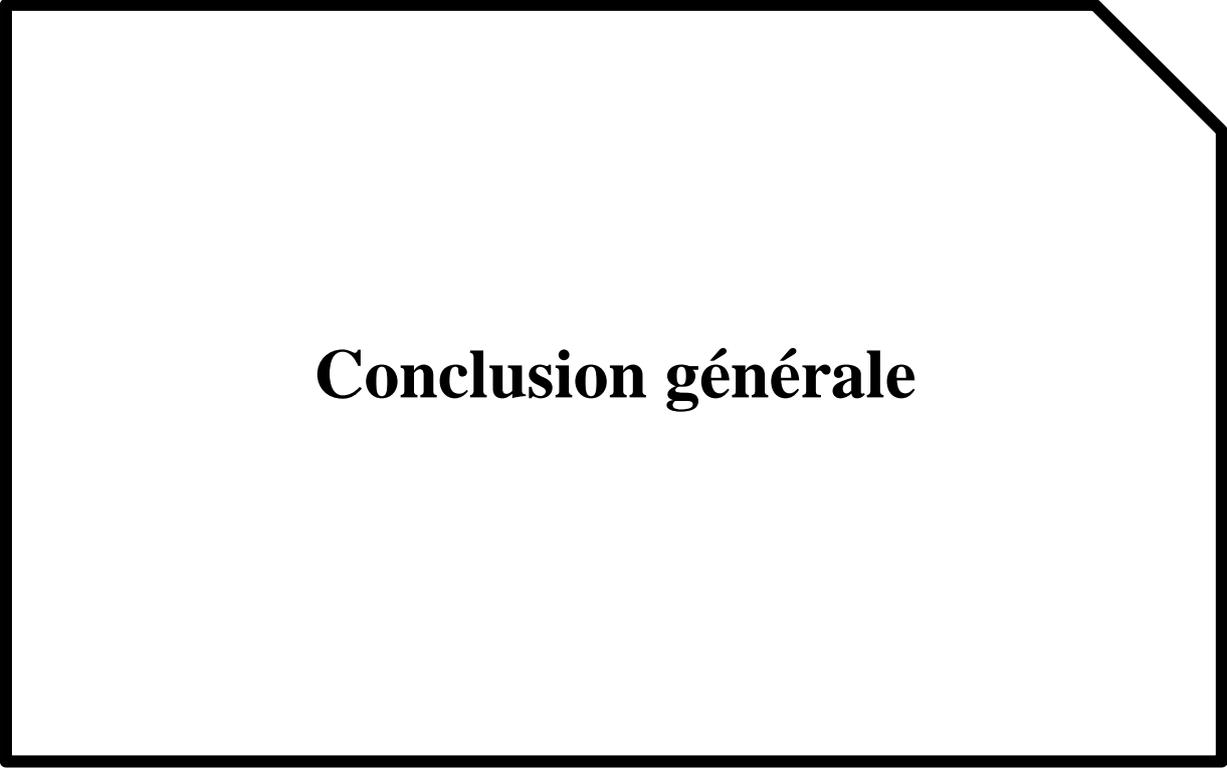


Figure IV.3 : Réseau de planification des taches par la méthode CPM.

- Chemin critique ;
- Le cheminement des taches.

Conclusion :

L'exécution d'un ensemble de travaux par gestion rationnelle de temps ; demande conjointement des moyens humains, techniques et matériels, afin d'aboutir à un but ultime qui est la livraison du projet dans les délais prévus, sans sortir des couts d'investissement initiaux. A l'issue de ce volet nous avons pu estimer le cout global du projet d'aménagement d'oued Yellel est de 202830919.00 DA pour un délai de réalisation de 42 semaines.



Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail a été de faire une étude d'aménagement d'Oued Yellel, son comportement et sa capacité à évacuer une crue fréquentielle donnée. Afin de pouvoir traiter l'aspect réel du problème d'inondation sur la zone en question, et ainsi donner des solutions mieux adaptées au contexte.

La zone d'étude est considérée, zone, à haut risque d'inondation présentant un degré de vulnérabilité élevé compte tenu de sa situation géographique (la ville est traversées par un Oued).

L'étude hydromorphologique du bassin versant d'Oued Yellel montre qu'il est d'une forme allongée caractérisé par un relief assez fort et relativement pentu avec un point culminant de 924 m. Le temps de concentration assez faible rend les crues d'autant plus dangereuses.

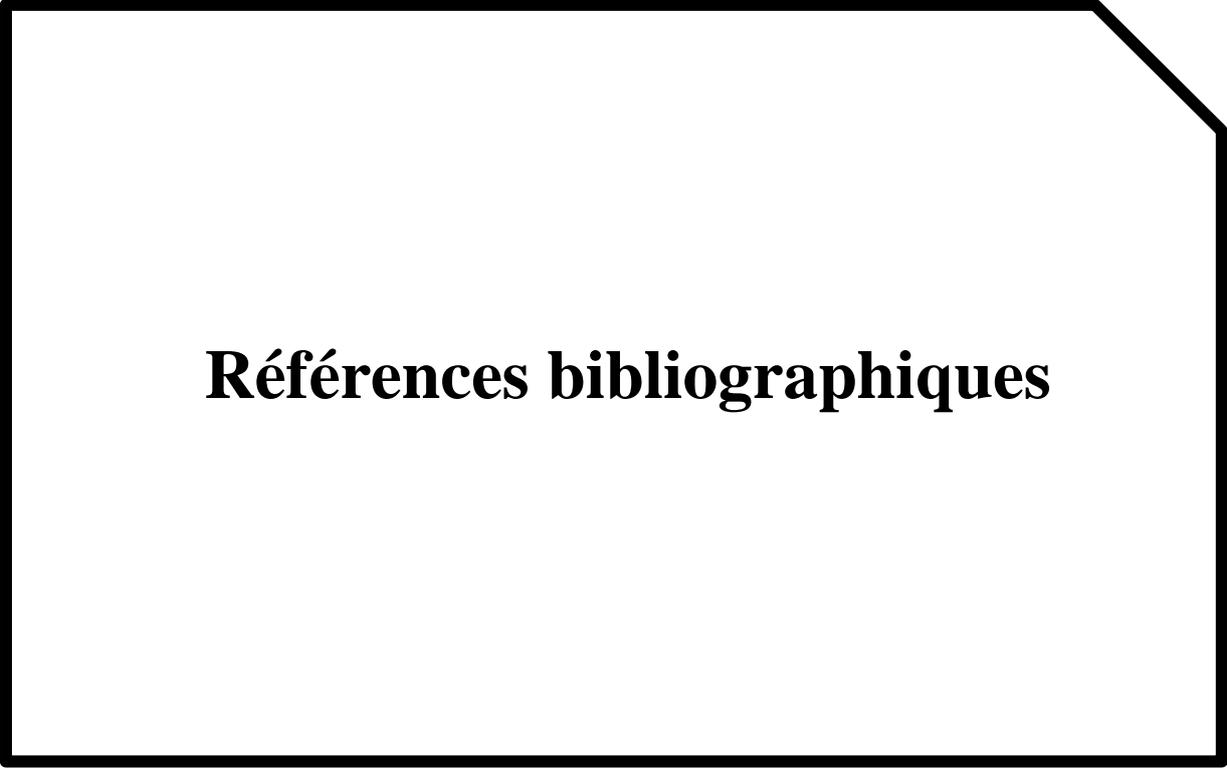
Pour l'estimation de la pluie et le débit de crue fréquentiel, le choix s'est porté sur l'utilisation de la loi des extrêmes généralisée (GEV) pour la pluie et la régionalisation des débits maximaux du Nord d'Algérie (le modèle de MEDDI et TOUMI) pour le débit.

Un diagnostic de l'état des cours d'eau a été élaboré pour déceler les paramètres de disfonctionnement du cours d'eau en déterminant les zones inondables via des outils modernes puissants, tels que le logiciel AutoCad Civil 3D qui permet d'exporter les profils en travers vers le logiciel de simulation hydraulique HEC-RAS. Les résultats de la simulation montrent bien que l'état actuel du cours d'eau ne permet pas d'évacuer les eaux d'un événement extrême de l'ordre d'une crue centennale. La représentation du phénomène ainsi que du cours d'eau reste approximative vu l'impossibilité de faire une représentation réelle de ces derniers, mais la représentation qui a été faite reste très proche de la réalité.

Il a été constaté, que beaucoup d'endroits de la région d'étude sont susceptibles d'être inondés après l'adoption du scénario de la crue centennale, telles que les habitations proches du cours d'eau ainsi que les routes, ce qui a permis de proposer des solutions à la mesure du problème. D'après l'étude technico-économique des variantes, l'aménagement proposé est canal mixte constitué d'un canal en gabion pour le tronçon qui traverse la ville avec un recalibrage du terrain naturel par une section trapézoïdale non revêtue en dehors de la ville.

Le projet de réalisation de l'aménagement s'étale sur un délai de 42 semaines, pour un coût de deux cents millions de Dinars.

En définitive, pour assurer la durabilité et le bon fonctionnement de nos ouvrages, les travaux d'entretien et de maintenance sont essentiels pour pérenniser l'aménagement et assurer qu'il remplit sa fonction en évacuant les débits de crues dans de bonnes conditions.



Références bibliographiques

Bibliographies

B.TOUAIBIA, Manuel pratique d'hydrologie , Mars 2004.

Armando LENCASTRE, Hydraulique Générale, 2eme édition, éditions EYROLLES, 1996.

HEC-RAS Users manuel. US Army corps of engineers Hydrologic Engineering Center, version 4.1 january 2010.

BENNIS.S, Hydraulique et hydrologie, École de technologie supérieureCanada ,2 ème Edition, 2009.

Meylan, P. & Musy, A, Hydrologie fréquentielle. Editions HGA, Bucharest, Hongrie, 1999.

Degoutte.G, Diagnostic, aménagement et gestion des rivières. Edition TEC et DOCLavoisier, 2006.

BEN SIDI AHMED L'HACHIMI, Etude d'aménagement de oued reghaia et ses affluents pour la protection contre les inondationsdes communes de REGHAIA et OULED HEDADJ (W.ALGER). Mémoire d'ingénieur d'Etat en Hydraulique. Ecole NationaleSupérieure de l'Hydraulique. Blida. Algérie, 2015.

Meddi M., Toumi,S, Application of the L-moments approach to the analysis of regional flood frequency in northern Algeria. Journal of Hydrology and Technology, Vol 7, No.1, 2017.

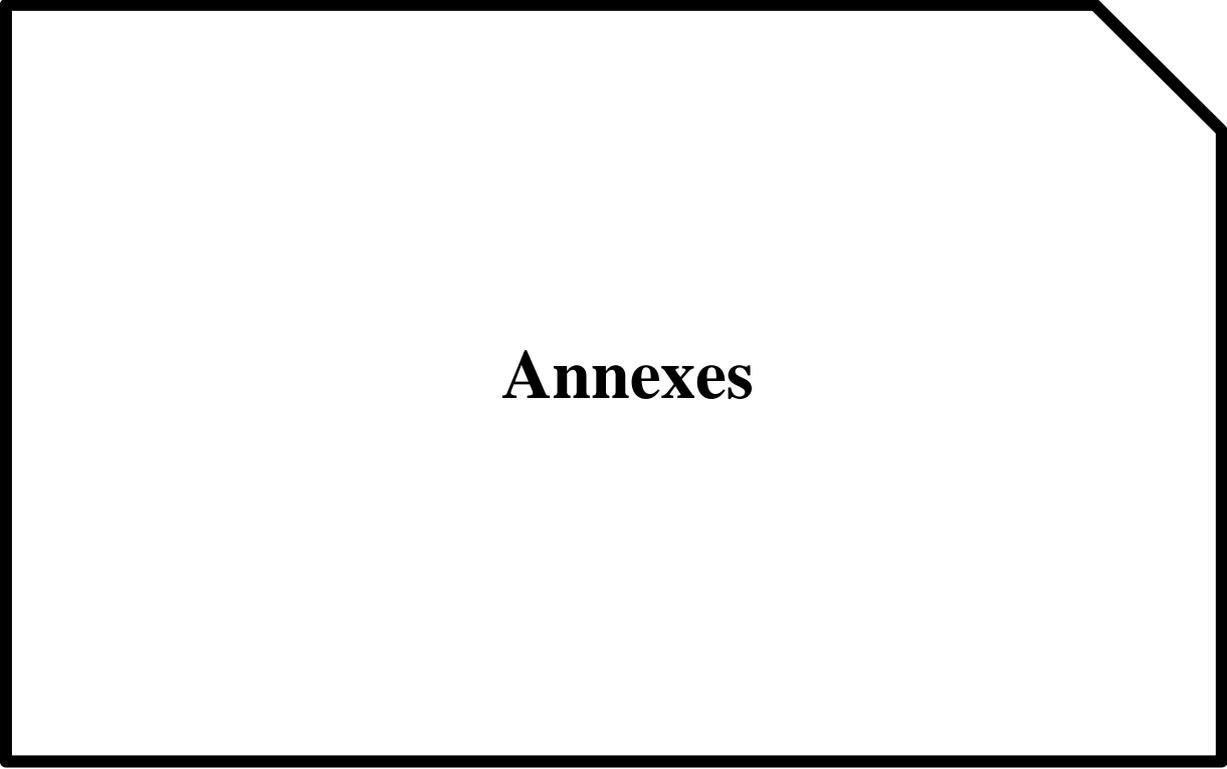
DUBREUIL P., Introduction à l'analyse hydrologique, Masson et Cie, 1974.

BACHI MOHAMED, Problematique du risque inondation en milieu urbain ; cas de l'agglomeration de SIDI BEL ABBES. Thèse de Magister en Hydraulique. Université Aboubakr Belkaïd. Tlemcen. Algérie, 2011.

Yahiaoui, A. Inondations Torrentielles. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord. Cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès) Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2012.

M.Hanif Chaudhry, Open-Channel Flow, Second Edition, 2014.

Règles parasismiques algériennes RPA 99/ Version 2003.



Annexes

Annexe 1

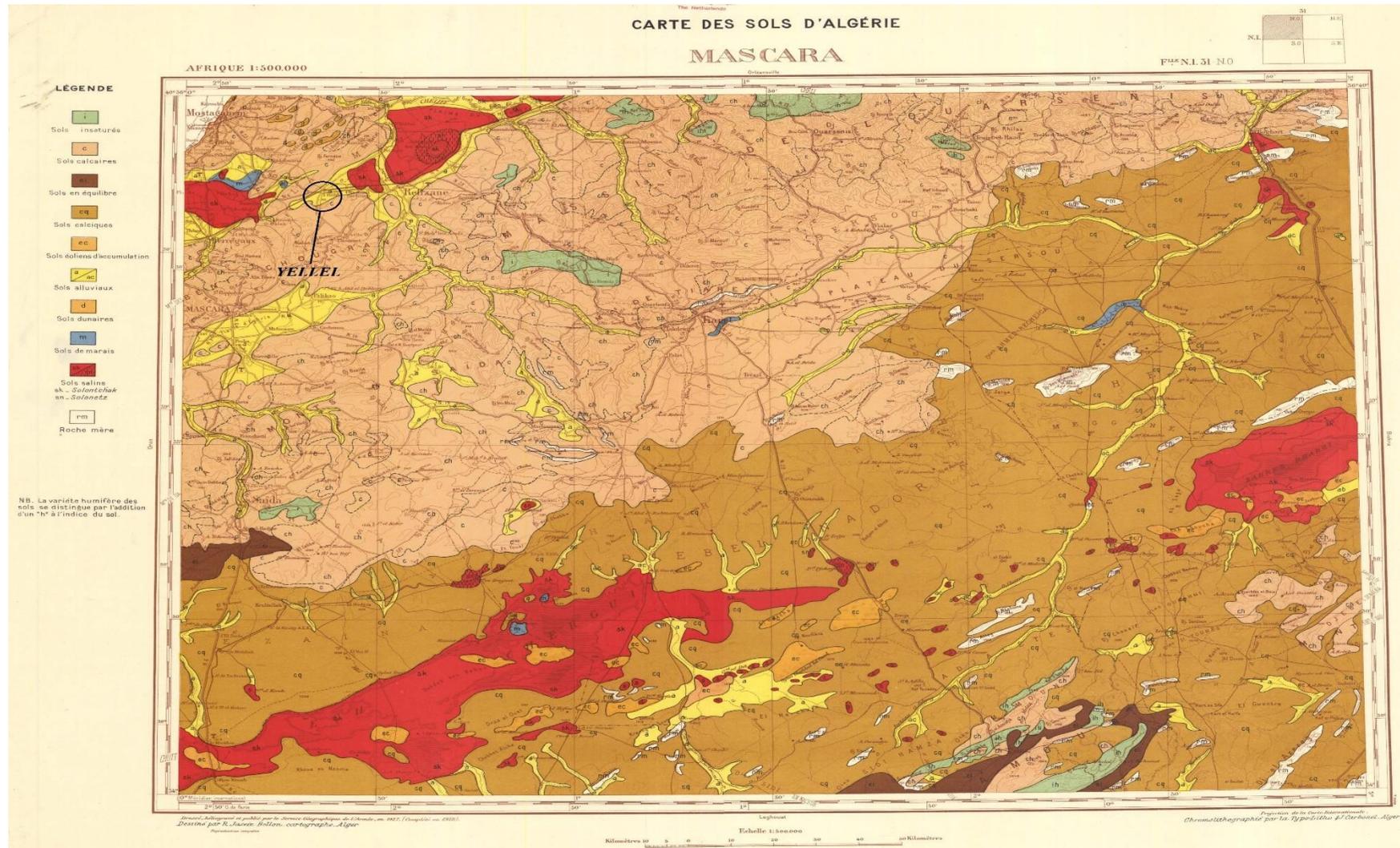


Figure n° 1 : Carte géologique du Skikda (source BET).

Annexe 2

Tableau n° 1 : Résultats de la simulation à l'état naturel sur HEC-RAS :

Section	Q (m ³ /s)	Fond du canal (m)	Altitude ligne d'eau (m)	Altitude de la ligne d'énergie (m)	Pente ligne d'énergie (%)	V _{éc} (m/s)	S _{mouillé} (m ²)	Nombre de froude
3892.6	248.2	109.36	112.83	113.37	0.42%	3.66	82.1	0.88
3850	248.2	109.46	113.11	113.65	0.48%	3.64	80.26	0.92
3800	248.2	109.66	113.5	114.09	0.38%	3.86	80.07	0.85
3750	248.2	110.04	113.69	114.25	0.42%	3.62	79.75	0.88
3700	248.2	110.78	113.87	114.55	0.49%	3.88	68.43	0.95
3650	248.2	110.81	114.02	114.72	0.55%	3.86	67.97	1
3600	248.2	111.37	114.66	115.19	0.39%	3.63	83.14	0.86
3550	248.2	111.52	114.87	115.41	0.44%	3.64	81.11	0.9
3500	248.2	111.35	114.53	115.28	0.68%	4.34	69.99	1.11
3450	248.2	112.07	115.62	116.17	0.38%	3.65	82.46	0.85
3400	248.2	112.19	115.99	116.64	0.47%	3.88	73.15	0.93
3350	248.2	112.85	116.82	117.37	0.34%	3.63	83.55	0.8
3300	248.2	113.46	116.48	117.21	0.49%	4.06	67.92	0.95
3250	248.2	113.2	117.01	117.71	0.50%	3.96	69.12	0.95
3200	248.2	114.37	117.2	117.76	0.44%	3.55	78.67	0.9
3150	248.2	114.63	117.98	118.66	0.53%	3.86	69.3	0.98
3100	248.2	115.54	118.06	118.77	0.49%	4.01	68.96	0.97
3050	248.2	115.23	118.26	119	0.50%	4.13	66.45	0.97
3000	248.2	115.34	118.27	118.82	0.49%	3.5	78.16	0.93
2950	248.2	115.51	118.46	119	0.45%	3.54	79.55	0.91
2900	248.2	116.03	119.1	119.65	0.44%	3.42	80.2	0.88
2850	248.2	116.53	119.54	120.08	0.48%	3.53	79.43	0.92
2800	248.2	116.8	120.02	120.56	0.37%	3.64	83.63	0.84
2750	248.2	116.61	119.83	120.5	0.48%	3.96	73.25	0.95
2700	248.2	116.52	120.73	121.33	0.37%	3.77	80.92	0.84
2650	248.2	117.13	120.95	121.58	0.35%	3.76	78.58	0.81
2600	248.2	117.53	121.04	121.63	0.38%	3.75	80.06	0.87
2550	248.2	117.75	121.1	121.65	0.52%	3.44	78.62	0.95
2500	248.2	117.78	121.99	122.58	0.32%	3.72	83	0.78
2450	248.2	118.33	121.92	122.63	0.59%	3.78	66.77	1
2400	248.2	119.29	122.4	123.1	0.38%	3.99	71.96	0.87
2350	248.2	119.47	122.04	122.7	0.52%	3.78	70.46	0.98
2300	248.2	119.62	122.6	123.15	0.35%	3.63	83.26	0.82
2250	248.2	120.03	123.49	124.25	0.34%	3.98	70.53	0.84

Suite tableau n° 1 : Résultats de la simulation à l'état naturel sur HEC-RAS :

Section	Q (m ³ /s)	Fond du canal (m)	Altitude ligne d'eau (m)	Altitude de la ligne d'énergie (m)	Pente ligne d'énergie (%)	V _{éc} (m/s)	S _{mouillé} (m ²)	Nombre de froude
2200	248.2	120.74	123.68	124.72	0.47%	4.64	57.1	0.98
2150	248.2	120.32	124.21	124.99	0.34%	4	68.48	0.83
2100	248.2	120.89	124.15	125.25	0.50%	4.7	54.81	0.97
2050	248.2	121.17	124.61	125.65	0.46%	4.52	56.14	0.96
2000	248.2	121.67	124.88	125.74	0.40%	4.25	64.89	0.89
1950	248.2	121.72	125.14	125.92	0.38%	4.04	68.4	0.87
1900	248.2	121.87	125.52	126.31	0.33%	4.19	68.69	0.83
1850	248.2	122.18	125.95	126.74	0.33%	4.23	68.86	0.83
1800	248.2	122.09	126.21	127.02	0.35%	4.2	68.13	0.82
1750	248.2	122.63	126.64	127.64	0.43%	4.45	58.26	0.91
1700	248.2	122.72	126.02	127.91	1.02%	6.1	40.75	1.39
1650	248.2	123.12	126.55	128.2	0.87%	5.68	43.67	1.29
1600	248.2	123.53	129.13	130	0.41%	4.39	65.03	0.77
1550	248.2	124.2	127.56	129.85	1.20%	6.71	37	1.5
1500	248.2	124.64	128.64	129.78	0.52%	4.73	52.43	1
1450	248.2	124.9	128.81	130.22	0.55%	5.28	47.05	1
1400	248.2	125.46	129.61	130.91	0.49%	5.05	49.68	0.98
1350	248.2	126.26	130.15	131.22	0.44%	4.67	56.1	0.94
1300	248.2	126.14	130.51	131.28	0.35%	3.99	69.27	0.82
1250	248.2	126.65	129.96	130.74	0.43%	4.09	66.63	0.91
1200	248.2	126.83	130.52	131.26	0.60%	3.82	64.95	1.01
1150	248.2	126.06	131.04	131.83	0.36%	4.08	68.69	0.82
1100	248.2	127.03	131.65	132.49	0.33%	4.27	67.31	0.8
1050	248.2	127.75	131.83	133.05	0.50%	4.89	51.1	0.99
1000	248.2	128.11	132.84	133.92	0.41%	4.64	56.11	0.88
950	248.2	128.34	132.77	134.33	0.59%	5.53	44.86	1.04
900	248.2	128.98	132.2	133.97	0.91%	5.89	42.16	1.3
850	248.2	129.12	133.06	134.21	0.50%	4.82	53.44	1.01
800	248.2	129.14	132.18	133.87	1.03%	5.79	43.76	1.39
750	248.2	129.75	133.42	134.31	0.40%	4.25	62.76	0.88
700	248.2	130.17	132.23	133.81	1.24%	5.76	46.21	1.48
650	248.2	130.57	133.38	134.08	0.50%	3.2	67.99	0.92
600	248.2	131.09	134.73	135.67	0.43%	4.36	59.98	0.93
550	248.2	131.13	134.52	135.4	0.40%	4.29	64.1	0.91

Suite tableau n° 1 : Résultats de la simulation à l'état naturel sur HEC-RAS :

Section	Q (m ³ /s)	Fond du canal (m)	Altitude ligne d'eau (m)	Altitude de la ligne d'énergie (m)	Pente ligne d'énergie (%)	V _{éc} (m/s)	S _{mouillé} (m ²)	Nombre de froude
500	248.2	131.07	134.19	135.59	0.71%	5.26	48.02	1.18
450	248.2	131.38	135.07	136.16	0.53%	4.64	53.52	1.01
400	248.2	131.44	135.66	136.47	0.34%	4.18	68.19	0.82
350	248.2	132.25	135.74	136.54	0.34%	4.13	68.04	0.83
300	248.2	132.21	135.57	136.57	0.56%	4.63	60.23	1.02
250	248.2	132.66	136.83	137.58	0.59%	3.84	64.58	1.01
200	248.2	132.79	136.71	138.15	0.65%	5.32	46.68	1.12
150	248.2	133.02	137.39	138.73	0.53%	5.14	48.32	1.01
100	248.2	133.2	137.47	139.91	1.15%	6.91	35.9	1.44
50	248.2	134.3	136.73	139.14	0.53%	4.75	23.07	1.1
0	248.2	134.46	139.03	140.26	0.50%	4.94	51.36	0.99