



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

***ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE***

Laboratoire de recherche en sciences de l'eau

**Département d'Hydraulique**

**Projet de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

**Réalisé par :**

***Mr. MERABET Elhoussaine***

***Mr. YABKA Charaf Eddine***

---

**Diagnostic et Aménagement de l'oued Belghanem  
contre les inondations des zones riveraines**

---

Soutenue publiquement le 14/06/2015 devant le jury composé de :

Président :	<i>Mr. S.BENZIADA</i>
Promoteurs :	<i>Dr. S.BENMAMAR</i> <i>Mr. R.SIOUSSIOU</i>
Examineurs :	<i>Mr. N.NEBBACHE</i> <i>Mr. M.NAKIB</i> <i>Mr. K.KOUIDER</i>

**Promotion 2015**

# *Dédicace*

---

*Avec toute ma gratitude, je dédie ce travail :*

*A mes chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de ma vie, que Dieu les garde.*

*A mes grands parents*

*A mes chers frères et sœurs*

*A mes oncles et à mes tantes*

*A toute ma famille*

*A mon binôme Charaf Eddine avec qui j'ai passé des moments inoubliables*

*A tous mes amis*

*A tous mes amis de l'école, spécialement pour ceux de la promotion*

*A tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.*

*Elhoussaine*

## *Dédicace*

---

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire de mon grand père*

*A ma très cher grande mère*

*A mes très chers Parents*

*A mes frères et sœurs*

*A mes oncles et à mes tantes*

*A toute ma famille*

*A mon binôme Elhoussaine*

*A tous mes vrais Amis*

*A tous mes amis de l'école, spécialement pour ceux de la promotion*

*A toutes les personnes que je connais et que je n'ai pas citées.*

*Charaf Eddine*

## *Remerciements*

---

*Au terme de ce modeste travail, nous remercions Allah, notre guide, notre force, notre bonheur, et la raison de notre existante. C'est lui qui nous a fait comprendre le but de cette vie. Merci d'être là dans les moments les plus difficiles.*

*Nous tenons à adresser en premier lieu nos remerciements à notre promotrice Dr. BENMAMAR Saâdia, pour son soutien, pour tout le temps qu'elle nous a consacré, pour le savoir et tous les conseils qu'elle nous a donnée. Elle était toujours présente et prête à nous aider tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Un grand merci également à Mr. SIOUSSIOU Rostom, pour nous avoir proposé ce sujet, pour tout le temps qu'il nous a consacré, pour sa patience avec nous, pour les conseils qu'il nous a donné et pour son encouragement.*

*Nous tenons aussi à remercier le président, ainsi que les membres du jury, pour avoir accepté d'examiner et de juger ce présent mémoire.*

*Nos vifs remerciements vont aussi à Mr. NACER Bakir et Mr. NACER Hammou, qui ont mis à notre disposition le matériel topographique.*

*Sans oublier de remercier nos enseignants de l'école nationale polytechnique du département de l'hydraulique.*

*Enfin, nous remercions toutes les personnes ayant contribuées, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

## ملخص:

تهدف هذه الأطروحة إلى تهيئة وادي بلغنم من أجل حماية المناطق المطلة على الوادي من الفيضانات، وقد شهدت هذه الأخيرة توسعا عمرانيا بطريقة عشوائية، الأمر الذي جعل من وقوع الفيضانات خطرا حقيقيا للسكان. لبلوغ هدفنا تتبعنا المنهج التالي:

لمحة عامة عن منطقة الدراسة، تحديد قيمة التدفق لطوفان مائة عام، كما قمنا أيضا بتشخيص نظري و تطبيقي لوادي بلغنم لهدف اكتشاف مختلف المشاكل المتواجدة فيه، بعد ذلك تم إعطاء عرض لبرنامج RUBAR20 الذي يقوم بحل معادلات السان فونون، ثم أجرينا محاكاة لطوفان مائة عام الذي يتكرر بمعدل كل مائة عام، يليه عرض للنتائج المتحصل عليها. وفي الأخير إقترحنا مخطط لتهيئة الوادي.

**كلمات مفتاحية:** تهيئة، فيضان، وادي بلغنم، RUBAR20، محاكاة.

## Résumé :

Ce projet de fin d'étude a pour objectif : l'aménagement d'oued Belghanem, afin de protéger les zones riveraines de l'oued contre les inondations. Ce dernier a connu une urbanisation accrue d'une façon anarchique, ce qui a rendu l'occurrence des crues un vrai danger pour les habitants. Pour aboutir aux objectifs visés, la démarche suivante a été adoptée :

Une présentation générale de la zone d'étude, détermination de l'hydrogramme de la crue centennale, diagnostic théorique et pratique d'oued Belghanem pour découvrir les dysfonctionnements, ensuite présentation du code de calcul RUBAR20 qui permet de résoudre les équations de Saint-Venant, puis nous avons effectué une simulation de la crue centennale suivi d'une visualisation des résultats, et finalement un plan d'aménagement a été proposé.

**Mots clés :** Aménagement, inondation, oued Belghanem, RUBAR20, Simulation.

## Abstract:

This final project of study aims to: development of Belghanem's river, in order to protect riparian areas of the river against floods. This last has experienced a chaotic urbanization, which made the occurrence of floods as a real danger for the inhabitants. To achieve its objectives, the following approach has been adopted:

An overview of the study area, determination of the hundred-year flood hydrograph, Theoretical and practical diagnosis of Belghanem's river, then presentation of RUBAR20 computer code that solves the equations of Saint-Venant and we conducted a simulation of the hundred-year flood followed by visualization of results, finally we suggest a development plan as a future solution.

**Keywords:** Development, flooding, Belghanem's river, RUBAR20, simulation.

---

## Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des photos	
Liste des notations	
Liste des acronymes	
Introduction générale .....	1

### Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

Introduction.....	3
I. Aperçu historique .....	3
II. Description de la wilaya de Ghardaïa .....	4
II.1. Situation géographique.....	4
II.2. Caractéristiques de la région.....	5
II.3. Oueds de Ghardaïa.....	5
II.4. Ressources en eau.....	6
II.5. Climatologie .....	6
III. Présentation et localisation de la zone d'étude .....	8
III.1. Problématique de la région.....	9
IV. Généralités sur les inondations .....	10
IV.1. Les inondations.....	10
IV.2. Les crues.....	10
IV.3. Processus de formation des crues .....	10
IV.4. Mécanisme des inondations.....	11
IV.5. Causes des inondations .....	11
IV.6. Type des inondations et ses conséquences.....	11
IV.7. Crues dans la palmeraie de Ghardaïa.....	14
IV.8. Influence des crues pour la palmeraie.....	14
Conclusion.....	15

### Chapitre II : Synthèse hydrologique du bassin versant

Introduction.....	16
I. Caractéristiques morphologiques du bassin versant .....	16
I.1. Présentation du logiciel MapInfo.....	16
I.2. Caractéristiques de forme .....	18
I.3. Relief .....	20
I.4. Réseau de l'écoulement .....	23
II. Étude pluviométrique.....	25
II.1. Ajustement de la série pluviométrique .....	27

---

III. Etude des crues .....	30
III.1. Formule de Turraza.....	30
III.2. Méthode de Sokolovsky .....	31
III.3. Méthode rationnelle .....	32
III.4. Construction de l'hydrogramme de crue par la méthode de Sokolovsky.....	33
conclusion.....	36

### **Chapitre III : Diagnostic théorique des cours d'eau**

Introduction.....	37
I. Problèmes rencontrés dans un diagnostic.....	37
II. Démarche globale du diagnostic d'un cours d'eau.....	38
II.1. L'observation .....	38
II.2. Les mesures.....	38
II.3. Les enquêtes .....	38
III. Matériel et document nécessaire .....	39
IV. L'état des lieux.....	39
IV.1. Paramètres physiques.....	39
IV.2. Paramètres biologiques.....	40
IV.3. Collecte des informations concernant l'aspect patrimonial.....	40
IV.4. Collecte des informations concernant les paramètres humains .....	40
V. Résultats attendus.....	41
VI. Difficultés du diagnostic .....	41
VII. Etude des cours d'eau .....	41
VII.1. Définitions fondamentales .....	42
VII.2. Relations entre dimensions du cours d'eau et hydrologie .....	43
VII.3. Formes en plan - styles fluviaux .....	45
VII.4. Mécanismes d'évolution des berges.....	46
VII.5. Cours d'eau et ponts .....	51
Conclusion.....	52

### **Chapitre IV : Diagnostic de l'oued Belghanem**

Introduction.....	53
I. Démarches du diagnostic pratique .....	53
II. Calcul du coefficient de sinuosité .....	54
III. Morphologie de l'oued Belghanem .....	54
IV. Description du premier tronçon.....	55
IV.1. Profil en long.....	55
IV.2. Coefficient de sinuosité.....	56
IV.3. L'état de tronçon 1.....	56
V. Description de deuxième tronçon .....	58

---

V.1. Profil en long.....	59
V.2. Coefficient de sinuosité.....	59
V.3. L'état de tronçon 2.....	60
VI. Quelques solutions proposées.....	64
Conclusion.....	65

## **Chapitre V : Construction du maillage de calcul**

I. Présentation général de code de calcul RUBAR20.....	66
II. Levé topographique.....	67
II.1. Matériel topographique utilisé.....	67
II.2. Procédure de mesure .....	69
III. Construction du maillage de calcul.....	69
III.1. Construction du maillage initial.....	70
III.2. Construction du maillage final.....	71
IV. Utilisation de Fudaa-Prepro.....	74
IV.1. Bathymétrie et coefficient de frottement.....	74
IV.2. Définition des conditions initiales.....	77
IV.3. Définition des conditions aux limites.....	77
IV.4. Définition des paramètres de calcul.....	77
Conclusion.....	79

## **Chapitre VI : Simulation de la crue centennale de l'oued Belghanem et visualisation des résultats**

Introduction.....	80
I. Simulation de la crue.....	80
I.1. Conditions aux limites.....	80
I.2. Conditions initiales.....	81
I.3. Présentation des ouvrages existant.....	82
I.4. Paramètres de calcul.....	83
II. Visualisation des résultats .....	84
II.1. Période de montée.....	85
II.2. Au sommet de l'hydrogramme .....	86
II.3. Période de décrue .....	87
Conclusion.....	88



## Chapitre VII : Aménagement de l'oued Belghanem

Introduction.....	89
I. Principe de base d'aménagement.....	89
II. Données de base existante pour l'aménagement.....	89
III. Techniques d'aménagement .....	90
III.1. Protection directe .....	90
III.2. Protection indirecte .....	91
IV. Généralités sur les écoulements à surface libre .....	91
IV.1. Définitions.....	91
IV.2. Canaux à ciel ouvert.....	92
IV.3. Différents type de canaux .....	92
IV.4. Dimensionnement des canaux.....	92
IV.5. Ecoulement critique.....	95
IV.6. Hauteur normale .....	96
V. Choix de section de la meilleure conductivité .....	97
VI. Aménagement de l'oued Belghanem.....	98
VI.1. Première variante .....	98
VI.2. Deuxième variante.....	100
VI.3. Précaution contre l'affouillement aval.....	100
VI.4. Emplacement des seuils .....	101
Conclusion .....	102
Conclusion générale .....	103
Références bibliographiques .....	104
Annexes .....	106

## Liste des figures

### Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

Figure	Titre	Page
Figure I-1	Limites administratives de la wilaya de Ghardaïa	4
Figure I-2	Bassin versant des Oueds de la région	6
Figure I-3	Délimitation du bassin versant	8
Figure I-4	Localisation de la zone d'étude	9
Figure I-5	Inondations de plaine	12
Figure I-6	Inondations par ruissellement pluvial	12
Figure I-7	Inondations par crues torrentielles	13
Figure I-8	Inondations par remontée de la nappe phréatique	13
Figure I-9	Inondations par rupture d'une protection	14

### Chapitre II : Synthèse hydrologique du bassin versant

Figure	Titre	Page
Figure II-1	Fenêtre de calage sur MapInfo	17
Figure II-2	Délimitation du bassin versant d'oued Ben Ghenem sur la carte topographique à l'échelle 1/200000	18
Figure II-3	Calcul de la superficie et du périmètre du bassin de Ben Ghenem	19
Figure II-4	Surfaces délimitées par deux courbes de niveau	20
Figure II-5	Courbe hypsométrique du bassin versant d'oued Ben Ghenem	21
Figure II-6	Profil en long du cours d'eau principal d'oued Ben Ghenem	24
Figure II-7	Ajustement à la loi de Gumbel	28
Figure II-8	Ajustement à la loi Log-normale	28
Figure II-9	Caractéristiques d'un hydrogramme de crue	33
Figure II-10	Hydrogramme de crue d'oued Ben Ghenem	36

**Chapitre III : Diagnostic théorique des cours d'eau**

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure III-1	Représentation de termes géographiques usuels	42
Figure III-2	Grands traits morphologique d'un cours d'eau	46
Figure III-3	Processus d'érosion de berges rencontré	47
Figure III-4	Phénomène de rupture de berge en cercle	48
Figure III-5	Phénomène de boulanges	49
Figure III-6	Régression du fond	49

**Chapitre IV : Diagnostic de l'oued Belghanem**

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure IV-1	Découpage de la zone d'étude en deux tronçons	53
Figure IV-2	Profil en long du domaine d'étude	54
Figure IV-3	Vue aérienne du premier tronçon	55
Figure IV-4	Profil en long du tronçon 1	55
Figure IV-5	Vue aérienne de deuxième tronçon	59
Figure IV-6	Profil en long du tronçon 2	59
Figure IV-7	Construction de mur de protection	64

**Chapitre V : Construction du maillage de calcul**

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure V-1	Calage d'une image aérienne de la zone d'étude	70
Figure V-2	Maillage initial généré par Fudaa-Modeleur	71
Figure V-3	Sous-programme Secma	72
Figure V-4	Sous-programme Mcoxima	72
Figure V-5	Sous-programme Mail20	73
Figure V-6	Sous-programme Vf2m	73

Figure V-7	Maillage final de la zone d'étude	74
Figure V-8	Visualisation de la bathymétrie de la zone d'étude	75

**Chapitre VI :** Simulation de la crue centennale et visualisation des résultats

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure VI-1	Données pour les arêtes d'entrée (hydrogramme de crue)	81
Figure VI-2	Données pour les arêtes d'entrée (côte d'eau)	81
Figure VI-3	Définition des conditions initiales par le programme Fudaa-Prepro	82
Figure VI-4	Représentation des ouvrages par le programme Fudaa-Prepro	83
Figure VI-5	Fenêtre d'exécution	84
Figure VI-6	Etendue de la crue à $t = 3000$ s	85
Figure VI-7	Etendue de la crue à $t = 5000$ s	85
Figure VI-8	Etendue de la crue à $t = 12672$ s	86
Figure VI-9	Directions des vitesses à $t = 12672$ s	87
Figure VI-10	Etendue de la crue à $t = 32400$ s	87

**Chapitre VII :** Aménagement de l'oued Belghanem

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure VII-1	Diagramme d'énergie spécifique	96
Figure VII-2	Canal trapézoïdal à ciel ouvert	97
Figure VII-3	Etendue de la crue après l'aménagement	99
Figure VII-4	Seuil en béton profilé	100
Figure VII-5	Seuil vertical sans bassin avec fosse d'érosion	101
Figure VII-6	Emplacement des seuils dans le cours d'eau	101

## Liste des tableaux

### Chapitre II : Synthèse hydrologique du bassin versant

Tableau	Titre	Page
Tableau II-1	Surfaces partielles du bassin versant de Belghanem par tranche d'altitude	21
Tableau II-2	Classifications O.R.S.T.O.M. pour des bassins versants selon leur indice de pente globale	22
Tableau II-3	Caractéristiques du bassin versant de l'oued Belghanem	25
Tableau II-4	Caractéristique de la station pluviométrique de Ghardaïa	26
Tableau II-5	Caractéristique de la série pluviométrique	26
Tableau II-6	Pluies journalières maximales pour les différentes périodes de retour	30
Tableau II-7	Débits obtenus par la méthode de Turraza pour les différentes périodes de retour	31
Tableau II-8	Débits obtenus par la méthode de Sokolovsky pour différentes périodes de retour	32
Tableau II-9	Débits obtenus par la méthode rationnelle pour les différentes périodes de retour	32
Tableau II-10	Résultats données par la méthode de Sokolovsky	35

### Chapitre III : Diagnostic théorique des cours d'eau

Tableau	Titre	Page
Tableau III-1	Circonstances observée aidant au diagnostic des causes de dégradation des berges	51

### Chapitre V : Construction du maillage de calcul

Tableau	Titre	Page
Tableau V-1	Valeurs des différents facteurs de la formule de Cowan	76

### Chapitre VII : Aménagement de l'oued Belghanem

Tableau	Titre	Page
Tableau VII-1	Valeur de $\gamma$ en fonction de la nature des parois	93
Tableau VII-2	Coefficient de Strickler en fonction de la nature des parois	95
Tableau VII-3	Caractéristiques du canal choisi	99

## Liste des photos

### Chapitre IV : Diagnostic de l'oued Belghanem

<b>Photo</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Photo IV-1	Présence des déchets solides et obstacles dans le lit de l'oued	57
Photo IV-2	Constructions anarchiques dans le lit du cours d'eau	57
Photo IV-3	Existence du réseau d'assainissement dans le lit du cours d'eau	57
Photo IV-4	Forte élargissement du lit	58
Photo IV-5	Rétrécissement brusque du lit	58
Photo IV-6	Cours d'eau pollué par des déchets et ordures	60
Photo IV-7	Végétation spontanée en amont du pont exutoire	60
Photo IV-8	Mur de protection en pierre	61
Photo IV-9	Glissement au niveau de la rive droite	61
Photo IV-10	Bétonnage d'une partie du lit d'oued	62
Photo IV-11	Pont de Hamraia	62
Photo IV-12	Buse pleine du déchet et sachets en plastiques	63
Photo IV-13	côté aval du pont exutoire	63

### Chapitre V : Construction du maillage de calcul

<b>Photo</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Photo V-1	Appareil de mesures avec Carnet numérique d'enregistrement	68
Photo V-2	Prisme	69

## Liste des Notations

<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>Définition</b>
$A_{BV}$	( $\text{km}^2$ )	Surface du bassin versant
$A_i$	( $\text{km}^2$ )	Surface partielle comprise entre deux courbes de niveau
$B$	(m)	Largeur supérieure du canal
$b$	(m)	Largeur inférieure du canal
$C$	( $\text{m}^{0.5}/\text{s}$ )	Coefficient de Chézy
$C_r$	-	Coefficient de ruissellement du bassin versant
$C_s$	-	Coefficient de sinuosité
$C_v$	-	Coefficient de variation
$E$	(m)	Energie spécifique
$f$	-	Coefficient de forme de la crue
$f$	(m)	Affouillement sous le niveau aval d'un seuil
$F_r$	-	Nombre de Froude
$g$	( $\text{m}/\text{s}^2$ )	Accélération de la pesanteur
$H_i$	(m)	Altitude moyenne entre deux courbes de niveau
$H_{\text{moy}}$	(m)	L'Altitude moyenne du bassin versant
$H_{\text{max}}$	(m)	Altitude maximale du bassin versant
$H_{\text{min}}$	(m)	Altitude minimale du bassin versant
$H_{5\%}$	(m)	Altitudes correspondantes à 5% de la surface totale
$H_{95\%}$	(m)	Altitudes correspondantes à 95% de la surface totale
$h_m$	(m)	Hauteur normal
$h_c$	(m)	Hauteur critique
$I$	(m/m)	Pente du fond de canal
$I_c$	(m/m)	Pente critique
$I_m$	(m/km)	Pente moyenne du cours d'eau principal
$I_g$	(m/km)	Indice de pente globale
$J$	(m/m)	Pente de la surface libre

$K_c$	-	Indice de compacité de Gravelius
$K_s$	( $m^{1/3}/s$ )	Coefficient de Strickler
$L_{re}$	(km)	Longueur du rectangle équivalent
$l_{re}$	(km)	Largeur du rectangle équivalent
$L_{tr}$	(m)	Longueur d'un tronçon du cours d'eau
$L_v$	(m)	Longueur d'un tronçon du cours d'eau suivant en vol d'oiseau
$m$	-	Fruit des talus
$n$	-	Coefficient de Manning
$P_{BV}$	(km)	Périmètre du bassin versant
$P_{jmax}$	(mm)	Pluies journalières maximales
$P_m$	(m)	Périmètre mouillé
$Q_F$	( $m^3/s$ )	Débit de pointe d'une fréquence « F »
$Q_x$	( $m^2/s$ )	Débit unitaire selon l'axe ox
$Q_y$	( $m^2/s$ )	Débit unitaire selon l'axe oy
$R_h$	(m)	Rayon hydraulique
$S_m$	( $m^2$ )	Section mouillée
$T$	(ans)	Périodes de retour
$t$	(heur)	Durée de l'averse
$t_c$	(heur)	Temps de concentration
$t_d$	(heur)	Temps de décrue de la crue
$t_m$	(heur)	Temps de montée de la crue
$V_{moy}$	(m/s)	Vitesse moyenne
$Z_i$	-	Variable réduit de Gauss
$\mu_n$	(mm)	Moyenne de la série de la taille N
$\sigma_n^2$	(mm)	Variance de la série de la taille N
$\gamma$	-	Coefficient du Bazin



## **Liste des acronymes**

AEP	Alimentation en eau potable
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
GPS	Global positioning system
Irstea	Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
MTU	Projection de Mercator transverse universelle.
ONM	Office Nationale de la Météorologie
ORSTOM	Office de la recherche scientifique et technique outre-mer
POS	Plan d'occupation des sols
SIG	Système d'information géographique

## Introduction générale

Depuis l'antiquité, l'homme cherche à développer des techniques d'utilisation de l'eau et de protection contre les inondations qui font partie des catastrophes naturelles les plus dangereuses dans le monde en général et dans l'Algérie en particulier, qui est l'un des pays confrontés aux phénomènes des crues et d'inondations qui se manifestent de façon catastrophiques constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social.

Ces dernières années, les régions du sud algérien connaissent plusieurs inondations générées par des crues éphémères de leurs oueds. Ces inondations ont causé des pertes humaines et matérielles considérables.

Les principales causes des inondations sont les perturbations climatiques et environnementales d'une part, ainsi que l'absence d'aménagements hydrauliques adéquats et d'une urbanisation anarchique, ce qui implique une occupation des terres inondées et même les rives des oueds, suite de la croissance démographique rapide, comme c'était le cas dans l'oued de Belghanem objet de notre étude qui fait partie de la vallée du M'Zab. Ce dernier a connu une urbanisation accrue, en effet, cette urbanisation de l'oued a rendu l'occurrence de crues un vrai danger pour la population y résident.

Notre travail a débuté par une visite sur terrain, afin de collecter le maximum d'informations concernant l'hydrologie du bassin versant, le POS de la zone d'étude et enfin, nous avons effectué un relevé topographique dans l'oued Belghanem qui est un élément indispensable pour notre étude, afin de compléter les données manquantes.

Ce mémoire de fin d'étude a pour objectif : l'aménagement d'oued Belghanem afin de protéger les zones riveraines de l'oued contre les inondations et crues dévastatrices.

Pour bien mener cette étude, nous allons axer ce travail sur sept (07) chapitres essentiels :

- Dans le premier chapitre, nous donnons une présentation générale de la zone d'étude ainsi que une généralité sur les inondations pour mieux comprendre le phénomène.
- Le deuxième chapitre présente la synthèse hydrologique du bassin versant d'oued Belghanem afin de déterminer le débit de projet, ainsi que les caractéristiques morphologiques de ce dernier.
- Une théorie sur le diagnostic des cours d'eau est présentée dans le troisième chapitre.

- Dans le quatrième chapitre, nous exposons les différents problèmes et dysfonctionnements rencontrés lors de notre sortie sur terrain accompagné d'une illustration photographique afin de décrire l'état actuel de l'oued.
- Dans le cinquième chapitre nous présentons le code de calcul RUBAR20 mis à notre disposition par les chercheurs de l'Irstea, puis nous construisons le modèle de calcul basé sur un maillage du domaine d'étude.
- Dans le sixième chapitre, nous exposons les différentes étapes pour lancer la simulation de la crue centennale dans l'oued Belghanem, ainsi que nous visualisons les résultats obtenus après le calcul.
- Dans ce dernier chapitre, nous terminons par une présentation des variantes d'aménagement pour la réhabilitation de l'oued avec une vérification par RUBAR20 en tenant compte des nouvelles variantes afin d'avoir une bonne évacuation des débits lors des périodes de crue sans causer des dommages ou des dégâts que ça soit matériels ou bien humains.

Enfin, nous terminerons par une conclusion globale.

## Chapitre I

# PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

## Introduction

Notre étude portera sur l'oued de Belghanem, qui est l'un des affluents de l'oued M'Zab. Ce dernier est le principal oued de la ville du M'Zab autour duquel la ville principale de la pentapole est Ghardaïa (ou Taghardait suivant le langage utilisé par les fondateurs de cette ville).

### I. Aperçu historique

La ville de Tihert fut ruinée au début de X<sup>ème</sup> siècle par l'avènement des fatimides. Les Ibadites se réfugièrent alors dans la région d'Ouargla, et s'installèrent exactement dans la ville de Sedrata.

Des divisions internes aggravées par les harcèlements des tribus nomades, rendirent ce refuge vulnérable, et cette nouvelle puissance Ibadite sera à son tour détruite à la fin du XI siècle (en 1075). Mais bien avant la ruine de Sedrata, ses habitants s'étaient mis à la recherche d'un nouveau site mieux protégé et à l'écarte des zones de mouvements des tribus nomades.

C'est pourquoi la majorité des Ibadites s'est installée autour de la Chebka du M'Zab, dans un lieu qui semble-t-il, où vivaient déjà quelque tribus amazighes Zénètes.

Deux siècles avant la disparition de Sedrata d'Ouargla. Les Ibadites créent le premier Ksar dans la Chebka qui est El Atteuf en aval de l'oued M'Zab, puis suivant la logique des installations humaines, ils fondèrent les autres Ksars de Bounoura, Melika, Ben Izguen et Ghardaïa.

Après la période coloniale, la ville a connu une croissance démographique très intense, suivi d'un développement économique et industrielle rapide, ce qui a incité une urbanisation très forte et non-maitrisée, sur le compte de la palmeraie qui couvrait presque la totalité de la vallée du M'Zab [*Taleb Bahmed, 2013*].

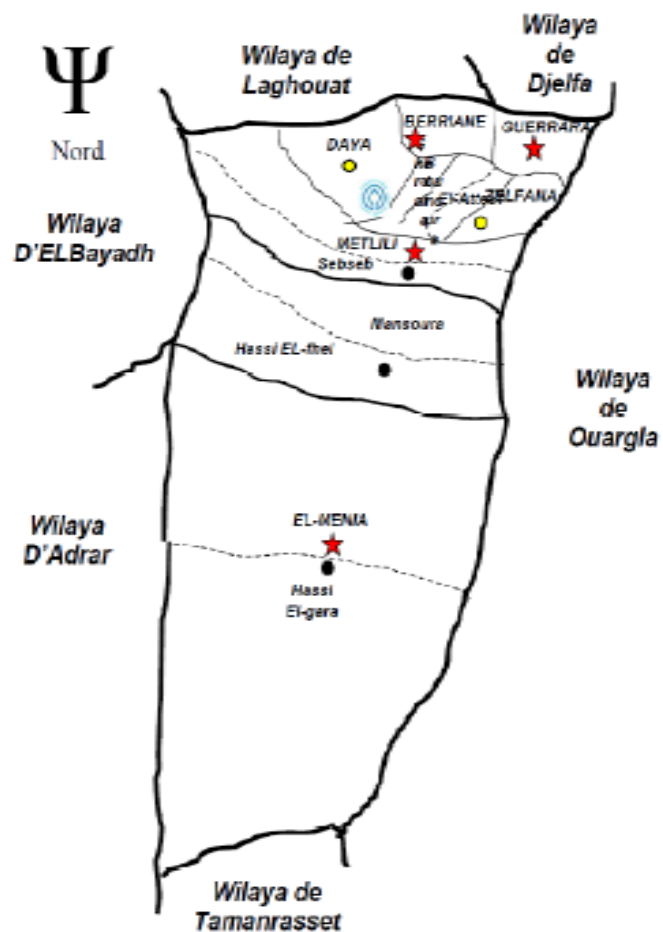
## II. Description de la wilaya de Ghardaïa

### II.1. Situation géographique

La Wilaya de Ghardaïa se situe au centre de la partie Nord du Sahara. Elle se trouve exactement sur la porte du Sahara Algérien à 600 km au sud d'Alger. Elle est issue du découpage administratif du territoire de 1984. L'ensemble de la nouvelle Wilaya (1984) dépendait de l'ancienne Wilaya de Laghouat. La Wilaya de Ghardaïa couvre une superficie de 86560 km<sup>2</sup>.

La Wilaya est limitée administrativement comme le montre la figure (I-1)

- ✓ Au Nord par la Wilaya de Laghouat ;
- ✓ Au Nord Est par la Wilaya de Djelfa ;
- ✓ A l'Est par la Wilaya d'Ouargla ;
- ✓ Au Sud par la Wilaya de Tamanrasset ;
- ✓ Au Sud- Ouest par la Wilaya d'Adrar ;
- ✓ A l'Ouest par la Wilaya d'El-Bayadh.



**Figure I-1:** limites administratives de la wilaya de Ghardaïa [Nacer, 2011]

Elle est caractérisée par des plaines dans le Continental Terminal, des régions ensablées, la Chebka et l'ensemble de la région centrale et s'étend du Nord au Sud sur environ 450 km et d'Est en Ouest sur environ 200 km.

## **II.2. Caractéristiques de la région**

Les Escarpements rocheux et les oasis déterminent le paysage dans lequel sont localisées les villes de la pentapole du M'Zab et autour duquel gravitent d'autres oasis (Berriane, Guerrara, Zelfana, Metlili et beaucoup plus éloignée au Sud El-Ménéa).

L'appartenance au milieu saharien et aride contrait fortement l'occupation de l'espace. L'implantation des villes s'est faite par rapport aux grands axes de circulation et aux oasis et leur développement a été étroitement lié aux conditions naturelles (eau, climat, relief ...).

Le couvert végétal est pauvre, la structure et la nature du sol ne sont pas favorables à l'existence d'une flore naturelle riche. La verdure est plutôt créée par l'homme. Cependant la région n'est pas dépourvue de végétation naturelle; elle est rencontrée dans les lits d'oueds.

C'est une région très active où le secteur tertiaire est prépondérant avec le commerce, le tourisme et l'artisanat ainsi que l'agriculture et l'industrie [*ANRH Ouargla, 2003*].

## **II.3. Oueds de Ghardaïa**

Nous englobons sous cette dénomination les quatre grands oueds qui traversent la région (figure I-2), à savoir : l'oued de Zegrir, l'oued de Nsa, avec ses deux affluents l'oued Ballouh et l'oued de Soudan, l'oued de M'Zab, avec ses affluents et l'oued de Metlili.

L'ensemble de ces oueds constitue le bassin versant de la dorsale du M'Zab. Ils drainent en grande partie les eaux de la dorsale de l'Ouest vers l'Est, leur écoulement est sporadique, il se manifeste à la suite des averses orageuses que connaît la région.

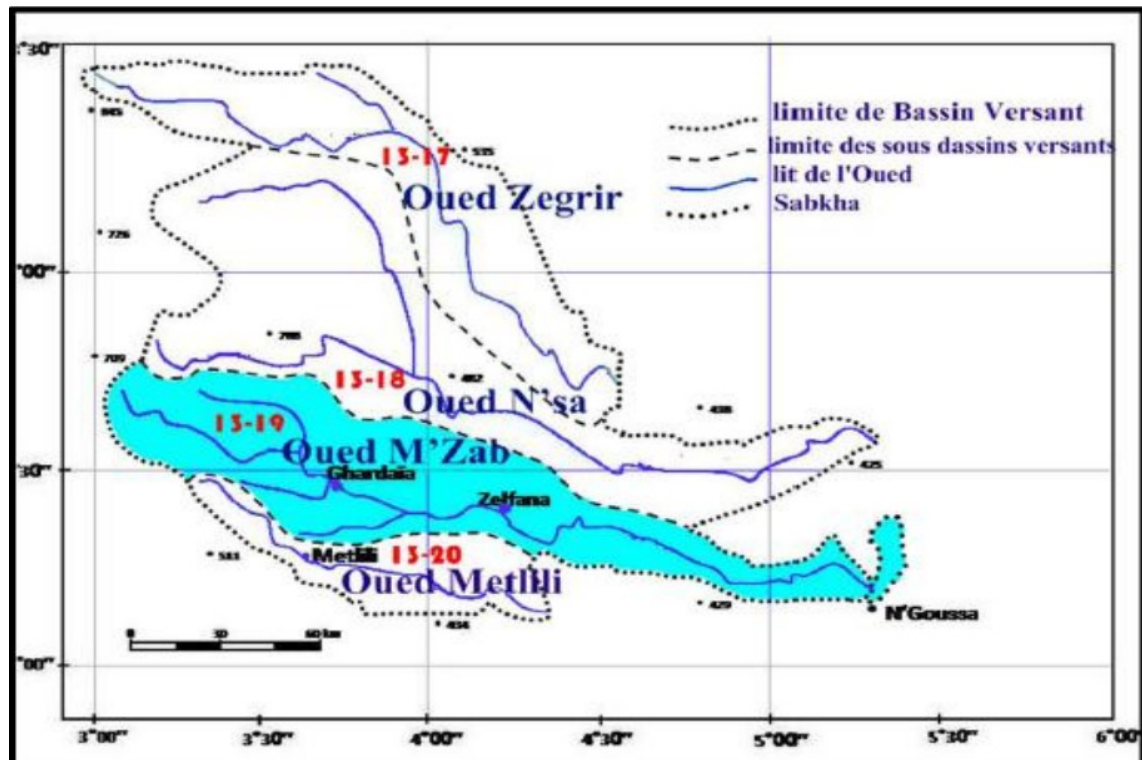


Figure I-2 : bassin versant des Oueds de la région [ANRH Ouargla, 2003]

#### II.4. Ressources en eau

Les ressources hydrauliques de la Wilaya sont essentiellement souterraines. Les ressources en eaux de surface sont rares, elles proviennent généralement des crues importantes qui sont générées à la suite des averses orageuses sur la région de Laghouat-Ghardaïa.

L'exploitation de l'eau dans la vallée du M'Zab s'était opéré par le creusement progressif de quelques milliers de puits traditionnels atteignant la nappe phréatique et par un système ingénieux qui assure la retenue la canalisation et le partage des eaux de crues. Actuellement, l'alimentation en eau s'effectue par des forages, d'une profondeur variant de 350 à 500 mètres, puisant l'eau fossile de la nappe albienne (continentale intercalaire), dont les réserves sont estimée à 1500 milliards de m<sup>3</sup>.

#### II.5. Climatologie

Le climat de la wilaya est de type saharien, Il se distingue par de grandes amplitudes entre les températures du jour et de nuit, d'été et d'hiver. Il se caractérise par des étés aux chaleurs torrides et des hivers doux, surtout pendant la journée.

**a) Température**

L'analyse d'une série d'observations statistiques enregistrée au niveau de la Wilaya de Ghardaïa, sur une période d'observations de 10 ans, a fait ressortir que la température moyenne mensuelle enregistrée, est de 22,40 °C.

**b) Précipitations**

Les précipitations ont pratiquement toujours lieu sous forme de pluies. Ces dernières sont caractérisées par leur faible importance quantitative et les pluies torrentielles sont rares. Elles sont liées aux perturbations soudano-sahariennes ou sahariennes.

Cette insuffisance de pluies sahariennes est accompagnée d'une irrégularité très marquée du régime pluviométrique et d'une variabilité inter-annuelle considérable, ce qui accentue la sécheresse. C'est le cas de Ghardaïa.

Selon des données statistiques, sur une période d'observation de 10 ans, on a constaté que la pluviométrie était très faible. La moyenne annuelle est de 74,95 mm et le nombre de jours de pluie ne dépasse pas onze (11) jours entre les mois de janvier et mars.

**c) Humidité**

Des données de la station météorologique de Ghardaïa montrent qu'il y a une période de sécheresse de mois de juin au mois de juillet et il y a une période humide qui est en automne et en hiver.

**d) Evapotranspiration**

La quantité d'eau évaporée dans la région de Ghardaïa est influencée par le degré de température, les vents et les précipitations, elle augmente quand ceux-ci augmentent et vice versa.

**e) Vents**

Les vents dominants d'été sont forts et chauds tandis que ceux d'hiver sont froids et humides. Les vents de sable sont très fréquents dans la région d'El-Ménéa surtout pendant le printemps, les mois d'avril, mai et juin.

Pour ce qui est du Sirocco dans la zone de Ghardaïa, on note une moyenne annuelle de 11 jours/an pendant la période qui s'étend du mois de mai à septembre.



### III. Présentation et localisation de la zone d'étude

La zone de Belghanem se situe au Nord-Ouest de la ville de Ghardaïa elle est limitée :

- ✓ Au nord par : La rue d'Imam Abdelwahab ;
- ✓ Au sud par : La rue de GHARRAFA Brahim ;
- ✓ A l'Est par : La rue de GHARRAFA Brahim ;
- ✓ A l'Ouest par : Boulevard Lycée technique RAMDANE Hammoud, Quartier Bendjebline et le périmètre de 240 logements Elkorti [*POS Belghanem*].

L'oued Belghanem est l'un des grands affluents d'oued M'Zab dont il s'étend sur une longueur de 12 km. Notre zone d'étude est un tronçon d'environ 3 km qui commence au niveau du lycée Imam Afleh et qui se termine au pont exutoire là où il rencontre l'oued M'Zab (figure I-4). Il rejoint ce dernier en amont de la palmeraie de Ghardaïa comme le montre la figure (I-3).

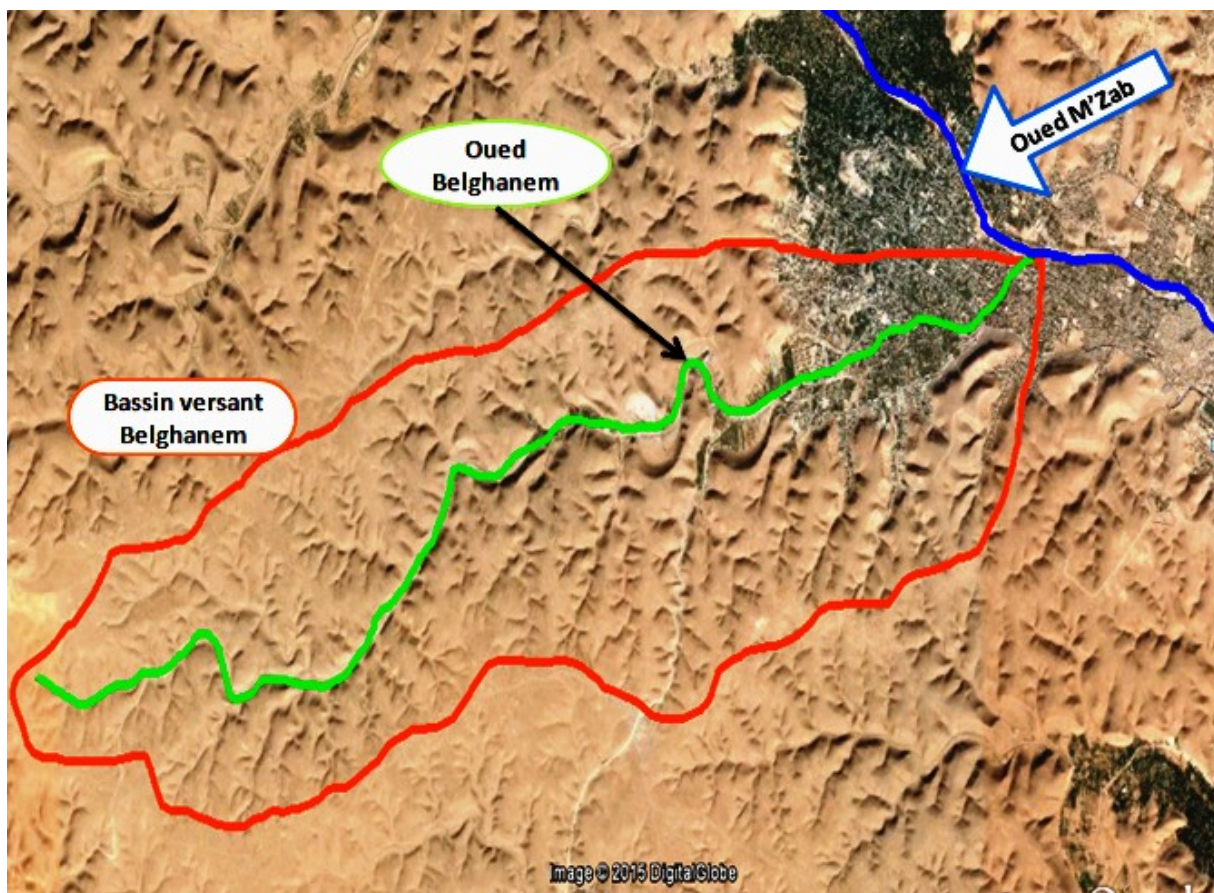


Figure I-3 : délimitation du bassin versant [*Google Earth 2015*]



Figure I-4 : localisation de la zone d'étude [Google Earth 2015]

### III.1. Problématique de la région

Oued du Belghanem est traversé par une zone urbaine très dense. Cette dernière cause la disparition graduelle de la palmeraie créant une urbanisation anarchique et non maîtrisable et à chaque période pluviale une grande partie à l'exutoire de cet oued reste inondable.

L'absence du réseau pluvial dans la région n'assure pas une bonne évacuation des eaux de ruissellement de manière à empêcher la submersion des zones urbanisées et d'éviter toute stagnation après les averses.

## IV. Généralités sur les inondations

Les inondations sont le résultat de la conjonction de phénomènes naturels spatio-temporels que sont l'intensité et durée des précipitations, le relief et la nature des sols. Ces phénomènes deviennent une problématique et un risque majeur pour les vies humaines, les équipements et les activités économiques.

### IV.1. Les inondations

✚ Etymologie : Le mot inondation vient du latin : «inundatio» qui signifie submersion.

✚ Définition : Une inondation est un débordement d'un cours d'eau, le plus souvent en crue, qui submerge les terrains voisins. C'est-à-dire une augmentation du débit du cours d'eau lorsque ce débit ne peut plus transiter dans le lit mineur, lieu des écoulements ordinaire (débit d'étiage). Ce terme est souvent étendu aux débordements d'ouvrages artificiels tels que retenues ou réseaux d'assainissement, parfois associés à une remontée de la nappe phréatique [Djebali, 2014].

### IV.2. Les crues

Une crue se définit par différentes critères : sa genèse, sa durée, sa fréquence, son débit de pointe et son volume. Elle se caractérise par son hydrogramme graphique qui représente les variations de débit en un point en fonction du temps [Djebali, 2014].

### IV.3. Processus de formation des crues

Comprendre le processus de formation des crues revient à analyser les différents facteurs concourant à la formation et à l'augmentation temporaire des débits d'un cours d'eau. Principalement, on distingue :

- L'eau mobilisable : constituée de l'eau reçue par le bassin versant ;
- Le ruissellement : qui correspond à la part de l'eau qui n'a pu s'infiltrer dans le sol. Le processus dépend de la nature du sol, de son occupation de surface et de l'intensité de l'épisode pluvieux ;
- Le temps de concentration : qui est défini par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau partant du point le plus éloigné du l'exutoire du bassin versant parvienne jusqu'à celui-ci ;
- La propagation de l'onde de crue : qui est fonction de la structure du lit et de la vallée alluviale, notamment de la pente et des caractéristiques du champ d'inondation.

#### IV.4. Mécanisme des inondations

On définit les types de facteur influençant sur les inondations :

##### Facteurs physiques qui influencent les inondations :

- ✓ Le régime des pluies ;
- ✓ Le relief ;
- ✓ La taille du bassin versant ;
- ✓ L'état des sols.

##### Facteurs aggravants du risque d'inondation :

- ✓ L'usage et l'occupation des sols ;
- ✓ L'aménagement du territoire ;
- ✓ Le manque d'entretien des cours d'eau ;
- ✓ L'imperméabilisation des terres par l'urbanisation ou bien le bétonnage.

#### IV.5. Causes des inondations

Elles peuvent avoir de nombreuses causes cumulables :

- **Causes naturelles** : liée aux aléas climatiques et phénomènes météorologiques attendus.
- **Causes humaines directes** : établissements d'écluses de barrages permettant certes la navigation et le transport fluvial, mais diminuant la pente naturelle du cours d'eau, absence de gestion et de coordination des barrages à l'approche des crues.
- **Causes humaines indirectes** : liée aux modifications climatiques globales (émissions de gaz à effet de serre qui entraîne la fonte des glaciers et qui provoque une montée du niveau des océans, des cours d'eau ou encore cela pourrait entraîner des cyclones plus intenses.

#### IV.6. Type des inondations et ses conséquences

On distingue plusieurs types d'inondations par les fleuves et les rivières :

##### **a) Les inondations des plaines**

Elles se traduisent par le débordement d'un cours d'eau sorti de son lit habituel (lit mineur), regagnant son lit majeur. Il peut parfois être procédé des nappes phréatiques et d'inondation de caves. Ceci peut engendrer divers conséquences :

- Une montée des eaux généralement longue ;
- Une durée de submersion pouvant atteindre quelques semaines ;
- Des dommages principalement dus à la durée de submersion et aux hauteurs d'eau.

Les dommages que provoque ce type d'inondation sont imputables aux hauteurs et durées de submersion (figure I-5).

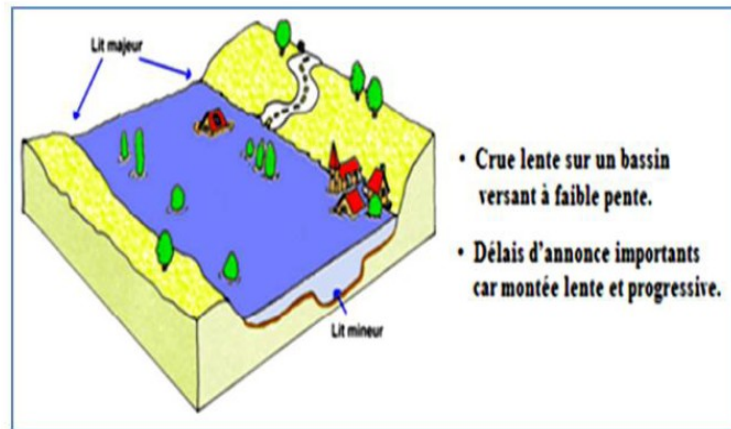


Figure I-5 : inondations de plaine [Djebali, 2014]

### b) Le ruissellement pluvial

Il se manifeste par ruissellement des eaux de pluie en zone urbaine fortement imperméabilisée du ruissellement érosif de plateau en zone rurale, ce phénomène conduit aux conséquences suivantes :

- Une accumulation des eaux dans les points bas pouvant stagner pendant quelques jours ;
- Un ruissellement pluvial pouvant réactiver de petits cours d'eaux temporaires ;
- Des dommages dus à la violence du courant, à la durée de submersion et à une forte érosion (figure I-6).



Figure I-6 : inondations par ruissellement pluvial [Djebali, 2014]

### c) Les crues torrentielles

Sont des phénomènes brusques et violents résultant d'épisodes pluvieux intenses et localisés, du type orages convectifs (figure I-7). Elles résultent de l'accélération de débit d'un torrent suite à de forte précipitation et peuvent amener aux conséquences suivant :

- Des éléments solides charriés par les eaux ;
- Une montée des eaux rapide (débit et vitesse importants) ;
- Des durées de submersion courte.

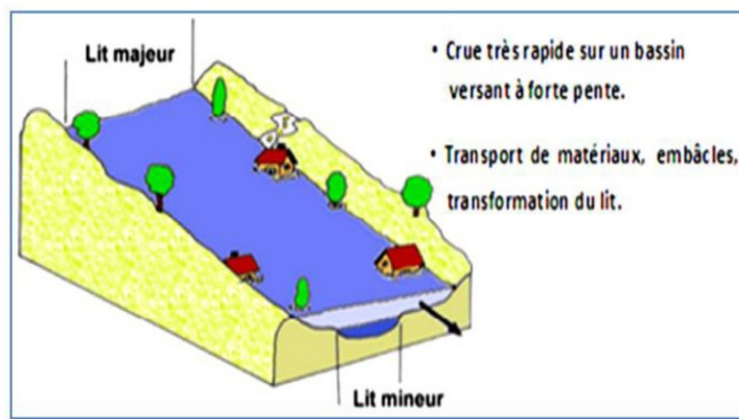


Figure I-7 : inondations par crues torrentielles [Djebali, 2014]

### d) La remontée de la nappe

Ce phénomène correspond à une inondation par débordement indirect. Il se manifeste par la remontée de la nappe phréatique qui affleure en surface et/ou d'une intrusion d'eau dans les différents réseaux d'assainissement. La crue de la rivière empêche l'évacuation des eaux et crée des flaques isolées qui peuvent subsister quelques semaines. La figure ci-dessous présente ce phénomène :

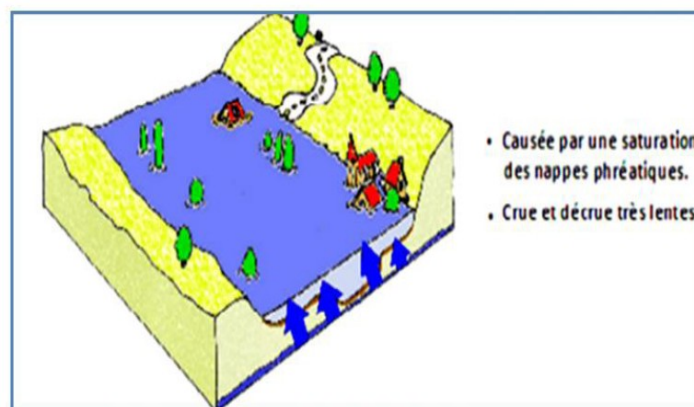


Figure I-8 : inondations par remontée de la nappe phréatique [Djebali, 2014]

### e) *Inondation par rupture d'une protection*

L'inondation consécutive à une rupture de digue est un phénomène très brutal et d'autant plus dommageable que le site étudié est proche de la digue. Une rupture peut provoquer l'entrée d'un mur d'eau de plusieurs mètres de haut. Il est très difficile de prévoir la rupture d'un ouvrage de protection, ce qui rend la prévention de ce type d'accident particulièrement incertaine comme le montre la figure (I-9).

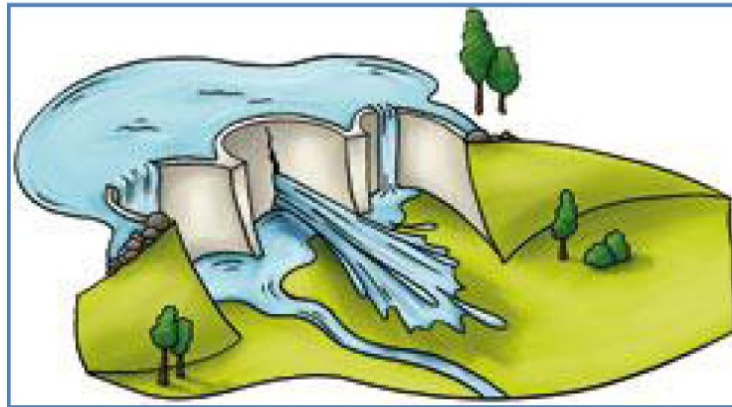


Figure I-9 : inondations par rupture d'une protection [Djebali, 2014]

## IV.7. Crues dans la palmeraie de Ghardaïa

Les palmeraies de Ghardaïa en générale ont été fréquemment inondées d'une manière irrégulière et exceptionnelle dont les écoulements sont d'importance variable. Ces inondations peuvent se produire à toutes les saisons surtout en automne avec une fréquence très importantes.

Des crues ont été signalées dans la région de Ghardaïa qui sont quelques fois très importantes, mais leurs apports et leurs fréquences restent encore inconnues à cause d'inexistence des mesures hydrométriques dans toute la région.

## IV.8. Influence des crues pour la palmeraie

### a) *Les avantages :*

- Elles alimentent et rechargent la nappe phréatique en eau directement ou bien par le biais des puits réalisés à cet effet ;
- Elles améliorent et équilibrent la fertilité des sols pour les jardins et terrains agricoles d'une façon naturel et régulier ;
- Elles lessivent les terres agricoles et empêchent la formation d'un éventuel écran nuisible à la qualité du sol.

**b) Les inconvénients :**

Nous allons citer dans ce qui suit quelques exemples sur les crues qui sont très destructives et dévastatrices qui ont touchées la région dans ce dernier siècle :

- Crue de 1901 : elle a endommagée plus de 40 jardins, elle a été évaluée à 900 m<sup>3</sup>/s [ANRH, 1993].
- Crue de 1914 : elle est catastrophique et fatale [ANRH, 1993].
- Crue de juin 2004 : selon le témoignage de quelques habitants de la région ont confirmé que cette crue a occasionnée des dégâts surtout au niveau de l'oued Belghanem.
- Crue exceptionnelle du 01 Octobre 2008 : a été provoquée par une importante averse. L'écoulement a débordé des berges, inondant ainsi tout ce qui est avoisinant comme constructions, jardins, les roues et autres. La crue a été évaluée à 1200 m<sup>3</sup>/s [ANRH, 2008].

**Conclusion**

Malgré le climat saharien de la région de Ghardaïa, les crues lorsqu'elles apparaissent sont d'une manière irrégulière, exceptionnelle et catastrophique.

Nous remarquons à travers cette présentation, que la zone à étudier de l'oued Belghanem est traversée par une zone urbaine très dense sur une distance de 3 Km environ.

Suite à cette présentation, nous allons faire une synthèse hydrologique du bassin versant au prochain chapitre.



## Chapitre II

# SYNTHESE HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

## Introduction

Le bassin versant, unité géographique sur laquelle se fonde l'analyse hydrologique, peut être considéré comme étant un " système hydrologique clos" à l'intérieur duquel aucun écoulement extérieur n'intervient et où tous les apports pluvieux s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire.

Le bassin versant ainsi défini correspond à la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau principal et ses affluents à l'amont de cette section. Il est matérialisé par son exutoire à partir duquel est tracé le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite. Celle-ci correspond généralement à la ligne de crête et caractérise alors le bassin versant topographique [Liamas, 2006].

## I. Caractéristiques morphologiques du bassin versant

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

- A surface topographique,
- Le réseau hydrographique.

Pour quantifier ces paramètres, les documents cartographiques et moyens de mesures suivants ont été utilisés :

- Carte topographique de Ghardaïa de l'année 1960 à l'échelle de 1/200000.
- Logiciel MapInfo version 8.5.

### I.1. Présentation du logiciel MapInfo

Le logiciel MapInfo est un SIG (Système d'Information Géographique) Bureau-tique doté d'une interface graphique conviviale de type « pointer-cliquer », qui permet de charger facilement des données localisées et tabulaires (littérales) et de les afficher sous forme de cartes, de tables ou de diagrammes. MapInfo fournit les outils nécessaires pour interroger et analyser ces données et présenter les résultats sur des documents cartographiques de qualité.

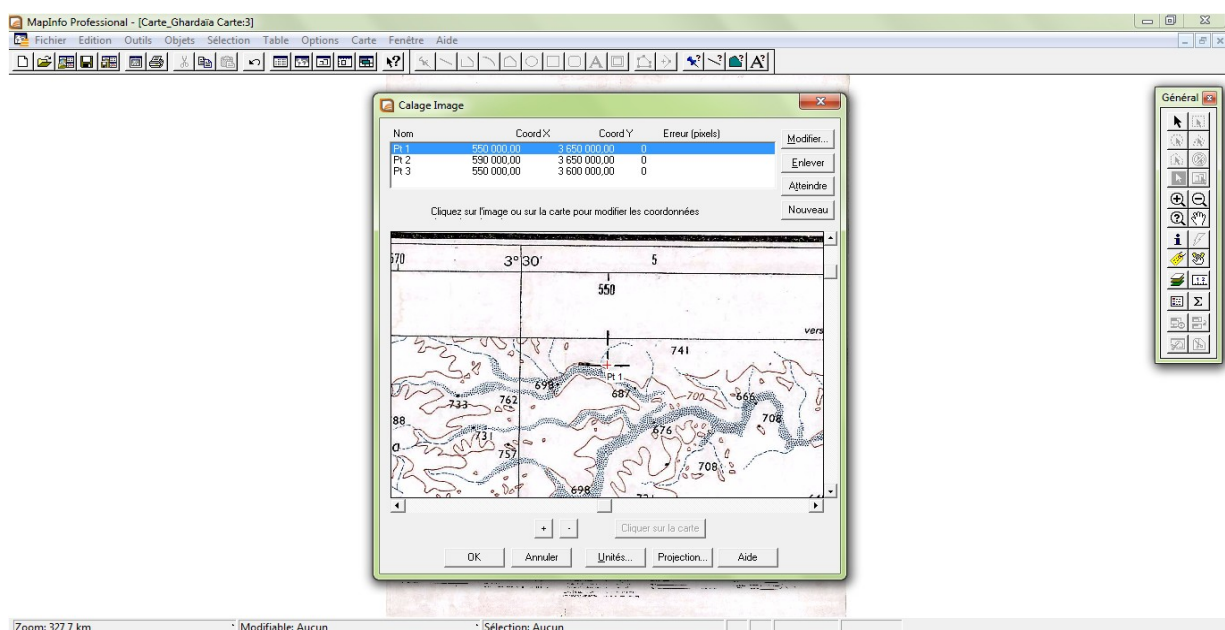
**a) Principales fonctions de MapInfo :**

- Richesse fonctionnelles et convivialité d'un SIG bureautique :
  - Cartographie thématique ;
  - Création et modification de données ;
  - Analyse spatiale ;
  - Géocodage par adresse.
  
- Accès aux bases de données externes (Access, Excel...).

MapInfo est bien plus qu'un logiciel de cartographie, il offre des outils performants d'analyse spatiale, de géocodage par adresse, de visualisation des résultats, de création et d'édition de données géographiques et tabulaires, de cartographie thématique et de mise en page. Les menus déroulants, les boutons et les outils de l'interface graphique utilisateur de MapInfo permettent de travailler rapidement et efficacement [Nacer, 2011].

**b) Importation et Calage de la carte topographique à l'échelle 1/200000**

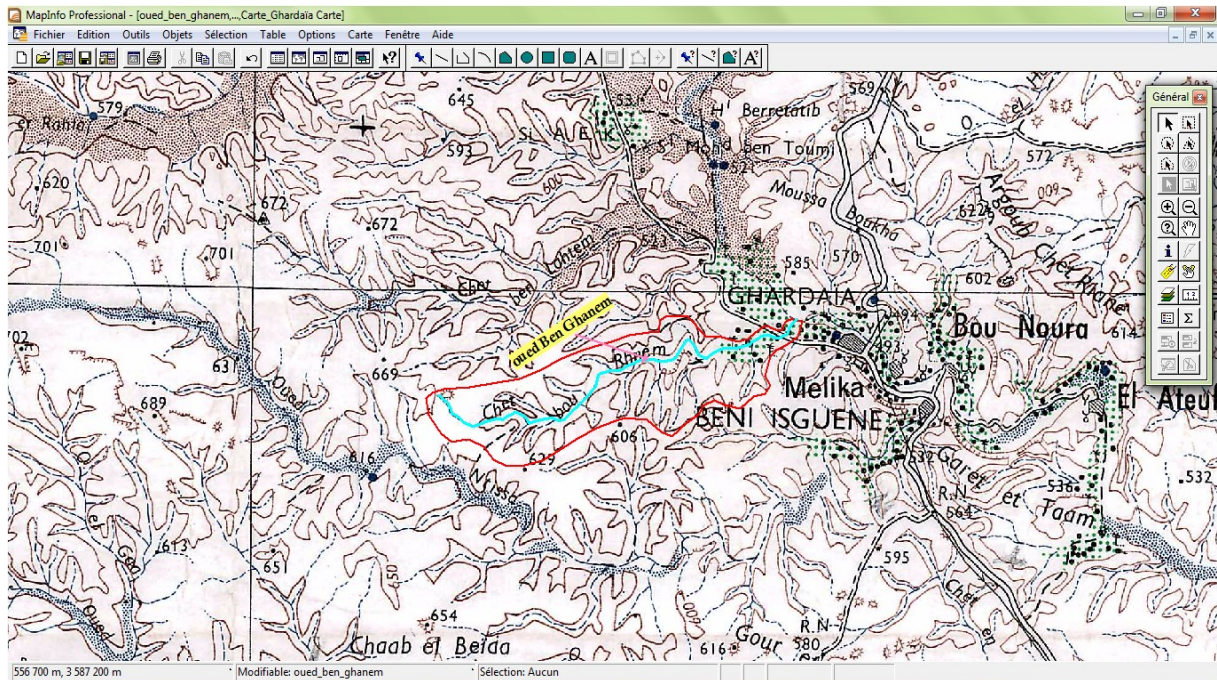
- Importation de la carte topographique à l'aide de l'outil (Import), placé sur l'interface du logiciel;
- Le choix de système de projection c'est le système qu'est indiqué sur la carte topographique (MTU fuseau N°31)
- Le calage est effectué au minimum par trois (3) points, pour que l'erreur soit négligeable, l'illustration est donnée par la figure (II-1).



**Figure II-1 : fenêtre de calage sur MapInfo**

### c) Délimitation du bassin versant de Belghanem

Le bassin versant ainsi défini correspond à la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau principal et ses affluents à l'amont de cette section. Il est matérialisé par son exutoire à partir duquel est tracé le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite (figure II-2). Celle-ci correspond généralement à la ligne de crête et caractérise alors le bassin versant topographique.



**Figure II-2** : délimitation du bassin versant d'oued Belghanem sur la carte topographique à l'échelle 1/200000

## I.2. Caractéristiques de forme

### a) Surface et Périmètre

La surface est le paramètre le plus important du bassin versant parce qu'il permet de contrôler l'intensité de plusieurs phénomènes hydrologiques tels que le débit, le volume de précipitations ou d'infiltration ...etc. La superficie est déterminée à partir d'une carte topographique [Touaïbia, 2004].

Le périmètre correspond à la longueur de la limite extérieure du bassin versant [Touaïbia, 2004]. À l'aide du logiciel MapInfo, nous avons trouvé une surface :  $A_{BV} = 21.98 \text{ km}^2$ , et un périmètre :  $P_{BV} = 25.16 \text{ km}$ , comme le montre la figure (II-3).

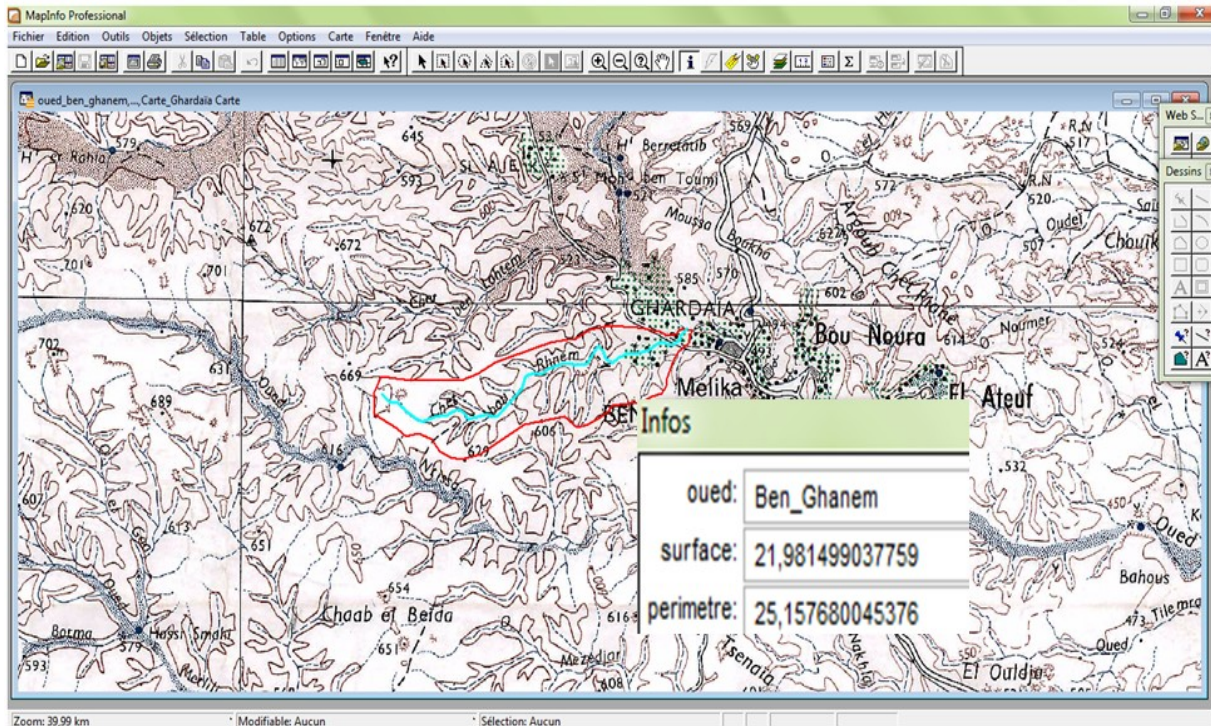


Figure II-3 : calcul de la superficie et du périmètre du bassin de Belghanem

### b) Indice de compacité de Gravelius $K_c$

Ce coefficient est le rapport entre le périmètre de bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin [Touaïbia, 2004].

$$K_c = \frac{P_{BV}}{2\pi R} \quad \text{avec : } A_{BV} = \pi R^2 \quad (\text{II-1})$$

$$K_c = \frac{P_{BV}}{2\pi \sqrt{\frac{A_{BV}}{\pi}}} = 0.28 \frac{P_{BV}}{\sqrt{A_{BV}}} \quad (\text{II-2})$$

On trouve :  $K_c = 1.50$

La valeur de  $K_c$  obtenue est supérieure à 1.12, et dans ce cas nous pouvons constater que notre bassin versant a une forme allongée.

### c) Rectangle équivalent

Il s'agit d'une transformation purement géométrique en vertu de laquelle on assimile le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même surface, de cette façon les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petites côtes du rectangle et l'exutoire est l'un de ces petits cotés [Touaïbia, 2004].

$$L_{re}, l_{re} = \frac{K_C \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right] \quad (\text{II-3})$$

### I.3. Relief

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

Le relief se détermine au moyen de caractéristiques suivantes :

#### a) Courbe hypsométrique

Elle est d'une grande importance dans l'étude du relief d'un bassin versant. Cette courbe exprime le pourcentage de la superficie du bassin au-delà d'une certaine élévation [Touaïbia, 2004].

A l'aide de logiciel « MapInfo » nous avons numérisé les courbes de niveau à l'intérieur du bassin versant, ensuite nous avons calculé la surface comprise entre deux courbes de niveau consécutives comme le montre la figure suivante :

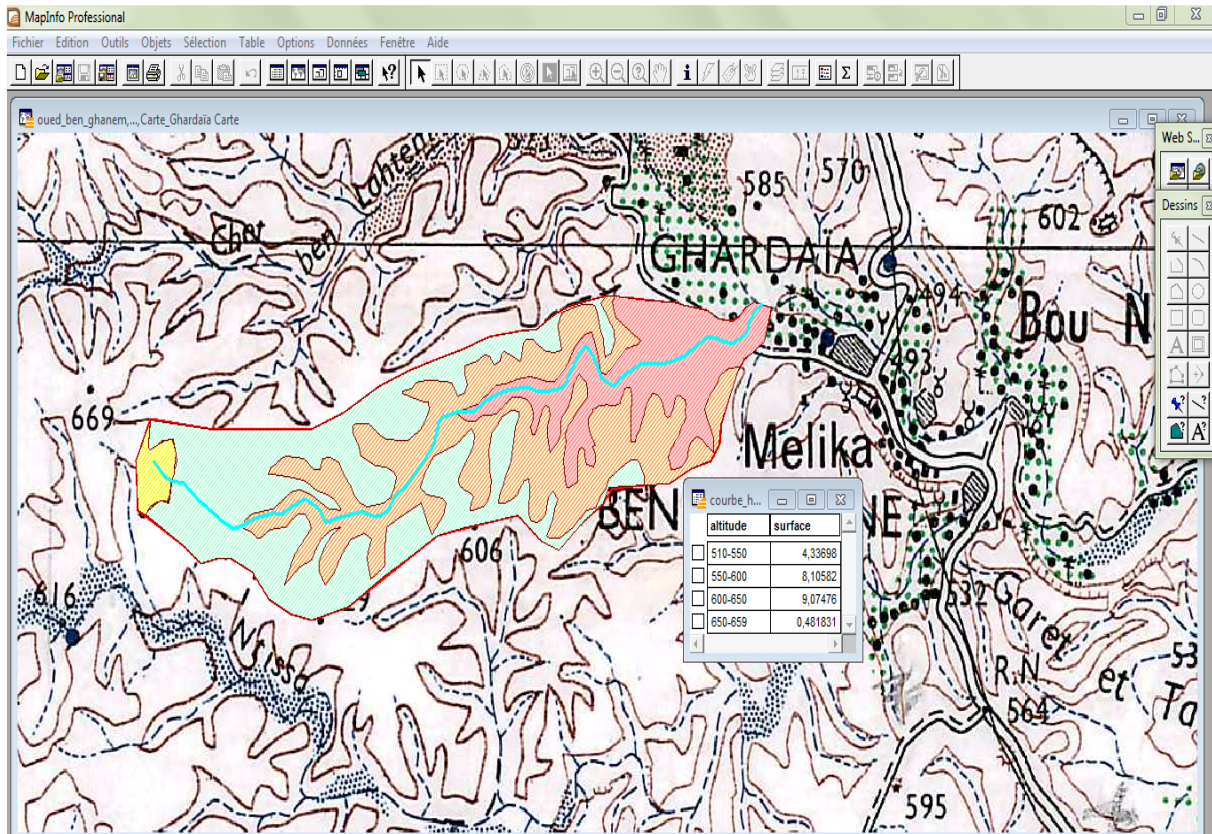


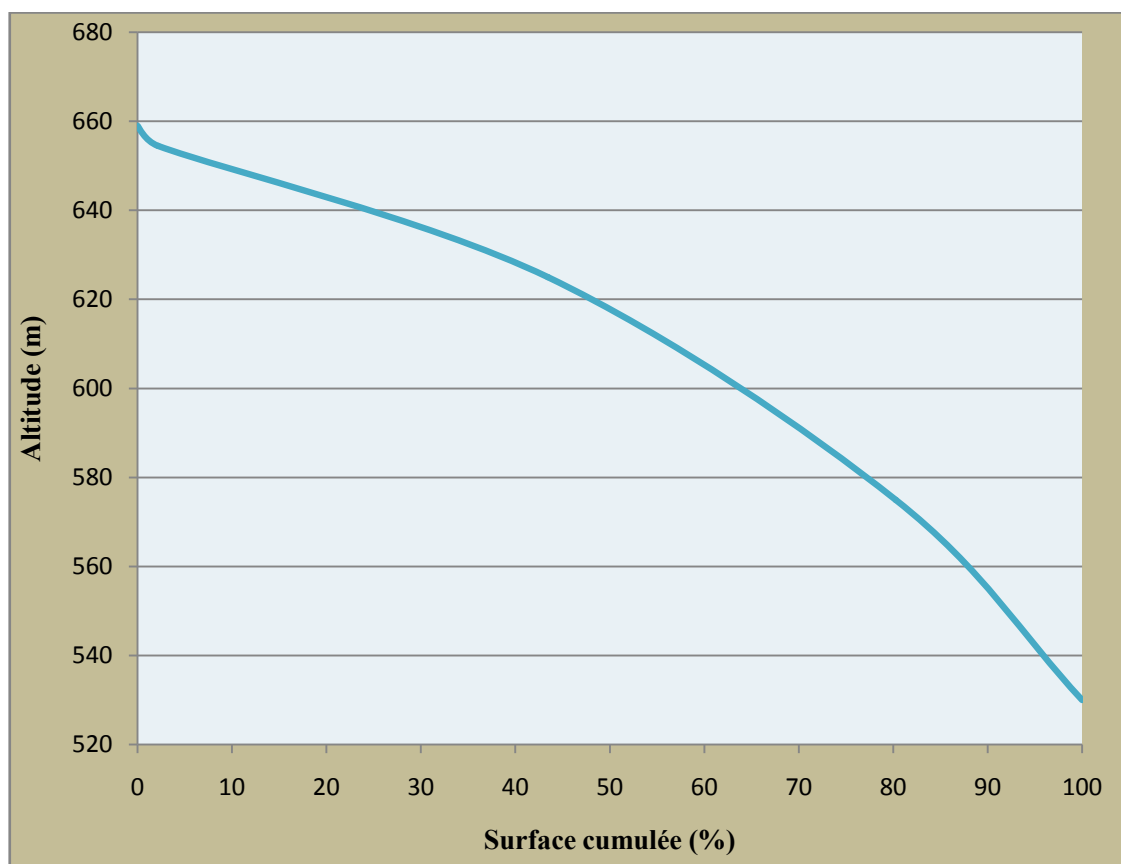
Figure II-4 : surfaces délimitées par deux courbes de niveau

Les différentes surfaces partielles sont données dans le tableau suivant :

**Tableau II-1** : surfaces partielles du bassin versant de Belghanem par tranche d'altitude

Couleur de la surface	Altitude (m)	Surface partielle (km <sup>2</sup> )	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)
	659-650	00.48	02.18	02.18
	650-600	09.07	41.26	43.44
	600-550	08.10	36.85	80.30
	550-510	04.33	19.70	100.00

La courbe hypsométrique est présentée dans la figure ci-dessous :



**Figure II-5** : courbe hypsométrique du bassin versant d'oued Belghanem

**b) L'altitude moyenne  $H_{moy}$** 

Elle est donnée par la formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i H_i}{A_{BV}} \quad (\text{II-4})$$

Avec,  $H_i$  : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives n-1 et n (en m) ;  $A_i$  : Surface partielle comprise entre deux courbes de niveau consécutives n-1 et n (en km<sup>2</sup>) et  $A_{BV}$  : Surface totale du bassin versant (en km<sup>2</sup>) [Touaïbia, 2004].

**c) 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 de longueur de rectangle équivalent [Touaïbia, 2004]. Il est donné par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \quad (\text{II-5})$$

Avec, D : dénivelée entre  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  (m) ; L : longueur de rectangle équivalent (Km) et  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  sont respectivement les altitudes correspondantes à  $A_{5\%}$  et  $A_{95\%}$ .

Afin de pouvoir classer le relief du bassin versant étudié, nous nous basons sur le tableau ci-dessous :

**Tableau II-2** : classifications ORSTOM pour des bassins versants selon leur indice de pente globale

<b>R<sub>1</sub></b>	<b>Relief très faible</b>	<b><math>I_g &lt; 0.002</math></b>
<b>R<sub>2</sub></b>	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
<b>R<sub>3</sub></b>	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.010$
<b>R<sub>4</sub></b>	Relief modéré	$0.010 < I_g < 0.020$
<b>R<sub>5</sub></b>	Relief assez fort	$0.020 < I_g < 0.050$
<b>R<sub>6</sub></b>	Relief fort	$0.050 < I_g < 0.100$
<b>R<sub>7</sub></b>	Relief très fort	$0.100 < I_g$

Après le calcul de l'indice de pente globale du bassin d'oued Belghanem, on obtient un relief de classe R4.

#### I.4. Réseau de l'écoulement

##### a) Pente moyenne du cours d'eau principal

Elle exprime le rapport entre la dénivelée et la longueur comprise entre deux points suffisamment éloignés sur le cours d'eau principal [Touaïbia, 2004]. Elle est donnée par la formule (II-6) :

$$I_m = \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (\text{II-6})$$

Avec,  $\Delta H$  : dénivelée entre deux points suffisamment distants (m) ; et  $\Delta L$  : distance entre ces deux points (km).

##### b) Temps de concentration $t_c$

Il se définit comme la durée maximum nécessaire à une goutte d'eau la plus éloignée hydrologiquement pour arriver à l'exutoire de bassin.

Il existe plusieurs formules pour évaluer ce dernier. Dans le contexte algérien et pour les grands bassins, il peut être notamment calculé par l'ancienne formule de Giandotti (1937) soit :

$$t_c = \frac{4\sqrt{A_{BV}} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (\text{II-7})$$

Avec,  $t_c$  : temps de concentration (heure) ;  $A_{BV}$  : surface du bassin versant (m) ;  $L$  : longueur du cours d'eau principal (km) ;  $H_{moy}$  et  $H_{min}$  respectivement l'altitude moyenne et l'altitude minimale exprimées en (m) [Touaïbia, 2004].

##### c) Profil longitudinal du cours d'eau

Le Profil longitudinal ou en long est un graphique représentant les différentes élévations du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'embouchure [Liamas, 2006]. Ce profil est présenté dans la figure ci-dessous :



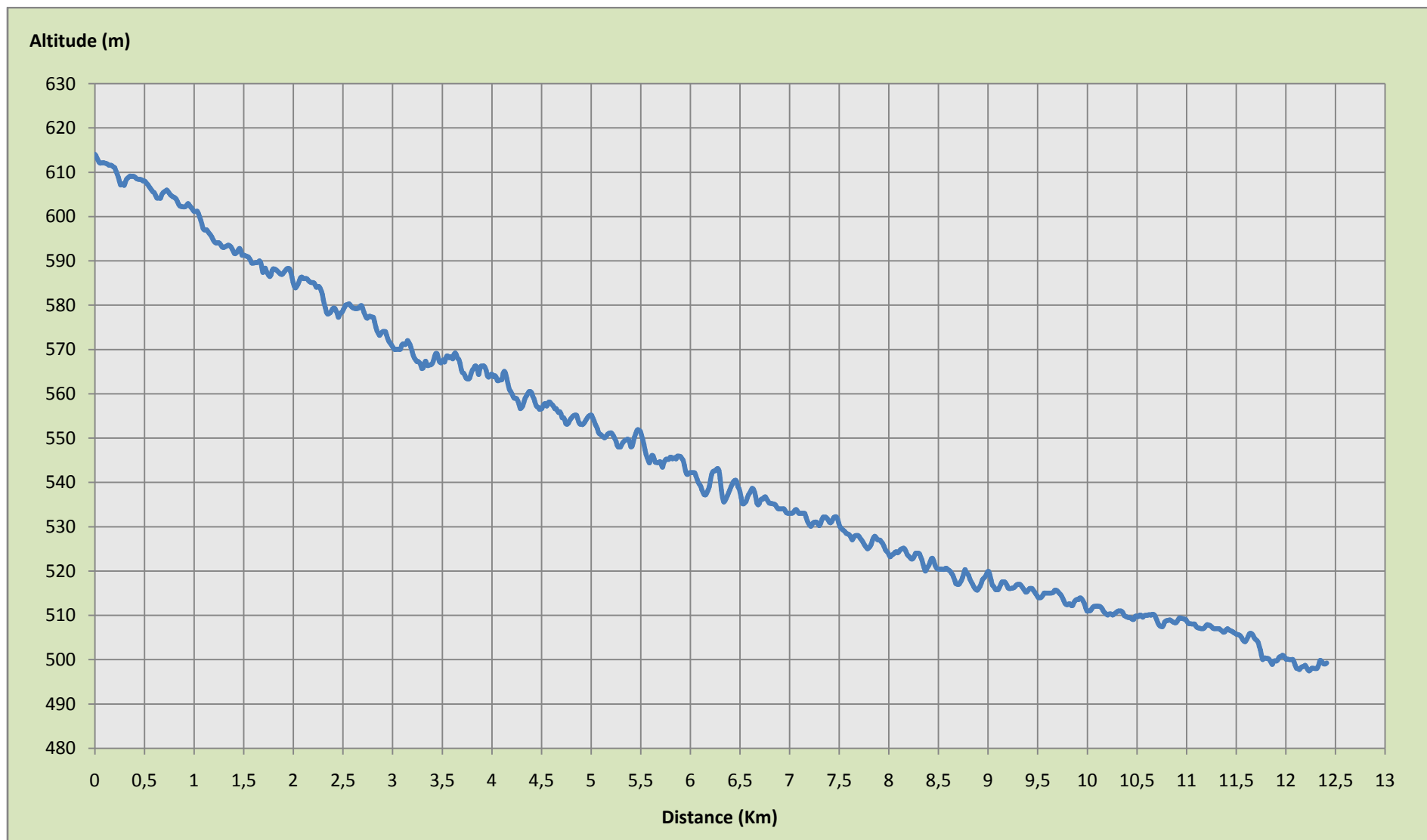


Figure II-6 : profil en long du cours d'eau principal d'oued Belghanem

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques du bassin versant d'oued Belghanem :

**Tableau II-3** : caractéristiques du bassin versant de l'oued Belghanem

Caractéristiques		Unité	Valeur
Surface		km <sup>2</sup>	21.98
Périmètre		km	25.16
Rectangle équivalent	Longueur	km	10.45
	Largeur	km	02.10
longueur de cours d'eau principal		km	12.41
Altitude	Altitude maximale	m	659.00
	Altitude moyenne	m	588.50
	Altitude minimale	m	510.00
	Altitude 5%	m	652.00
	Altitude 95%	m	542.00
Indice de compacité		/	01.50
Indice de pente globale		m/km	10.52
Pente moyenne du bassin versant		%	01.20
Temps de concentration		h	03.52

## II. Étude pluviométrique

Une étude pluviométrique est basée essentiellement sur des séries de mesure de la pluviométrie, qui fournit par les stations expérimentales installées dans les bassins versants.

La seule série mise à notre disposition est celle de la station de l'ONM, et qu'est une série acceptable (taille 34 ans) et représentative de la région d'étude (selon l'ONM de Ghardaïa).

Cette série représente les pluies journalières maximales entre 1975 et 2008 (annexe A-01), elle est homogène et indépendante d'après le test d'homogénéité et de l'indépendance.

Les deux tableaux suivants représentent respectivement les caractéristiques de la station de mesure et de la série d'étude.

**Tableau II-4** : caractéristique de la station pluviométrique de Ghardaïa

<b>Nom</b>		<b>Ghardaïa</b>
Organisme		Office nationale de la météorologie (ONM)
Coordonnées	Latitude	32°24 N
	Longitude	03°48 E
Altitude (m)		468
Période d'observation		1975
Nombre d'années observées		34
Observation		Station en fonctionnement

**Tableau II-5** : caractéristiques de la série pluviométrique

<b>Taille de la série</b>	34.00
<b>Moyenne</b>	19.30
<b>Ecart type</b>	12.60
<b>Coefficient de variation</b>	00.65

## II.1. Ajustement de la série pluviométrique

Il existe plusieurs lois d'ajustement des séries pluviométriques (loi Normale, loi Log normal, loi de Gumbel...), et le choix de la loi d'ajustement dépend de la nature des données et leur taille et il faut vérifier l'indépendance et l'homogénéité des données. Dans notre cas, la série est homogène et indépendant, les données sont les pluies journalières maximales et la taille de la série est de 34 valeurs, donc la méthode qui convient est la loi de Gumbel ou loi Log-normale.

### a) Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel

Cette loi a une fonction de répartition qui s'exprime selon la formule suivante :

$$F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (\text{II-8})$$

$$\text{Tel que : } x = \frac{1}{\alpha}y + X_0 \quad (\text{II-9})$$

Avec,  $y$  : variable réduite de Gumbel et  $\frac{1}{\alpha}$  la pente de la droite de Gumbel [Touaïbia, 2004].

Pour faire l'ajustement à une loi de Gumbel, on procède comme suit :

- On classe les valeurs des précipitations par l'ordre croissant.
- On calcule les fréquences expérimentales de chaque valeur en utilisant la formule de Hazen :

$$F(x) = \frac{r - 0.5}{n} \quad (\text{II-10})$$

Avec,  $r$  : le rang de pluie et  $n$  : nombre d'observation.

- On calcule le variable de Gumbel  $Y_i = -\ln(-\ln(F(x_i)))$  ;
- On représente graphiquement les couples  $(y_i ; x_i)$ , enfin
- On détermine les paramètres de la loi «  $a$  » et «  $x_0$  ».

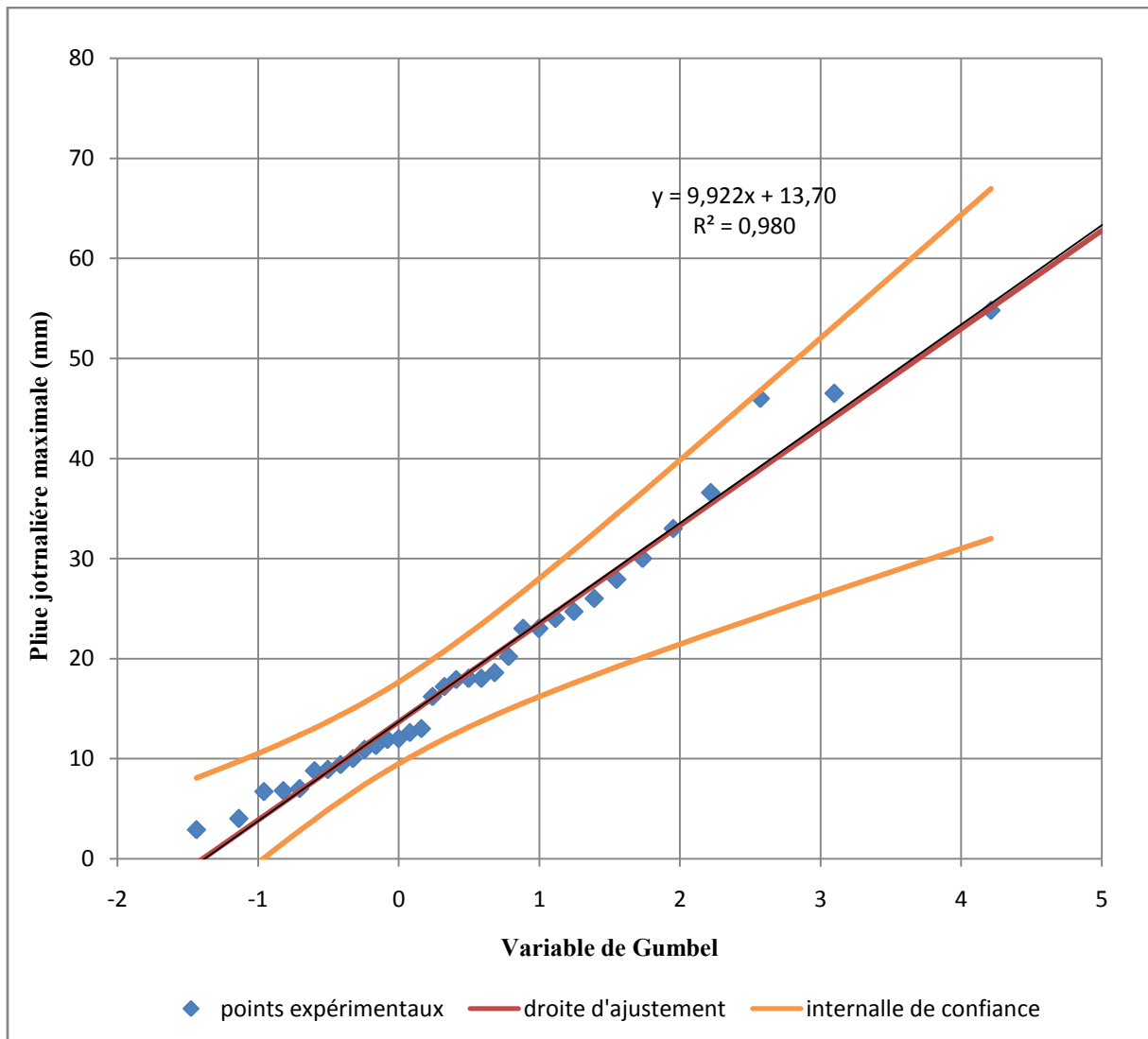


Figure II-7 : ajustement à la loi de Gumbel

**b) Ajustement de la série pluviométrique à la loi Log-normale**

Cette loi a une fonction de répartition qui s'exprime selon la formule suivante :

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_n\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_n}{\sigma_n}\right)^2}; \quad x > 0 \quad (\text{II-11})$$

$$\text{Tel que } \begin{cases} \mu_n = \frac{1}{N} \sum_1^N \ln x_i \\ \sigma_n^2 = \frac{1}{N} \sum_1^N (\ln x_i - \mu_n)^2 \end{cases} \quad (\text{II-12})$$

Avec,  $N$  : la taille de la série pluviométrique [Touaïbia, 2004].

Pour faire l'ajustement à une loi Log-normale, on procède comme suit :

- On classe les valeurs des précipitations par l'ordre croissant ;
- On calcule les fréquences expérimentales de chaque valeur en utilisant la formule de Hazen ;
- On calcule les caractéristiques de la série  $\mu_n$  et  $s_{LnP}$  ;
- On reporte les points expérimentaux sur un papier de probabilité logarithmique ;
- On trace la droite d'Henri qui a comme équation la formule suivante :

$$LnP_i = \overline{LnP} + z_i * s_{LnP} \quad (II-13)$$

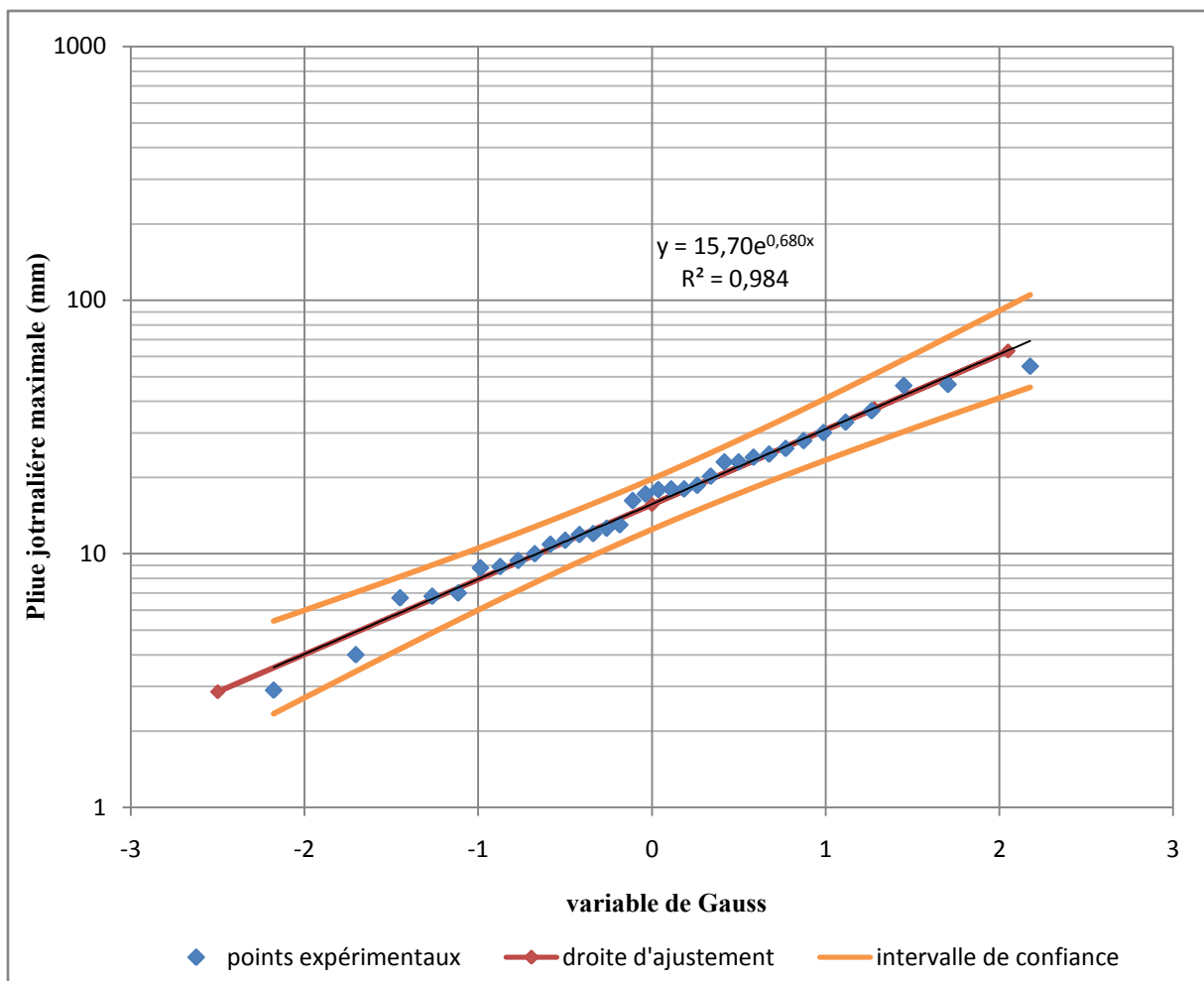


Figure II-8 : ajustement à la loi Log-normale

### c) *Interprétation des graphes*

La comparaison entre les deux graphes obtenus (figure II-7 et II-8) montre que les valeurs expérimentales s'alignent bien avec la droite d'Henri, de plus le coefficient de corrélation  $R^2$  égale à 98.40% (figure II-8). Donc la série pluviométrique s'ajuste bien à la loi Log-normale.

A partir du graphe d'ajustement à la loi Log-normale, on peut tirer les pluies journalières maximales pour les différentes périodes de retour.

**Tableau II-6** : pluies journalières maximales pour les différentes périodes de retour

<b>Période de retour (ans)</b>	<b>fréquence</b>	<b><math>P_{jmax}</math> (mm)</b>
<b>10</b>	0.900	37.5
<b>30</b>	0.967	54.6
<b>50</b>	0.980	63.4
<b>100</b>	0.990	76.4
<b>500</b>	0.998	111.1
<b>1000</b>	0.999	128.4

## III. Etude des crues

La prédétermination des débits des crues est une tâche très importante dans le cadre de protection des zones urbains contre les inondations ainsi pour la conception des aménagements des cours d'eau.

Le choix de la méthode de prédétermination des débits de crues dépend de la disponibilité des données, dans notre cas (oued Belghanem) il n'y a aucune mesure hydrométrique, et pour cela nous avons utilisé des formules empiriques pour la détermination des débits de crues.

### III.1. Formule de Turraza

Turraza a établi une formule, adoptée en Italie, qui est la suivante :

$$Q = \frac{C_r * H * A_{BV}}{3.6 t_c} \quad (II-24)$$

Avec,  $C_r$  : coefficient de ruissellement du bassin ;  $A_{BV}$  : superficie du bassin ( $km^2$ ) ;  $H$  : la hauteur totale maximale de pluie relevée en (mm) pendant une durée égale au temps de concentration  $t_c$  en (heure) du bassin versant.

Pour calculer la hauteur totale maximale de pluie relevée pendant une durée égale au temps de concentration  $t_c$  du bassin, on utilise la formule de Body :

$$H_{t,F} = P_{j \max F} \left( \frac{t}{24} \right)^b \quad (\text{II-15})$$

Où,  $t$  : durée de l'averse ;  $b$  : exposant climatique ( $b = 0.15$  donné par ANRH) [Touaïbia, 2004].

**Tableau II-7** : débits obtenus par la méthode de Turraza pour les différentes périodes de retour

Période de retour (ans)	10	30	50	100	500	1000
Q (m <sup>3</sup> /s)	61.79	89.97	104.47	125.89	183.07	211.58

### III.2. Méthode de Sokolovsky

Le débit est donné par la formule (II-16) :

$$Q_{max} = \frac{0.28 * P_{t_c,F} * \alpha * A}{t_c} * f \quad (\text{II-16})$$

Avec,  $Q_F$  : débit de pointe d'une fréquence « F » en m<sup>3</sup>/s ;  $f$  : Coefficient de forme de la crue ;  $P_{t_c,F}$  : pluie correspond au temps de concentration  $t_c$  et à la fréquence F en mm ;  $\alpha$  : Coefficient de ruissellement du bassin versant pour la crue considérée ;  $A_{BV}$  : surface du bassin versant en km<sup>2</sup> et 0.28 : coefficient de changement d'unité.

$$P_{t_c,F} = P_{j \max ,F} \left( \frac{t_c}{24} \right)^{0.15} \quad (\text{II-17})$$

Le coefficient de forme de la crue peut être calculé par la formule :

$$f = \frac{12}{4 + 3 * \gamma} \quad (\text{II-18})$$

Avec,  $\gamma$  : étant un coefficient qui est fonction de la taille du bassin versant et de la perméabilité du sol, et a pour valeurs :

$\gamma = 2$  pour les bassins versants dont la superficie est inférieure à 5 km<sup>2</sup> ;

$\gamma = 2$  à 3 pour les bassins versants non boisés ;

$\gamma = 3$  à 4 pour les grands bassins versants boisés et perméables [Touaïbia, 2004].



**Tableau II-8** : débits obtenus par la méthode de Sokolovsky pour différentes périodes de retour

Période de retour (ans)	10	30	50	100	500	1000
Q (m <sup>3</sup> /s)	49.73	72.41	84.08	101.33	147.35	170.29

### III.3. Méthode rationnelle

La méthode rationnelle est utilisée pour déterminer le débit de pointe d'un bassin versant pour une précipitation donnée. Elle est basée sur l'hypothèse qu'une pluie constante et uniforme sur l'ensemble d'un bassin versant produit un débit de pointe lorsque toutes les sections du bassin versant contribuent à l'écoulement, soit après un temps égal au temps de concentration.

Par simplification, la méthode rationnelle suppose aussi que la durée de la pluie est égale au temps de concentration. Elle ne tient pas compte de l'hétérogénéité de la pluviométrie et a tendance à surévaluer le débit de pointe.

$$Q_{max} = C * I * A_{BV} \quad (II-19)$$

Où, C : coefficient de ruissellement ( $0 < C < 1$ ) ; I : intensité d'une averse dont la durée est égal au temps de concentration du bassin versant et  $A_{BV}$  : superficie du bassin versant en km<sup>2</sup> [Goudjil & Kaci, 2009].

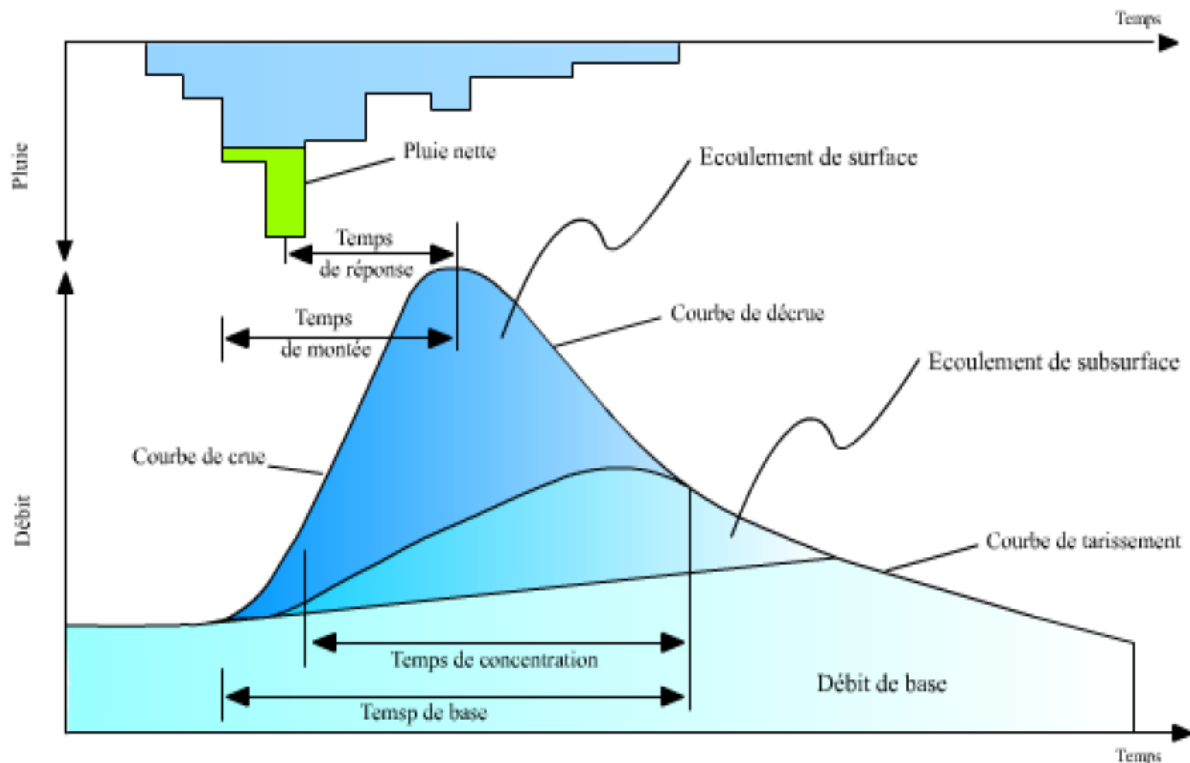
**Tableau II-9** : débits obtenus par la méthode rationnelle pour les différentes périodes de retour

Période de retour (ans)	10	30	50	100	500	1000
Q (m <sup>3</sup> /s)	46.33	67.46	78.33	94.40	137.27	158.64

### III.4. Construction de l'hydrogramme de crue par la méthode de Sokolovsky

#### a) Description de l'hydrogramme de crue

Les principales caractéristiques d'un hydrogramme de crue sont décrites dans la figure ci-dessous :



**Figure II-9** : caractéristiques d'un hydrogramme de crue

Nous pouvons distinguer à partir de ce hydrogramme :

- ✚ La courbe de concentration ou courbe de montée (correspondant au temps de montée) ;
- ✚ La pointe de l'hydrogramme ou débit de pointe ;
- ✚ La courbe de décrue (diminution du débit ruisselé) ;
- ✚ La courbe de tarissement (le ruissellement est terminé : l'écoulement souterrain et hypodermique alimente le réseau hydrographique) ;
- ✚ Le temps de montée (entre le début du ruissellement direct et la pointe de la crue) ;
- ✚ Le temps de réponse (entre le centre de gravité de la pluie dite «efficace», autrement dit la portion de la pluie qui se transforme totalement en écoulement et la pointe de l'hydrogramme) ;

- ✚ Le temps de base ou durée du ruissellement (entre le début de la pluie efficace et la fin du ruissellement) ;
- ✚ Le temps de concentration (entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct).

### **b) Présentation de la méthode de Sokolovsky**

La méthode de Sokolovsky nous permet de construire l'hydrogramme de crue à partir de débit de pointe. Elle considère que l'hydrogramme de crue présente deux branches de courbe, l'une pour la monter et l'autre pour la décrue [Touaïbia, 2004].

#### Débit de montée :

Il est calculé comme suit :

$$Q_t = Q_{max} * \left(\frac{t}{t_m}\right)^2 \quad (\text{II-20})$$

Où,  $t_m$  est le temps de montée de la crue, il est égal au temps de concentration  $t_c$  ( $t_m = t_c$ ) selon Sokolovsky.

#### Débit de la décrue :

Il est calculé comme suit :

$$Q_t = Q_{max} * \left(\frac{t_d - t}{t_d}\right)^3 \quad (\text{II-21})$$

Où,  $t_d$  est le temps de la décrue  $t_d = \gamma * t_m$  avec,  $\gamma$  coefficient qui dépend des caractéristiques du bassin versant, pour notre cas le bassin est non boisé, on prend donc  $\gamma = 3$ .

Par l'application de cette méthode, pour un temps de montée égale au temps de concentration  $t_m = t_c = 3.52$  heures, et avec un temps de décrue  $t_d = 10.56$  heures, nous obtenons les résultats suivants (tableau II-10) :

**Tableau II-10** : résultats données par la méthode de Sokolovsky

		Q (m <sup>3</sup> /s)					
		10	30	50	100	500	1000
t (s)	T(ans)						
0		0	0	0	0	0	0
3600		4.01	5.84	6.79	8.18	11.89	13.74
7200		16.05	23.38	27.14	32.71	47.57	54.97
10800		36.12	52.60	61.07	73.60	107.03	123.69
12672		49.73	72.41	84.08	101.33	147.35	170.29
14400		11.92	17.36	20.16	24.29	35.32	40.82
18000		7.26	10.57	12.27	14.79	21.51	24.86
21600		4.00	5.83	6.77	8.16	11.86	13.71
25200		1.91	2.77	3.22	3.88	5.65	6.52
28800		0.71	1.03	1.20	1.44	2.10	2.43
32400		0.16	0.23	0.27	0.33	0.48	0.55
36000		0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessus ne sont que des estimations plus au moins précises des débits fréquentiels. car sont obtenus à l'aide des formules qui ne sont applicables qu'aux bassins versant qui s'identifient aux descriptions citées.

Les hydrogrammes des crues obtenus pour les différentes périodes de retour à l'aide de la méthode de Sokolovsky sont présentés dans la figure suivante :

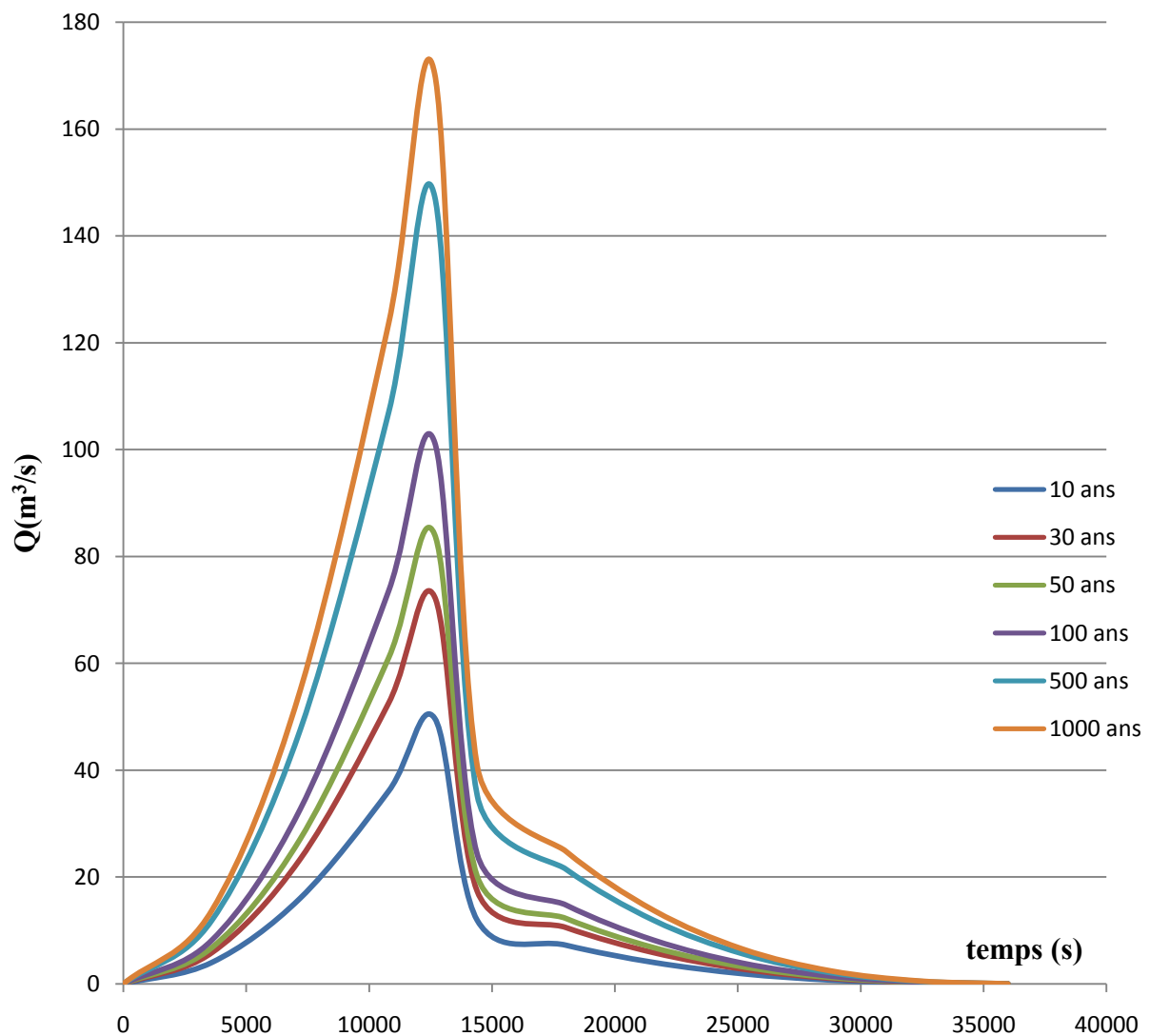


Figure II-10 : hydrogramme de crue d'oued Belghanem

## Conclusion

La synthèse hydrologique, nous permet de déterminer les différentes caractéristiques du bassin versant d'oued Belghanem, puis de tracer l'hydrogramme de crue par la méthode de Sokolovsky. Ce hydrogramme sera utilisé pour la simulation de la crue centennale par logiciel RUBAR20.

## Chapitre III

# DIAGNOSTIC THEORIQUE DES COURS D'EAU

## Introduction

Les cours d'eau sont des milieux complexes et uniques qui réunissent à la fois des intérêts de la nature (faune et flore), forestiers (cordon boisé), hydraulique (protection des berges, évacuation des eaux) et hydrologiques (étiages, crues et inondation).

L'état des cours d'eau évolue au gré de leur dynamique fluviale et végétale. Les activités humaines développées sur leurs berges peuvent également modifier cet état. L'entretien est donc souvent nécessaire pour maintenir les rivières dans un état de bon fonctionnement pour éviter l'inondation.

### I. Problèmes rencontrés dans un diagnostic

Un diagnostic montrera l'emboîtement des impacts au niveau du bassin versant, du lit majeur et du lit mineur. Des activités humaines sur le bassin versant, entraîne l'imperméabilisation, le déboisement et la suppression des talus, elles provoquent également des modifications fortes au niveau : paysage et hydrologie du bassin versant. Elles ont donc des répercussions importantes au niveau de la dynamique de la rivière.

Les dysfonctionnements et leurs causes seront identifiés et localisés dans l'espace, afin qu'une réflexion sur l'aménagement du territoire puisse être amorcée.

Les problèmes majeurs existants au niveau du lit mineur ou bien le lit majeur sont :

- Les berges : stabilité, encoches d'érosion, érosion régressive, glissement ;
- la ripisylve : (absence, pauvreté en diversité et nombre d'individus, mauvais état sanitaire, faible largeur, manque de continuité, rôles négatifs par rapport à la morphodynamique, rôles restreints par rapport à l'écosystème terrestre et aquatique...);
- Les embâcles : localisation, taille, rôles de la révolution morphodynamique du lit et des berges, rôles par rapport à l'écosystème aquatique ;
- Les habitats : localisation, type habitat et leur densité ;

- Les espèces végétales et les espèces animales : rareté ou prolifération [*Baza, 2014*].

## II. Démarche globale du diagnostic d'un cours d'eau

Pour réaliser un bon diagnostic, il faut suivre les démarches suivantes :

### II.1. L'observation

L'observation joue un rôle fondamental. Il conviendra de bien mettre en évidence les caractéristiques du lit et de son fonctionnement, aussi bien en crue qu'en période d'étiage. Il y a en effet, en général, de très fortes différences entre ces périodes en ce qui concerne l'importance du lit, la forme et le mouvement du profil en long et des berges, le positionnement des chenaux d'écoulement, les débits, les vitesses, le transport solide etc.

On s'attachera à bien mettre en évidence, de l'amont à l'aval, l'ensemble des caractéristiques géométriques et des facteurs du façonnement fluvial (formes du lit, nature des berges et du fond, types de végétation...). Ces recueils d'informations peuvent utilement donner lieu à des reports cartographiques et à des croquis. S'ils existent, des relevés antérieurs seront utilement comparés à ceux effectués dans la situation actuelle, pour mieux appréhender les phénomènes du façonnement fluvial en jeu et leur intensité, ainsi que les interventions qui ont déjà pu se produire dans le bassin [*Mokeddem, 2014*].

### II.2. Les mesures

Pour faire un diagnostic, il faut se déplacer le long de l'oued ou bien la zone d'étude choisie et il faudra prendre des mesures spécifiques sur le terrain, notamment en ce qui concerne la topographie, la bathymétrie, les hauteurs des traces d'eau ainsi que la nature du sol et des matériaux [*Mokeddem, 2014*].

### II.3. Les enquêtes

La recherche des informations sur les usages du cours d'eau, les interventions effectuées par le passé ou les traces d'événements hydrologiques marquants doit aussi s'appuyer sur des enquêtes, auprès des autorités comme des populations riveraines du cours d'eau. Elles seront riches d'enseignements et permettront la sensibilisation collective aux problèmes constatés et à la recherche de solutions. Ce sera, ultérieurement, un atout dans les négociations à mener, pour l'acceptation de l'aménagement envisagé comme pour l'éventuelle association des riverains à sa gestion ou à son entretien [*Mokeddem, 2014*].

### III. Matériel et document nécessaire

Il faut s'assurer le matériel et les documents suivants :

- Une carte des lieux, la photographie aérienne ou un plan ;
- Matériel et équipement :
  - Bottes de caoutchouc pour se protéger ;
  - Crayons et calepin pour prendre des notes et des remarques ;
  - Appareil photo ;
  - clinomètre pour mesurer la pente ;
  - Règle d'arpentage pour mesurer la hauteur d'eau, la hauteur des marques d'érosion et la hauteur des berges ;
  - Système de localisation GPS.

### IV. L'état des lieux

L'analyse de l'état initial doit pouvoir rendre compte de la complexité des phénomènes interactifs et doit apporter une vision critique sur le fonctionnement de l'écosystème en mettant l'accent sur d'éventuels dysfonctionnements dont on recherchera les causes. Les différentes informations à collecter sont les suivantes :

#### IV.1. Paramètres physiques

Les paramètres physiques à l'échelle du bassin versant sont :

- Caractéristiques générales : géologie, climatologie et topographie ;
- Hydrogéologie du bassin ;
- Hydrologie et hydraulique : comment fonctionne le cours d'eau en période de hautes eaux et en période d'étiage ?

Les paramètres physiques à l'échelle du lit majeur/berges/lit mineur sont :

- Lit mineur et morphe dynamique : hauteur d'eau à plein bord et en étiage, nature et granulométrie du substrat, zones de dépôt et d'érosion ;
- Berge : nature des matériaux, hauteur, pente, degré de cohésion, état, stabilité : secteurs éventuels d'érosion, rôles de la ripisylve par rapport à la stabilité des berges ;



- Présence d'embâcles : composition, état, fonctions écologiques, rôles vis-à-vis de la stabilité des berges et des risques d'inondation ;
- Zone naturelle/zone artificialisée : secteurs ayant éventuellement faits l'objet de travaux, ouvrages en long et en travers (pont, seuil, endiguement, etc.).

#### **IV.2. Paramètres biologiques**

##### **a) *Le compartiment aquatique***

- Qualité de l'eau ;
- Végétaux macrophytes : diversité, répartition, abondance et pourcentage de recouvrement.

##### **b) *La zone des berges***

- Ripisylve : comprend la végétation herbacée semi-aquatique, les arbres et arbustes : détermination des espèces, âge, état sanitaire, localisation sur berge, linéaire, densité et largeur occupée par la ripisylve sur chaque rive, continuité, ombrage et recouvrement du lit mineur, rôles et intérêts : fonctions écologiques, fonction paysagère, stabilité des berges ;
- Faune : reptiles, mammifères, oiseaux : identification des populations, diversité, richesse, localisation des habitats, connectivité au sein du bassin versant et avec d'autres secteurs.

#### **IV.3. Collecte des informations concernant l'aspect patrimonial**

Une mention spéciale doit être faite pour certains cours d'eau qui abritent des espèces végétales et animales bénéficiant d'un statut d'espèce rare et protégée, d'autres espèces n'ont pas ce statut, mais font partie d'un cortège patrimonial exceptionnel. Par ailleurs, certains arbres et certains paysages constituent, en eux-mêmes, un patrimoine exceptionnel qu'il est nécessaire de répertorier, pour pouvoir mettre en œuvre une démarche de sauvegarde.

#### **IV.4. Collecte des informations concernant les paramètres humains**

Les différentes informations à collecter sont :

- ✓ Occupation du sol : axes de communication provoquant des coupures transversales ;
- ✓ Quels sont les différents usages (prélèvements, industries, cultures, etc.) ;

- ✓ Quelles sont les incidences de ces usages au niveau du fonctionnement physique ?  
[Ledard et col, 2008].

## V. Résultats attendus

A l'issue de la phase terrain et de la consultation des différents services et des usagers, il est indispensable de :

- Faire un bilan en présentant toutes les connaissances acquises sous une forme synthèse par secteur ;
- Dresser un diagnostic sur l'état de santé de l'hydrosystème : est-ce que le cours d'eau fonctionne correctement? Quels sont les problèmes? Y a-t-il des déséquilibres? Si oui, quelles en sont les causes? Se situent-elles au niveau du bassin versant et/ou du lit majeur, du lit mineur?

Il est nécessaire de rédiger des documents synoptiques, le maître d'ouvrage doit pouvoir s'approprier les connaissances et se rendre compte qu'il est gestionnaire d'un bien précieux, mais fragile et parfois déjà bien dégradé [Ledard et col, 2008].

## VI. Difficultés du diagnostic

Les deux principales difficultés possibles susceptibles de rencontrer pendant le déroulement du diagnostic sont les suivantes :

- ✚ Manque d'implication des communes parce que les investigations spécifiques, longues et coûteuses (relevés topographiques...). Et de convaincre les communes de la réalité du risque.
- ✚ Insuffisance des données : Cette insuffisance est liée à une rétention d'information ou à une collaboration imparfaite du personnel.

## VII. Etude des cours d'eau

Pourquoi un cours d'eau naturel a-t-il adopté les dimensions que l'on voit, sa largeur, sa profondeur, sa pente, sa sinuosité, des berges dissymétriques, et un profil en long irrégulier ?

Avant d'aménager, il est important de réfléchir au pourquoi des formes.

L'objectif de cette partie est de donner et de rappeler quelques généralités et définitions sur les cours d'eau.

### VII.1. Définitions fondamentales

**Cours d'eau :** est un terme général désignant tous les chenaux superficiels ou souterrains, présentant un lit permanent et de caractère naturel à l'origine, et un débit suffisant, une majeure partie de l'année en fonction des données climatiques et hydrologiques locales (un canal ou un fossé artificiel n'est pas un cours d'eau).

**Lit mineur :** est l'espace occupé par l'écoulement pour les crues courantes. Le tracé du lit mineur peut se déplacer plus ou moins rapidement selon la dynamique du cours d'eau.

**Lit majeur :** est la plaine inondable. Il est limité par les hautes eaux et les limites précises du lit majeur ne sont pas faciles à délimiter.

**Berge :** est le talus incliné qui sépare le lit mineur et le reste du lit majeur.

**Rive :** La rive est le milieu géographique qui sépare les milieux aquatique et terrestre. Elle démarre au sommet de la berge et constitue une partie plate plus ou moins étendue qui reste sous l'influence du milieu aquatique (figure III.1), [Degoutte, 2006].

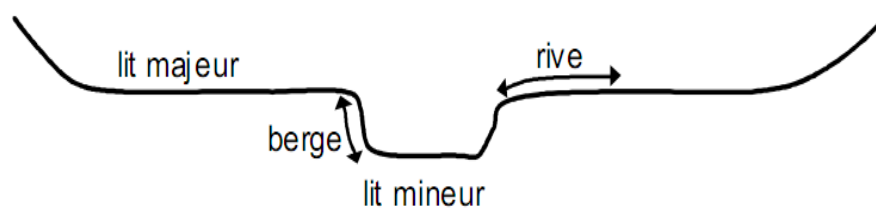


Figure III-1 : représentation de termes géographiques usuels [Degoutte, 2006]

**Ripisylve :** La ripisylve est la formation végétale naturelle située sur la rive. Elle peut être limitée à un cordon arboré étroit qui souligne le bord du lit mineur de la rivière ou bien elle est une véritable forêt alluviale s'étendant sur plusieurs dizaines ou centaines de mètres de part et d'autre du lit mineur. Cette forêt occupe tout ou partie du lit majeur.

La ripisylve joue plusieurs rôles importants :

- ✓ Sur la faune et la flore ;
- ✓ Sur le paysage ;
- ✓ Sur la température de l'eau ;
- ✓ Sur l'écoulement des crues ;
- ✓ Sur la tenue des berges.

Il faut comprendre les inconvénients qu'elles peuvent présenter, en particulier pour les riverains :

- ✓ Forte consommation d'espace pour une valeur économique assez faible ;
- ✓ Alimentation de la rivière en bois arrachés par les crues, susceptibles de créer des embâcles, d'obstruer les ponts et d'aggraver les crues localement ;
- ✓ Apport de matière organique dû à la décomposition des feuilles ;
- ✓ Consommation d'eau pouvant diminuer les débits d'étiage [*Degoutte, 2006*].

**Alluvions et substratum :** Une rivière coule généralement sur ses alluvions. Les alluvions sont les grains fins ou grossiers alternativement déposés ou repris par le courant. Les alluvions recouvrent le substratum rocheux formé d'une roche dure ou bien d'une roche plus ou moins tendre.

Le transport solide est le déplacement vers l'aval d'une partie des alluvions selon un processus de charriage ou de suspension. Si l'on considère l'ensemble du cours d'eau de sa source à la mer, il stocke à chaque instant un volume d'alluvions considérable comparé aux apports solides annuels [*Degoutte, 2006*].

## VII.2. Relations entre dimensions du cours d'eau et hydrologie

Nous allons expliquer dans ce qui est suit de la théorie du débit dominant ou débit morphogène. La seconde idée c'est la théorie des variables de contrôle et variables de réponse. Enfin la troisième idée consiste à parler de la théorie de l'équilibre dynamique.

### a) Débit dominant

Nous appellerons débit dominant ou morphogène le débit liquide pour lequel la charge transportée est maximale, ce débit est bien supérieur aux débits de période sèche mais il est inférieur aux débits des plus fortes crues car leur fréquence est très faible.

Contrairement à une idée répandue, ce ne sont pas les crues très rares qui façonnent le lit tel qu'on le voit. Une rivière naturelle n'a généralement pas un lit mineur capable d'évacuer une crue par exemple décennale. Ceci dit, lorsqu'une très grosse crue survient de type centennale ou millénaire, il est possible que la section du lit soit brutalement agrandie, en particulier si les matériaux de berge sont peu cohésifs et si le lit majeur est peu végétalisé. Mais, dans ce cas, le lit mineur retrouve à terme sa morphologie initiale (mais pas forcément son tracé initial) par suite des dépôts dus aux crues faibles et moyennes. C'est un cas où un

phénomène naturel est capable de provoquer une évolution qui a de bonnes chances d'être irréversible.

### ***b) Variables de contrôle et variables de réponse***

Les variables de contrôle sont imposées au cours d'eau par la géologie et le climat, alors que les variables de réponse sont plutôt des degrés de liberté dont dispose le cours d'eau pour accomplir ses fonctions de base, c'est-à-dire transporter un débit liquide et un débit solide.

Les variables de contrôle sont :

- Débit liquide et débit solide ;
- La géométrie de la vallée, sa pente en particulier, la nature du boisement du bassin versant ;
- La couverture végétale des berges, les caractéristiques granulométrique et mécanique des matériaux du lit et de berges.

Les variables de réponse sont :

- Les paramètres géométriques (largeur, profondeur, pente du fond, amplitude et longueur d'onde des sinuosités) ;
- La taille des sédiments transportés ;
- La vitesse du courant.

### ***c) Equilibre dynamique***

Le cours d'eau adopte une géométrie qui lui permet d'évacuer les débits liquide et solide. Les observations que nous faisons montrent que le résultat obtenu semble être un équilibre, ce qui est une erreur. Même la rivière la plus paisible n'est jamais dans un vrai équilibre, du fait de la force tractrice qui est capable, en crue, de mobiliser la plupart des éléments constitutifs du lit. Tout au plus pouvons-nous dire que pour un régime permanent donné, la charge solide sortante est égale à la charge entrante. C'est donc d'équilibre dynamique qu'il faut parler.

L'équilibre dynamique est un ajustement permanent autour d'une géométrie moyenne, aussi appelé respiration. Il est rendu possible par les marges d'ajustement dont dispose la rivière :

- Dépôts pour s'adapter aux fluctuations annuelles de débit solide ;
- Modification de la profondeur d'eau ou érosion pour s'adapter aux variations annuelles de débit liquide.

Pour les crues faibles ou moyennes, les débits liquide et solide évoluent relativement continûment et le tracé reste relativement stable. C'est la raison pour laquelle sont souvent rapprochées les implantations du lit mineur. Mais, les fluctuations des débits solides et liquides peuvent être brutales dans le cas d'un événement pluvieux extrême sur un sous bassin amont. Celui-ci amène alors un amas de matériaux solides que le cours d'eau principal élimine progressivement vers l'aval à l'occasion des crues suivantes.

Les causes naturelles de déséquilibre sont climatiques ou géologiques [*Degoutte, 2006*].

### VII.3. Formes en plan - styles fluviaux

De l'amont vers l'aval, la taille des sédiments va en diminuant. En règle générale, il en va de même de la pente de la vallée et de la capacité de transport.

Dans la partie amont des rivières issues des régions montagneuses, c'est la zone d'érosion qui produit les sédiments et les transporte. Le lit est à très forte pente et son tracé est quasiment rectiligne. La vallée est étroite.

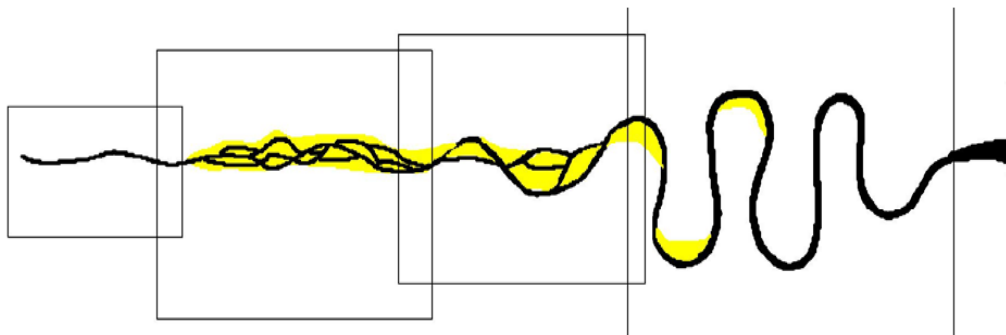
Plus en aval, les rivières coulent entièrement dans leurs propres alluvions avec trois styles qui se rencontrent successivement, style en tresses, style divagant à bras multiples sinueux et enfin style à méandres (figure III-2).

Le tracé en **tresses** est symptomatique d'une forte charge alluviale. Le lit est très large et plat. Plusieurs chenaux instables sont séparés par de nombreuses îles, ce style est peu fréquent. Des grands cours d'eau en tresses ont été aménagés et transformés en cours d'eau à lit unique. Bien sûr, les rivières qui ne prennent pas leurs sources en montagne n'ont pas de fort transport solide et n'offrent pas de style en tresses.

Plus à l'aval, on passe à un style **divagant**. La charge grossière à évacuer diminue, le nombre de tresses diminue, et un tracé principal sinueux s'organise. Le lit est moyennement large et comporte de un à trois bras, mais les bancs de galets ou de sable sont encore nombreux et larges. Ce style est intermédiaire entre le style en tresses et le style à méandres.

Plus en aval encore, dans les zones de plaine, de plus en plus sinueux, le cours d'eau adopte un tracé à lit unique et à **méandres**. Le transport solide dans ce dernier est mixte (suspension et charriage), alors qu'en plaine il a lieu quasi exclusivement par suspension. Il est composé de sables fins et de limons [*Degoutte, 2006*].

La figure (III-2) ci-dessous montre les différents grands traits morphologiques qu'on peut rencontrer dans un cours d'eau.



**Figure III-2 :** grands traits morphologique d'un cours d'eau [Degoutte, 2006]

#### VII.4. Mécanismes d'évolution des berges

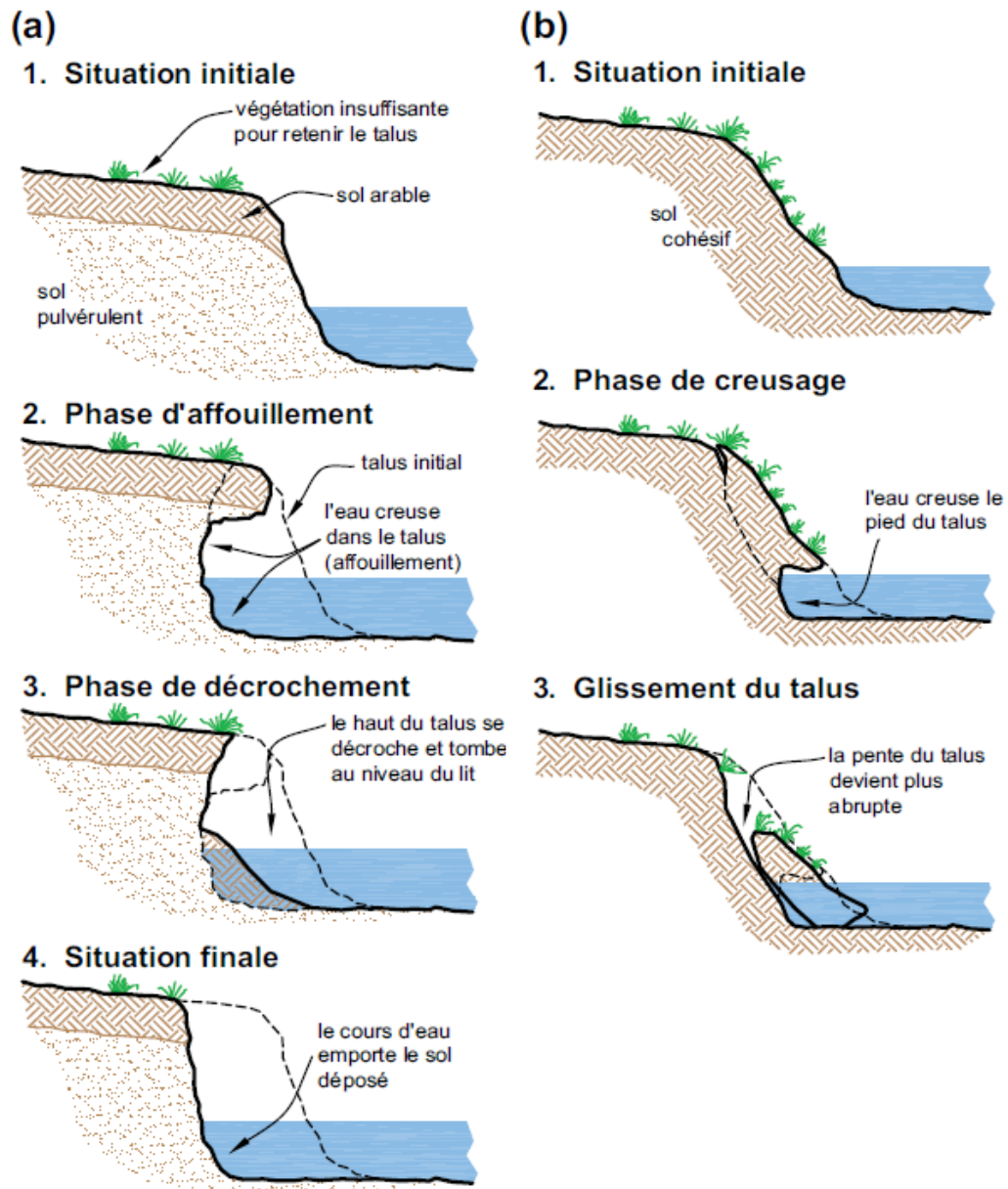
La dégradation des berges se produit généralement selon un processus qui combine à la fois le pouvoir érosif de l'eau et l'effet gravitaire. Dans certains cas s'ajoute un phénomène plus particulier : la boulangerie.

##### a) *Le pouvoir érosif de l'eau*

Lorsque la vitesse du courant et la turbulence arrivent à vaincre le poids des particules et leur force de cohésion, il y a érosion. De ce fait, les sols cohésifs (comme les sols argileux) résistent mieux à l'érosion que les sols pulvérulents (comme les sols sableux). Il est à noter que la force d'arrachement est plus forte lorsque la direction du courant forme un angle avec la surface du sol.

Tout ce qui modifie la direction de l'eau et augmente sa vitesse peut créer des foyers d'érosion. Ainsi, les obstacles dans le cours d'eau, le rétrécissement de la section du cours d'eau, les sorties de drain mal installées, la force centrifuge sur la rive extérieure d'une courbe et la pente forte du cours d'eau sont autant de facteurs qui peuvent contribuer à changer la direction de l'eau ou à augmenter sa vitesse. De plus, les surfaces de sol à nu résistent moins bien à l'action érosive de l'eau que les surfaces recouvertes de végétation.

L'érosion peut survenir au niveau des berges, mais également dans le lit du cours d'eau, on parle alors de régression de fond. La régression du fond abaisse l'élévation du lit, accentue l'angle du talus et affaiblit sa base. En sol cohésif, elle engendre presque systématiquement un glissement de talus (figure III-3).



**Figure III-3** : processus d'érosion de berges rencontrés (a) en sol peu cohésif et (b) en sol cohésif lorsque la vitesse de l'eau est importante [Lemieux et col, 1998]

### b) L'effet gravitaire

Le glissement des talus survient lorsque les matériaux composant la berge ne peuvent plus résister aux forces gravitationnelles.

Ce mécanisme survient plutôt dans des sols cohésifs qui sont capables de retenir de grandes quantités d'eau, ce qui ajoute du poids à la berge et réduit les forces de cohésion entre les particules.



Le talus devient encore plus sensible au décrochement. Lorsqu'on augmente la pente ou la hauteur d'un talus, le poids du sol excède éventuellement les forces de cohésion qui le retiennent, le sommet de la berge se fissure et le sol glisse en plaques. Dans les sols cohésifs, la surface de rupture présente une forme en arc de cercle caractéristique.

Moins les sols sont cohésifs, plus la surface de rupture est droite.

Les glissements ont généralement lieu après des pluies abondantes ou lors d'une décrue rapide alors que les berges sont saturées. Toutefois, d'autres circonstances favorisent aussi les glissements, comme les cycles de gel et de dégel ou de saturation et d'assèchement dans certains sols, les vibrations causées par le passage de machinerie trop près de la berge, l'ajout d'une charge sur la rive (remblais, arbres de forte taille), l'accumulation d'eau le long de la berge due à une raie de curage faite par un labour, etc. (figure III-4).

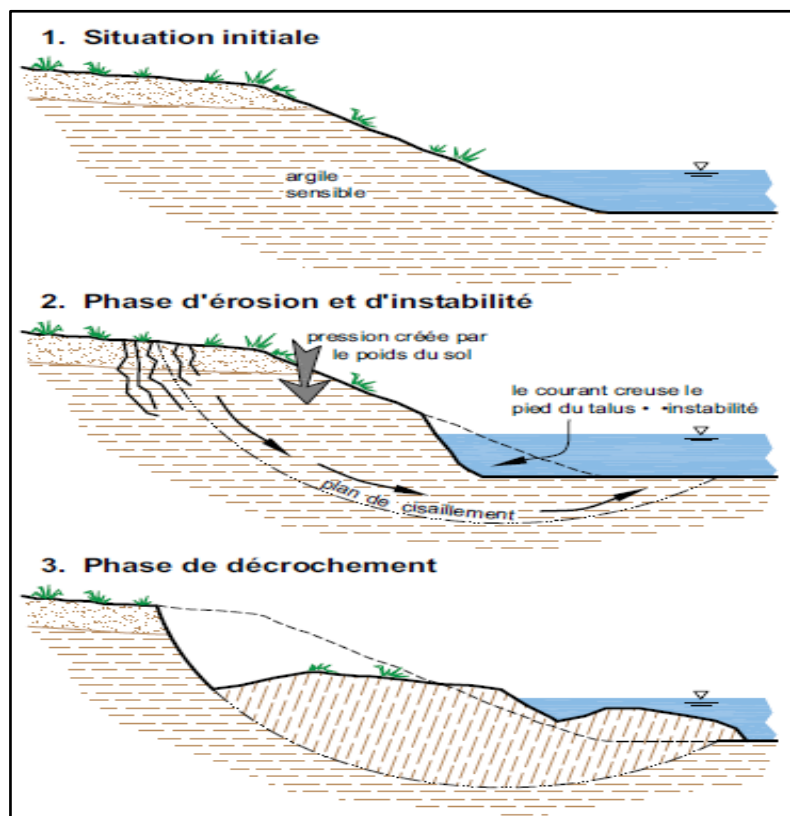


Figure III-4 : phénomène de rupture de berge en cercle [Lemieux et col, 2005]

### c) La boullance

Le glissement s'observe aussi fréquemment lorsqu'il y a résurgence de la nappe phréatique dans le talus. Les sols stratifiés où un horizon de sol pulvérulent se trouve sur un horizon de sol cohésif sont les plus sensibles à ce type d'érosion. Le phénomène résulte de la pression de

la nappe phréatique sur la berge lorsque le niveau de celle-ci est supérieur au niveau de l'eau dans le cours d'eau (figure III-5). Ce phénomène se nomme « boulangage ».

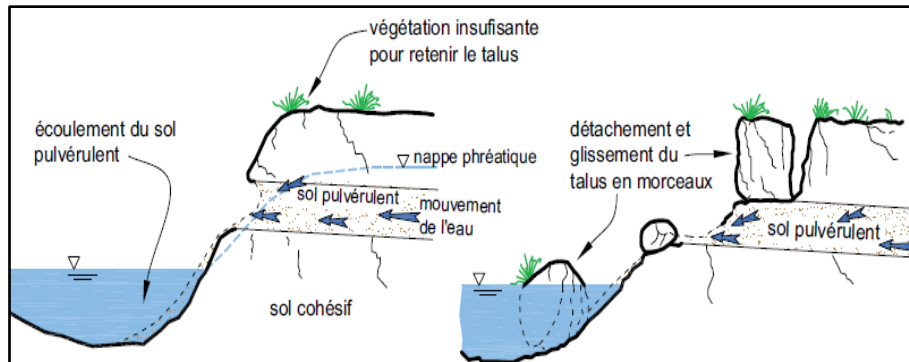


Figure III-5 : phénomène de boulangage [Lemieux et col, 1998]

#### d) Régression du fond

L'approfondissement du lit d'un cours d'eau est un phénomène lié à une augmentation de la vitesse de l'eau au-delà de la capacité de résistance du sol en place.

En s'approfondissant, le cours d'eau augmente la hauteur du talus. Lorsque sa hauteur dépasse la capacité de portance du sol, la rupture survient.

En général, ces situations sont visibles sur des cours d'eau à débit important combiné à une pente forte du lit ou à un endiguement étroit du lit (figure III-6).

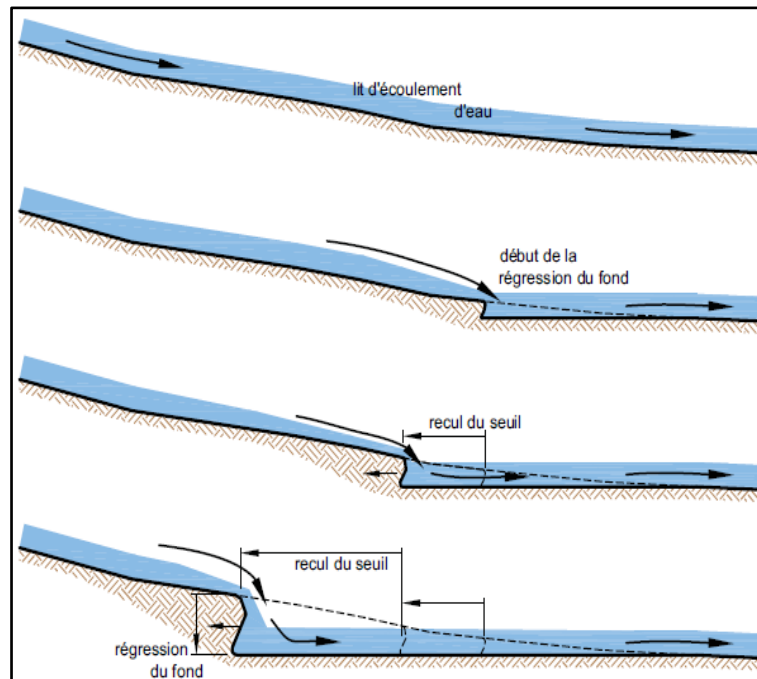


Figure III-6 : régression du fond [Lemieux et col, 2005]

**e) Présence d'obstacle dans le lit**

Tout objet suffisamment gros pour faire obstacle à l'écoulement de l'eau (arbres renversés, végétation envahissante, grosses pierres, plaques de terre provenant d'un glissement de talus, etc.) peut amorcer un processus d'érosion.

En avant d'un obstacle, les sédiments s'accumulent et les débris s'entassent. Lorsque l'obstacle n'est pas submergé le courant est détourné par effet de rebond. L'énergie du cours d'eau est alors dirigée d'une berge à l'autre dans un mouvement ondulatoire. Si le processus n'est pas arrêté, il peut donner naissance à une série de méandres.

Si cet obstacle est submergé, le courant le franchit de façon perpendiculaire. L'obstacle peut soit ramener l'eau vers le centre du cours d'eau s'il est orienté de façon oblique vers l'amont ou provoquer une niche d'érosion dans une berge s'il est orienté de façon oblique vers l'aval.

L'obstruction peut être le résultat d'un évènement naturel, tel que le bris d'une branche, la chute d'un arbre ou simplement la croissance de la végétation sur la berge ou dans le lit du cours d'eau. Elle peut aussi être une conséquence de l'activité humaine, comme dans le cas où elle est constituée de résidus d'émondage ou de rebus divers.

**f) Piétinement par les animaux**

Les sabots des animaux d'élevage offrent peu de surface portante. Par conséquent, la pression qu'ils exercent sur le sol est importante. Ajoutons à cela que ces animaux ont tendance à toujours fréquenter les mêmes endroits.

En empruntant leurs chemins habituels pour aller boire ou traverser les cours d'eau, ils détruisent la végétation, affaiblissent les berges et enclenchent la formation de foyers d'érosion. D'autre part, en s'abreuvant dans les cours d'eau, ils les contaminent par leurs excréments.

### g) Conclusion sur la déformation des berges

Il existe deux mécanismes essentiels de déformation des berges : l'érosion et le glissement. Le tableau suivant résume les causes de dégradation des berges.

**Tableau III-1** : circonstances observée aidant au diagnostic des causes de dégradation des berges  
[Degoutte, 2006]

Indice ou circonstance observé	Erosion	Glissement
Berge haute		*
Berge cohésive		**
Berge drainante	**	
Présence d'un banc en rive opposée	*	
Situation en berge concave	*	
Situation en berge concave et en berge convexe		**
Suppression de seuil, enfoncement généralisé		***
Fente en haut de berge		***
Discontinuité de forme dans le sens amont-aval	*	**
Arbres arrachés, passage de bétail	**	
Courant réfléchi par un arbre tombé	***	

## VII.5. Cours d'eau et ponts

Le cours d'eau d'oued Belghanem est traversé par deux ponts. Pour cela, il est nécessaire de donner des notions sur l'impact des ponts sur les cours d'eau et leur morphologie.

### a) Incidences des ponts sur les cours d'eau

Le franchissement des cours d'eau par les voies de transports terrestres a longtemps constitué un enjeu économique et stratégique de premier ordre autant qu'un défi technique majeur, aujourd'hui passablement banalisé par le recours généralisé aux techniques de constructions en béton et aux constructions métalliques. Cette facilitation relative de la construction des ponts a pu conduire à une relative sous-estimation des incidences des ponts sur les cours d'eau et aux moyens (et intérêts) de les réduire. Les ponts ont pourtant des incidences notables, tant sur le lit mineur que sur le lit majeur du cours d'eau traversé.

La gêne aux écoulements en amont du pont se traduit généralement par un exhaussement de la ligne d'eau et une aggravation des risques d'inondation. Il appartient donc au concepteur d'assurer à son projet une totale innocuité quant au risque d'inondation.

L'accélération des vitesses dans l'ouvrage et l'agitation des eaux dans la zone de tranquillisation en aval immédiat de l'ouvrage accroissent localement la capacité érosive des écoulements du cours d'eau et déséquilibrent ponctuellement le transport solide. Cela peut se traduire par des risques d'affouillement au pied de l'ouvrage et un décapage des sédiments sur une certaine longueur qui constitue une discontinuité morphologique éventuellement problématique pour une partie de la faune aquatique [Sétra, 2007].

#### **b) Incidence des aménagements des cours d'eau sur les ponts**

La présence d'un pont peut avoir sur le cours d'eau qu'il traverse de graves conséquences, le cours d'eau peut créer des dommages à l'ouvrage.

Un mauvais aménagement peut créer un état de déséquilibre du cours d'eau ce qui entraîne une instabilité des berges et du lit et peut provoquer des affouillements de fondations. Et il est même arrivé dans certains cas que l'ouvrage soit emporté suite à une crue [Sétra, 2007].

Des actions humaines sur un cours d'eau peuvent aussi avoir des conséquences sur les ponts telles que :

- Le curage du lit du cours d'eau ou l'extraction de matériaux ;
- La suppression des méandres ;
- L'aménagement des berges, les endiguements ;
- La création de terre-pleins et de remblaiement dans Le lit majeur ou mineur ;
- La construction ou l'utilisation illicite des barrages ;
- L'absence d'entretien des rives ;
- La pollution du cours d'eau.

## **Conclusion**

Ce chapitre qui résume le diagnostic théorique des cours d'eau va nous aider à comprendre les problématiques qu'on peut rencontrer dans l'oued Belghanem et de cibler les causes de ces dysfonctionnements, pour ensuite proposer des solutions d'aménagement.

## Chapitre IV

# DIAGNOSTIC DE L'OUED BELGHANEM

## Introduction

Le but de ce présent chapitre est de décrire l'état des lieux de l'oued Belghanem et de fournir les éléments essentiels pour mettre en place un programme d'aménagement du cours d'eau afin de protéger la ville de Belghanem contre les inondations.

### I. Démarches du diagnostic pratique

Pour avoir un bon diagnostic, on a subdivisé la zone d'étude en deux tronçons non homogènes (figure IV-1) et dans ce qui suit on va décrire chaque tronçon on procédera comme suit :

- Détermination du profil en long du tronçon ;
- Calcul du coefficient de sinuosité ;
- Description des problèmes rencontrés sur chaque tronçon ;
- On citera quelques solutions pour l'aménagement du cours d'eau.



Figure IV-1 : découpage de la zone d'étude en deux tronçons [Google earth, 2015]

## II. Calcul du coefficient de sinuosité

On appelle coefficient de sinuosité ( $C_s$ ), le rapport entre la longueur d'un tronçon du cours d'eau ( $L_{tr}$ ) et la longueur de ce dernier au vol d'oiseau ( $L_v$ ) entre deux points du cours d'eau :

$$C_s = L_{tr} / L_v \quad (IV-1)$$

Le cours d'eau est dit :

- Rectiligne quand ce coefficient est inférieur à 1.05 ;
- Sinueux entre 1.05 et 1.25 ;
- Très sinueux entre 1.25 et 1.5 ;
- Méandrique quand ce coefficient est supérieur à 1.5.

## III. Morphologie de l'oued Belghanem

Notre visite sur terrain a commencé du lycée Imam Afleh jusqu'au pont exutoire là où l'oued Belghanem rencontre l'oued M'Zab, soit une longueur d'environ 3 km.

Par l'application de la formule (IV-1), on trouve  $C_s = 1.10$ . Donc nous constatons que le tracé en plan de l'oued Belghanem se caractérise par un style sinueux car :  $1.05 < C_s < 1.25$ .

Le profil en long de l'oued est représenté dans la figure suivante (IV-2), tel que la pente moyenne est de l'ordre de 0.55 %.

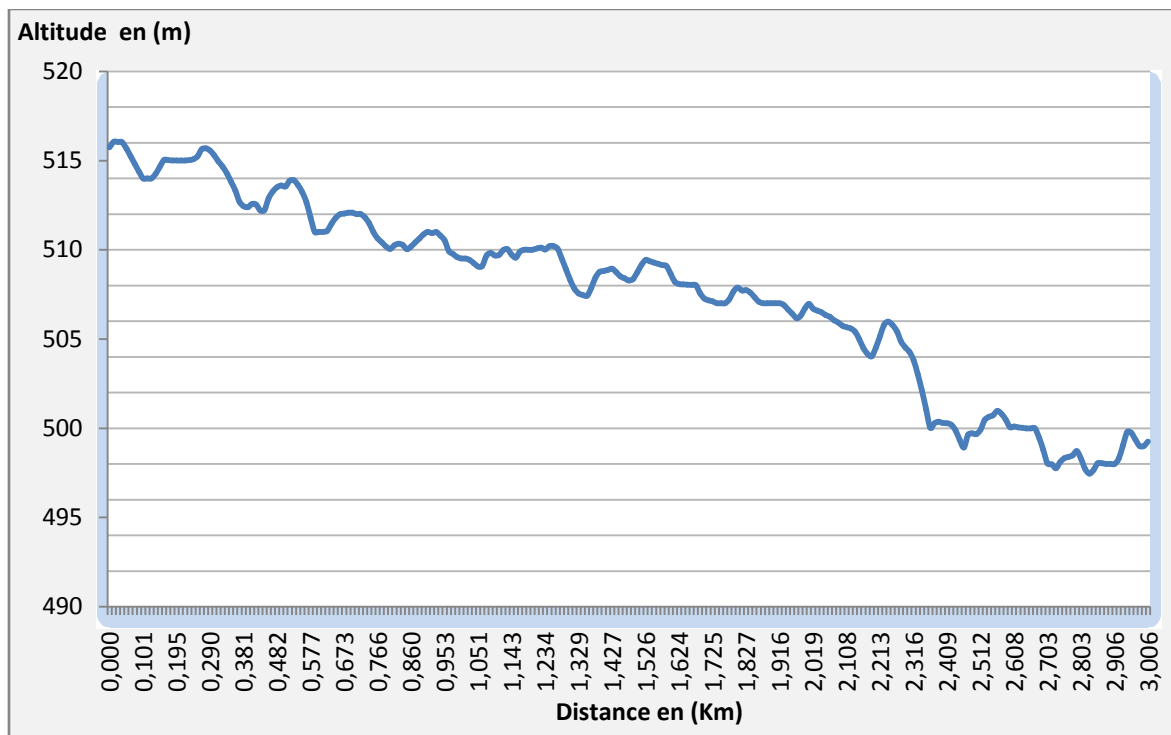


Figure IV-2 : profil en long du domaine d'étude

## IV. Description du premier tronçon

Le premier tronçon commence du lycée Imam Afleh jusqu'au quartier Chwahin comme le montre la figure ci-dessous :



Figure IV-3 : vue aérienne du premier tronçon [Google earth, 2015]

### IV.1. Profil en long

Ce tronçon a une longueur d'environ 1400 m et une pente moyenne de l'ordre de 0.7 %. Son profil en long est présenté par la figure (IV-4).

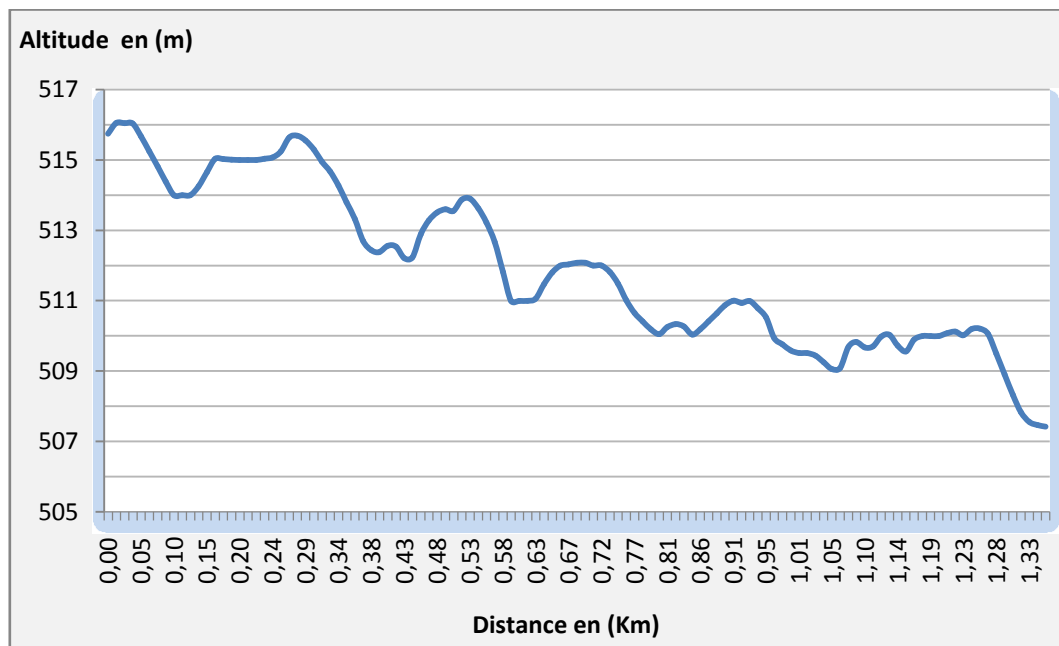


Figure IV-4 : profil en long du tronçon 1



## IV.2. Coefficient de sinuosité

Par l'application de la formule (IV-1) et sachant que la longueur au vol d'oiseau entre le point du départ et d'arrivée est d'environ 1300 m, nous avons trouvé que le coefficient de sinuosité  $C_s = 1.08$  ce qui confirme que ce tronçon est caractérisé par un style sinueux.

Dans ce qui va suivre, nous allons présenter l'état des lieux de ce tronçon ainsi que les différentes observations rencontrées.

## IV.3. L'état de tronçon 1

Durant les investigations sur terrain, nous avons remarqué les problèmes suivants :

- La majorité des habitations sont construites sur les premières terrasses, sur les deux rives droite et gauche et parfois même dans les lits d'oueds ce qui a conduit à une instabilité des rives et du lit du cours d'eau (photo IV-2).
- Existence d'un réseau d'assainissement des eaux usées dans le lit mineur réalisé le long de l'oued jusqu'au raccordement au collecteur principal d'oued M'Zab (photo IV-3).
- Présence des déchets solides (racines et branches des palmiers, grosses pierres et végétation envahissante) dans le lit de l'oued jetés d'une façon aléatoire qui constitué un obstacle pour l'écoulement (photo IV-1).
- Absence de la végétation sur les berges qui due à une dégradation quasi-totale de ce dernier.
- A cause du climat saharien de la région qui se caractérise par une irrégularité du régime pluviométrique, nous avons remarqué une absence totale du débit d'étiage dans le lit du cours d'eau.
- Utilisation du lit du cours d'eau comme une route et une voirie par les riverains pour leurs déplacements.



**Photo IV-1** : présence des déchets solides et obstacles dans le lit de l'oued



**Photo IV-2** : constructions anarchiques dans le lit du cours d'eau



**Photo IV-3** : existence du réseau d'assainissement dans le lit du cours d'eau

A l'arrivée au quartier Chwahin, nous avons remarqué que l'oued s'élargit puis se rétrécit fortement avec un changement brutal de la direction d'écoulement de l'amont vers l'aval comme les montrent les photos suivantes (IV-4) et (IV-5).



Photo IV-4 : forte élargissement du lit



Photo IV-5 : rétrécissement brusque du lit

## V. Description de deuxième tronçon

Le deuxième tronçon est situé entre le quartier Chwahin et le pont exutoire là où il rencontre l'oued M'Zab comme le montre la figure ci-dessous :



Figure IV-5 : vue aérienne du deuxième tronçon [Google earth, 2015]

### V.1. Profil en long

Ce tronçon a une longueur d'environ 1030 m et une pente moyenne de l'ordre de 0.8 %. Son profil en long est présenté par la figure (IV-6).

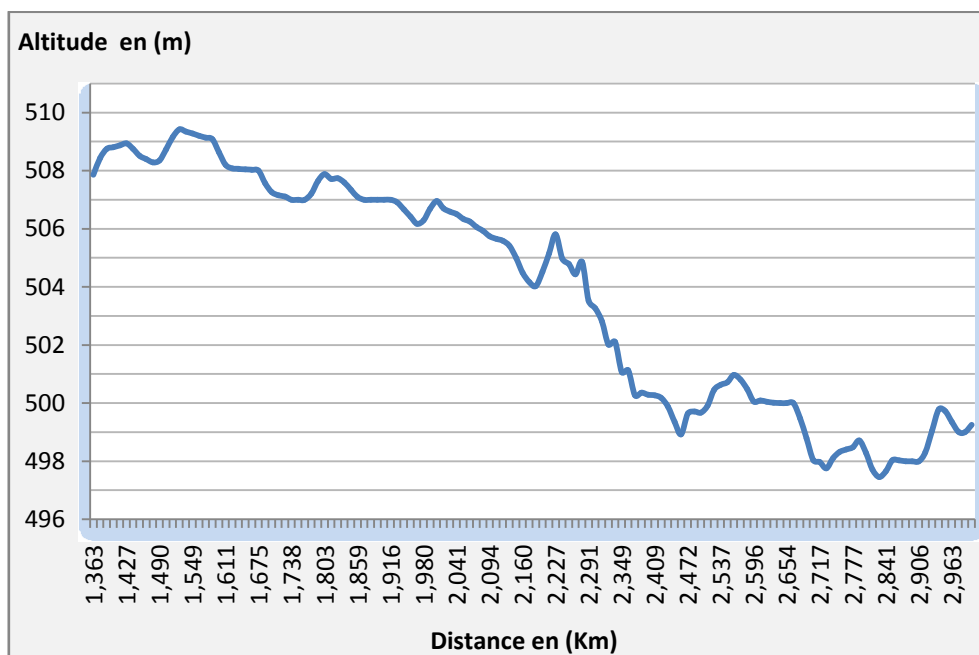


Figure IV-6 : profil en long du tronçon 2

### V.2. Coefficient de sinuosité

Par l'application de la formule (IV-1) et sachant que la longueur au vol d'oiseau entre le point du départ et d'arrivé est d'environ 880 m, nous avons trouvé un coefficient de sinuosité  $C_s = 1.17$  donc il est caractérisé par un style sinueux.

Dans ce qui va suivre, nous allons présenter l'état des lieux de ce tronçon ainsi que les différentes observations et problèmes que nous avons rencontrés au cours de notre déplacement sur le terrain.

### V.3. L'état de tronçon 2

Les observations remarquées pour ce tronçon sont :

- Nous avons constaté l'implantation d'habitations dans le lit de l'oued, ce qui a conduit à la disparition graduelle de la palmeraie et une urbanisation anarchique. Donc le cours d'eau traverse une zone urbaine très dense.
- Inexistence des limites du lit mineur et du lit majeur de l'Oued.
- Les habitants au bord de l'oued rejettent directement leurs déchets solides et parfois même les sachets en plastique dans le lit comme le montre la photo suivante :



Photo IV-6 : cours d'eau pollué par des déchets et ordures

- Présence de la végétation spontanée en amont et en aval de chaque pont qui gênent l'écoulement pendant la période de crue.



Photo IV-7 : végétation spontanée en amont du pont exutoire

- La rive gauche en amont du pont exutoire est aménagée, il y a un mur de protection en pierre (photo IV-8).



**Photo IV-8** : mur de protection en pierre

- L'accumulation des sédiments et débris causée par le glissement d'une partie de la rive droite en amont du pont exutoire (photo IV- 9).



**Photo IV-9** : glissement au niveau de la rive droite

- L'imperméabilisation du sol par le bétonnage d'une partie de ce tronçon pour faciliter le mouvement des véhicules sur l'oued (photo IV-10).



**Photo IV-10** : bétonnage d'une partie du lit de l'oued

- Deux ponts traversant l'oued, le pont de Hamraia et le pont exutoire, éloignés l'un de l'autre d'une distance d'environ 600 m (figure IV-5).

Le pont de Hamraia a une longueur de 15 m, largeur de 12 m et une hauteur de 2 m. Le passage sous le pont se fait par l'intermédiaire de sept (07) buses en acier ayant un diamètre de 1 m sur une longueur de 7 m (photo IV-12) séparées entre eux par un mur en béton d'une largeur de 0.6 m. Le pont est en bon état (photo IV-11 prise en amont du pont).



**Photo IV-11** : pont de Hamraia



**Photo IV-12 :** buse pleine de déchets et sachets en plastiques

Le dernier ouvrage est le pont exutoire situé à une distance d'environ 25 m de l'oued M'Zab, qui a une longueur de 25 m, une largeur de 12 m et une hauteur de 2.5 m. Une conduite d'AEP de diamètre 200 mm est suspendue en aval du pont comme le montre la photo (IV-13).

Au dessous du pont, nous avons remarqué huit (08) ajutages ayant une forme en U. La hauteur est de 1.9 m avec une largeur de 1.2 m.



**Photo IV-13 :** côté aval du pont exutoire



## VI. Quelques solutions proposées

- ❖ L'arrêt de l'urbanisation anarchique au bord du lit de l'oued.
- ❖ Construction des murs de protection soit par des murs en béton armé ou bien par la technique de gabionnage des rives afin de protéger les habitants contre les inondations.
- ❖ Interdire la décharge dans le lit du cours d'eau par la sensibilisation des habitants qui habitent au voisinage de l'oued.
- ❖ Curage et nettoyage de l'oued d'une façon régulière et périodique.
- ❖ Les deux ponts nécessitent un nettoyage et évacuation des déblais et déchet solides pour assurer une bonne transition des débits dans les périodes des crues sans avoir des bouchages à l'intérieur et à la sortie des ajustages.
- ❖ Reconstruction des talus endommagés.
- ❖ Approfondissement du lit mineur par prélèvement de ses matériaux à l'aide de la technique de dragage.
- ❖ Augmentation de la pente du cours d'eau par la technique de rectification afin d'augmenter la débitante ainsi que de réduire la fréquence de submersion des terrains riverains.
- ❖ Elargissement de l'oued dans la zone où le rétrécissement est brutal (photo IV-5) par un recalibrage dans le but de minimiser les dégâts dans la période des crues.
- ❖ Construction d'un mur de protection dans la zone qui se présente dans la figure ci-dessous pour dévier l'écoulement, car cette zone elle peut être inondée par n'importe quelle crue qui se génère dans le bassin versant.

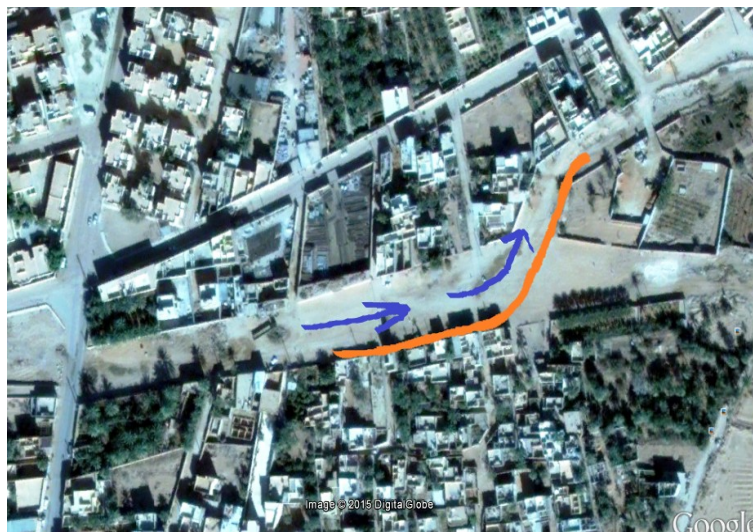


Figure IV-7 : construction de mur de protection [Google earth, 2015]

## **Conclusion**

L'objectif principal du diagnostic de l'oued est de présenter l'état des lieux de ce dernier et de proposer des solutions d'aménagement primaires afin d'assurer la protection des habitants, leurs biens et des terres agricoles contre les inondations.

Dans l'oued Belghanem, nous avons rencontré durant notre visite sur le terrain plusieurs problèmes qui sont présentés et cités dans ce présent chapitre. Donc nous espérons à la fin de ce projet de fin d'étude que nous arriverons à atteindre notre objectif qui est l'aménagement du cours d'eau.

## Chapitre V

### CONSTRUCTION DU MAILLAGE DE CALCUL

#### I. Présentation général de code de calcul RUBAR20

L'Irstea a développé un outil de résolution numérique 2D appelé **RUBAR20**. Ce logiciel a été initialement conçu pour le calcul de propagation d'onde de rupture de barrage en bidimensionnel. A ce titre, il permet de simuler la propagation d'une onde issue soit d'une rupture instantanée de barrage (on partira d'un mur d'eau), soit d'une rupture progressive (pour laquelle on connaît l'hydrogramme au droit du barrage ou pour laquelle on la modélise par un ouvrage particulier). Il traite donc, en particulier, la propagation d'un front sur une zone initialement sèche [Paquier, 2008].

De manière plus générale, ce logiciel permet tout calcul hydraulique ressortant des équations de Saint-Venant bidimensionnelles, en particulier, lorsque les variations temporelles des caractéristiques hydrauliques sont importantes (crues). Les équations que le logiciel résout sont écrites sous la forme :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = G \quad (\text{V-1})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( \frac{Q_x Q_y}{h} \right)}{\partial y} = & -gh \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{C^2 h^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{Q_x}{h} \right)}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{Q_x}{h} \right)}{\partial y} \right) + F_x(w) + G_x \end{aligned} \quad (\text{V-2})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q_x Q_y}{h} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( \frac{Q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right)}{\partial y} = & -gh \frac{\partial Z}{\partial y} - g \frac{Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{C^2 h^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{Q_y}{h} \right)}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{Q_y}{h} \right)}{\partial y} \right) + F_y(w) + G_y \end{aligned} \quad (\text{V-3})$$

Où,  $h$  est la hauteur d'eau,  $Z$  la cote du fond,  $Q_x$  le débit (unitaire) selon l'axe  $ox$  égal au produit de la vitesse par la hauteur,  $Q_y$  le débit unitaire selon  $oy$ ,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $K$  le coefficient de viscosité (ou diffusion),  $C$  le coefficient de Chézy pour le frottement au fond (ou coefficient de Strickler multiplié par  $h^{1/6}$ ),  $G_x$  et  $G_y$  les composantes du frottement à la paroi (verticale) exprimée comme le frottement au fond mais la contrainte étant parallèle à la paroi, on utilise un facteur multiplicatif valant 0 pour les mailles sans paroi et  $(h/L)$  pour les autres mailles avec  $L$  dimension de la maille dans la direction perpendiculaire à la paroi,  $P$  l'apport local correspondant à la pluie (dont on néglige la quantité de mouvement) [Paquier, 2008].

Les équations de Saint-Venant 2D sont destinées à prédire l'évolution temporelle et spatiale d'un écoulement majoritairement bidimensionnel, c'est à dire dont les vitesses verticales sont faibles par rapport aux vitesses dans le plan horizontal.

La principale simplification apportée dans les équations de Saint Venant par rapport aux équations de Navier Stokes provient en effet de l'hypothèse d'une répartition hydrostatique des pressions dans l'écoulement. Cette hypothèse simplificatrice est valable pour des écoulements horizontaux sous certaines conditions que l'on supposera vérifiées. Ces conditions sont des accélérations verticales faibles devant la pesanteur, des hauteurs d'eau grandes par rapport aux irrégularités du fond, des rayons de courbures des lignes de courant dans un plan horizontal importants, des faibles pentes de la surface libre. Les équations de Saint-Venant sont alors obtenues en intégrant sur la verticale les équations de Navier-Stokes écrites sous les hypothèses précédentes, suivant l'axe vertical.

## II. Levé topographique

La construction du maillage de calcul est une étape très importante. Elle est basée principalement sur l'existence d'un levé topographique détaillé de la zone d'étude, surtout celles du lit mineur et du lit majeur du cours d'eau.

Pour cela, nous sommes déplacés in-situ pour faire le relevé topographique le long de l'oued Belghanem.

### II.1. Matériel topographique utilisé

L'appareil de mesures que nous avons utilisé, est la nouvelle génération de stations totales SOKKIA motorisée ou robotisée pour toutes les applications topographiques et d'auscultation.

Cet appareil est bien équipé par différentes technologies pour faciliter leur positionnement et pour faire des mesures précises (photo (V-1) et (V-2)).



**Photo V-1** : appareil de mesures avec Carnet numérique d'enregistrement



Photo V-2 : prisme

## II.2. Procédure de mesure

- Le choix de la station pour le positionnement de l'appareil s'effectue de telle sorte à avoir un maximum de points à lever en une station pour gagner du temps ;
- Réglage de l'horizontalité de l'appareil ;
- Donner des coordonnées relatives ( $x_0$ ,  $y_0$  et  $z_0$ ) avant le départ du levé topographique ;
- Déplacement du prisme sur les sections en travers et le long de l'oued, et à chaque déplacement en effectuant une mesure. L'enregistrement de la mesure au point ( $x$ ,  $y$  et  $z$ ) est achevé automatiquement dans le carnet numérique d'enregistrement (les mesures brutes sont données en annexe) ;
- Transfert des mesures enregistrées dans le carnet numérique vers l'ordinateur. Les mesures transférées sont données sous forme d'un fichier texte ou sur un fichier AutoCAD.

## III. Construction du maillage de calcul

La construction du maillage de calcul se fait en deux étapes :

1. Construction du maillage initial (fichier (.st)) à l'aide de programme Fudaa-Modeleur.
2. Construction du maillage final (maillage de calcul) en utilisant les différents sous-programmes tels que Secma, Mcoxima, Mail20 et Vf2m.

### III.1. Construction du maillage initial

Le maillage initial est un ensemble des profils en travers et des lignes directrices créées par le logiciel Fudaa-Modeleur, en se basant sur les données topographiques.

La première étape consiste à caler une photo aérienne de la zone d'étude en utilisant le Fudaa Modeleur, qui permet d'introduire les coordonnées (x, y) des points choisis pour le calage (figure V-1). Il faut au minimum trois points pour caler une image.

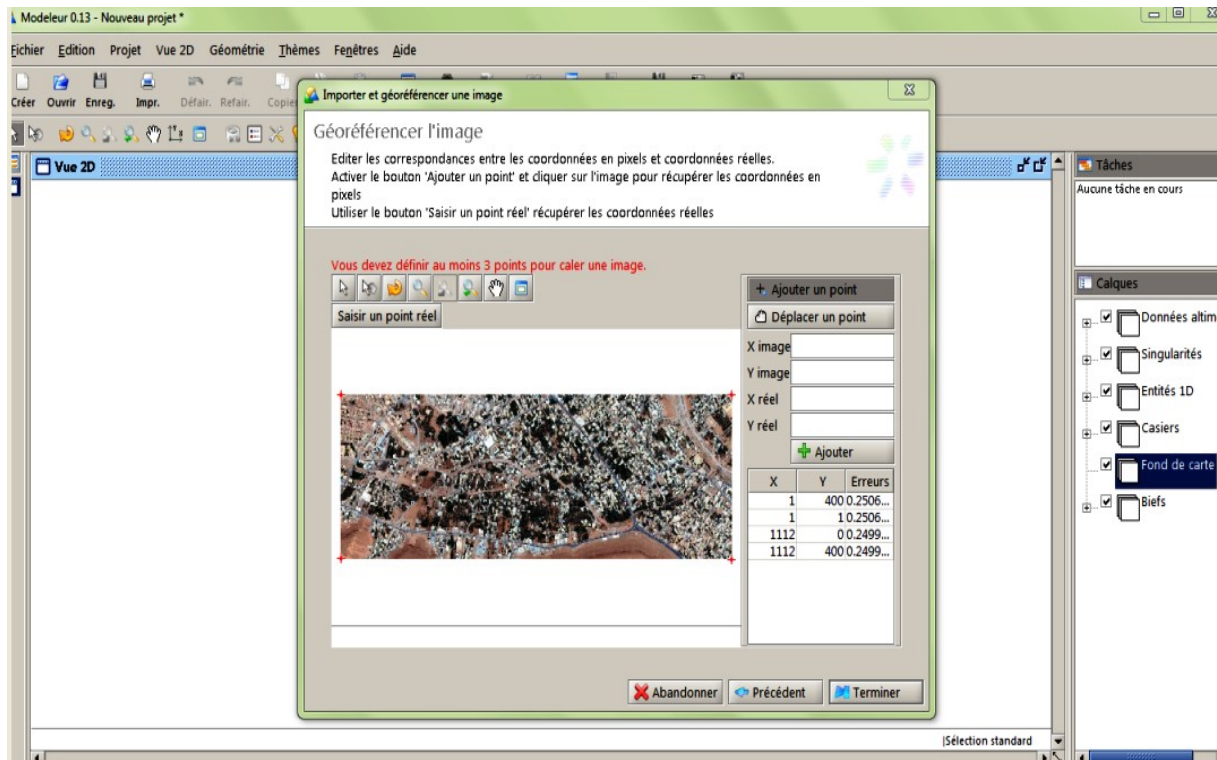


Figure V-1 : calage d'une image aérienne de la zone d'étude

On trace les profils en travers, tout le long du cours d'eau par la mise des points dans le lit mineur et lit majeur, puis on attribue pour chaque point sa cote réelle de manière à reproduire la topographie du terrain, tout en gardant le même nombre de point dans tous les profils en travers.

On trace les lignes directrices qui sont approximativement perpendiculaire aux profils en travers, en relie les points de même ordre.

La figure (V-2) ci-dessous permet de visualiser les profils en travers qui sont en jaune et les lignes directrices en bleu.

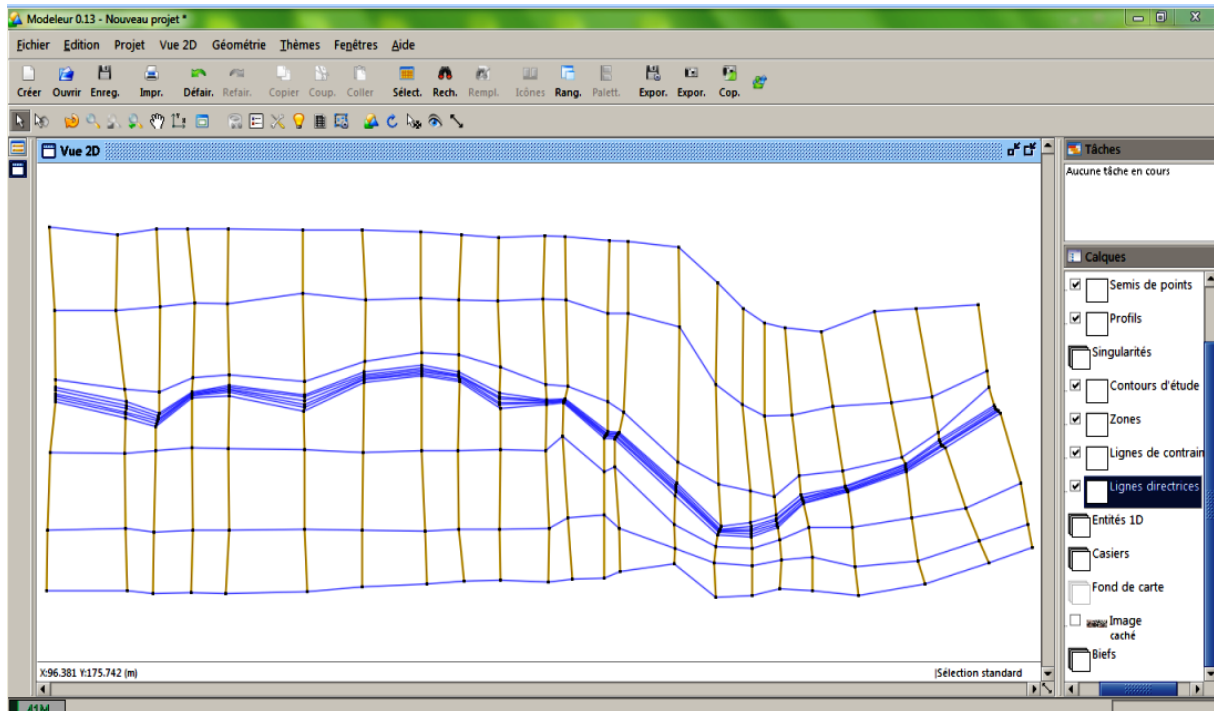


Figure V-2 : maillage initial généré par Fudaa-Modeleur

Le fichier résultant est un fichier d'extension (\*.st) contient les coordonnées des points de dessin, il est réservé pour la construction du maillage final.

### III.2. Construction du maillage final

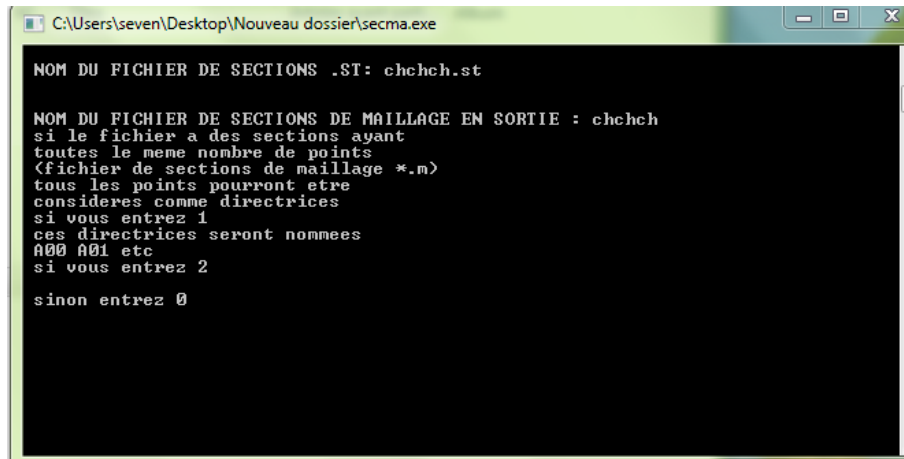
Le maillage final est obtenu par interpolation du maillage initial en utilisant les différents sous programmes tel que Secma, Mcoxima, etc.

#### a) Construction du fichier (\*.M)

La création du fichier .M appelé fichier du maillage de calcul se fait par le programme Secma (figure V-3).

Ce programme traite le maillage initial (fichier (\*.st)) par zone (une zone est compris entre deux lignes directrices) avec un pas d'espace choisi pour chaque zone, et l'interpolation transversal se fait par un pas d'espace voulu.





```

C:\Users\seven\Desktop\Nouveau dossier\secma.exe
NOM DU FICHIER DE SECTIONS .ST: chchh.st

NOM DU FICHIER DE SECTIONS DE MAILLAGE EN SORTIE : chchh
si le fichier a des sections ayant
toutes le meme nombre de points
(fichier de sections de maillage *.m)
tous les points pourront etre
consideres comme directrices
si vous entrez 1
ces directrices seront nommees
A00 A01 etc
si vous entrez 2
sinon entrez 0

```

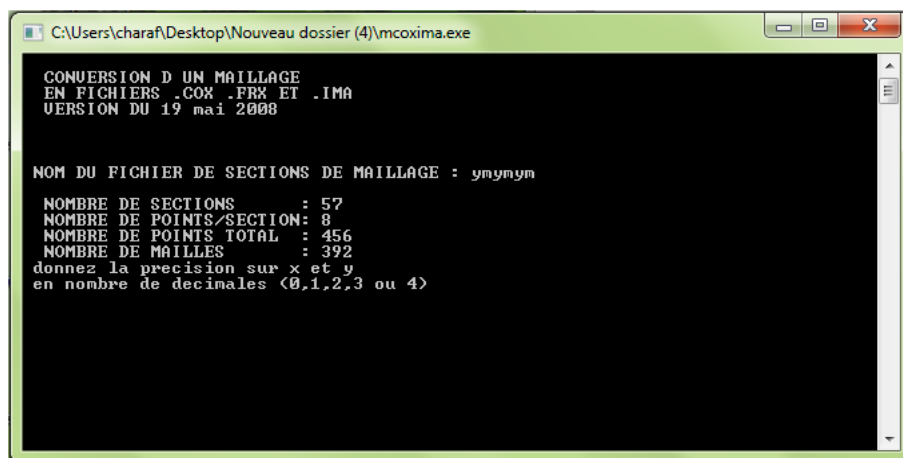
Figure V-3 : sous-programme Secma

### b) Construction du fichier (\*.IMA)

Un fichier (\*.ima) contient les coordonnées des sommets des quadrilatères de base du maillage et le nombre de maille par quadrilatère. Ce fichier est créé par le programme Mcoxima (figure V-4).

De plus ce programme crée les fichiers suivant :

- ❖ **Le fichier (\*.cox)** : Qui contient les côtes du fond sur une grille régulière orienté Nord-sud et ouest-est ou sur des parallélogrammes.
- ❖ **Le fichier (\*.frx)** : Qui contient les frottements au fond en certain points définis par leurs coordonnées
- ❖ **Le fichier texte (toto.txt)** : Qui indique s'il y a des erreurs ou non au cours de la création des fichiers précédant.



```

C:\Users\charaf\Desktop\Nouveau dossier (4)\mcoxima.exe
CONVERSION D UN MAILLAGE
EN FICHIERS .COX .FRX ET .IMA
VERSION DU 19 mai 2008

NOM DU FICHIER DE SECTIONS DE MAILLAGE : ymyym

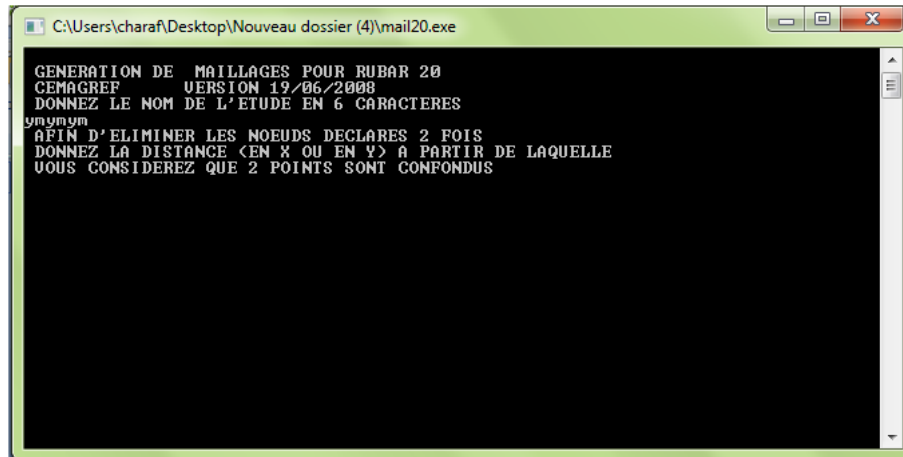
NOMBRE DE SECTIONS      : 57
NOMBRE DE POINTS/SECTION: 8
NOMBRE DE POINTS TOTAL  : 456
NOMBRE DE MAILLES      : 392
donnez la precision sur x et y
en nombre de decimales <0,1,2,3 ou 4>

```

Figure V-4 : sous-programme Mcoxima

### c) Construction du fichier (\*.MAI)

Le programme Mail20 offre la possibilité de lire le fichier (\*.ima), de faire des modifications sur le maillage et de créer le fichier (\*.mai) qui contient la numérotation des mailles, des nœuds et des coordonnées. La fenêtre d'exécution est présentée par la figure suivante :



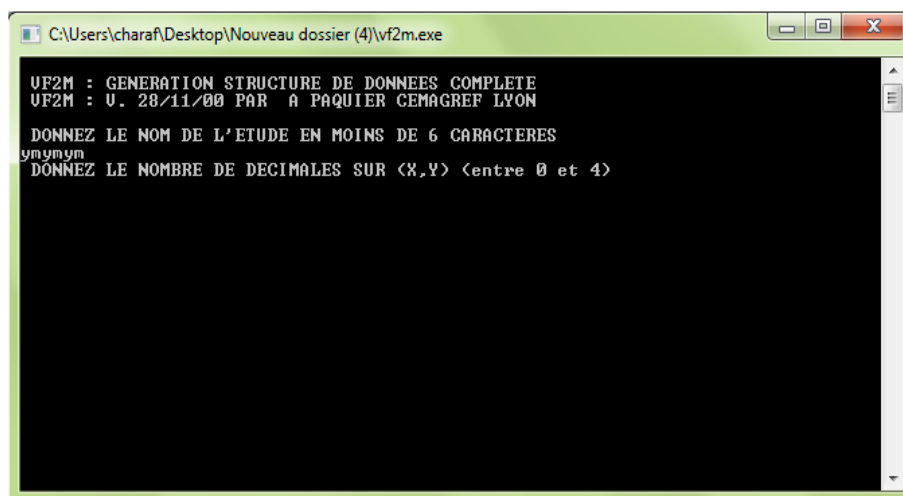
```
C:\Users\charaf\Desktop\Nouveau dossier (4)\mail20.exe
GENERATION DE MAILLAGES POUR RUBAR 20
CEMAGREF VERSION 19/06/2008
DONNEZ LE NOM DE L'ETUDE EN 6 CARACTERES
ymymym
AFIN D'ELIMINER LES NOEUDS DECLARES 2 FOIS
DONNEZ LA DISTANCE <EN X OU EN Y> A PARTIR DE LAQUELLE
VOUS CONSIDEREZ QUE 2 POINTS SONT CONFONDUS
```

Figure V-5 : sous-programme Mail20

Un autre fichier texte généré par ce programme sous le nom toto.txt indique s'il y a des erreurs ou non pendant leur exécution. Si le fichier est vide (pas d'erreur) on passe à l'étape suivante.

### d) Construction du fichier (\*.DAT)

Le fichier (\*.dat) contient l'ensemble des données par maille. C'est un fichier indispensable pour l'utilisation de logiciel Fudaa -Prepro. Il est créé par le programme Vf2m (figure V-6).



```
C:\Users\charaf\Desktop\Nouveau dossier (4)\vf2m.exe
VF2M : GENERATION STRUCTURE DE DONNEES COMPLETE
VF2M : U. 28/11/00 PAR A PAQUIER CEMAGREF LYON
DONNEZ LE NOM DE L'ETUDE EN MOINS DE 6 CARACTERES
ymymym
DONNEZ LE NOMBRE DE DECIMALES SUR <X,Y> (entre 0 et 4)
```

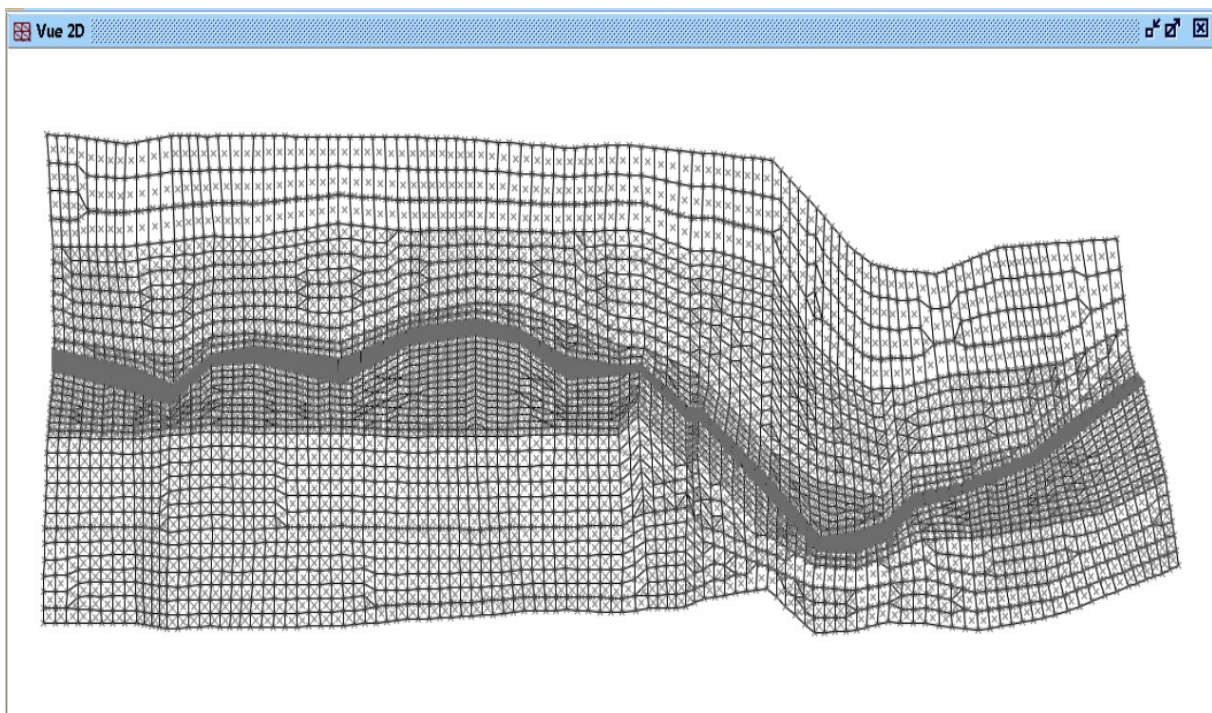
Figure V-6 : sous-programme Vf2m

Après avoir finalisé cette partie, nous passons à l'utilisation du post processeurs Fudaa-Prepro.

#### IV. Utilisation de Fudaa-Prepro

Le logiciel Fudaa-Prepro fournit des outils pour préparer et lancer une simulation d'un écoulement dans un cours d'eau, il permet de définir, de saisir et de modifier tous les paramètres de calcul ainsi que les conditions initiales et les conditions aux limites.

Le Fudaa-Prepro permet aussi de visualiser le maillage final de la zone d'étude comme montre la figure suivante :



**Figure V-7** : maillage final de la zone d'étude

Les paramètres que nous devons définir dans cette partie sont :

- ✚ La bathymétrie ;
- ✚ Coefficient du frottement au fond
- ✚ Le positionnement des ouvrages et leurs caractéristiques ;
- ✚ La définition des conditions initiales et aux limites ;
- ✚ La définition des paramètres de calcul.

#### IV.1. Bathymétrie et coefficient de frottement

La bathymétrie et le frottement peuvent être définis à partir de données brutes, des données qui seront interpolées sur le maillage du projet.

Le passage dans le programme Vf2m, nous permet de générer la structure des données en créant le fichier (\*.dat) par la lecture du fichier (\*.cox). Le programme Vf2m permet aussi de saisir le frottement, préalablement modifié à l'aide de Fudaa-Prepro.

##### a) Bathymétrie

La figure ci-dessous permet de visualiser la bathymétrie des modèles et leurs maillages.

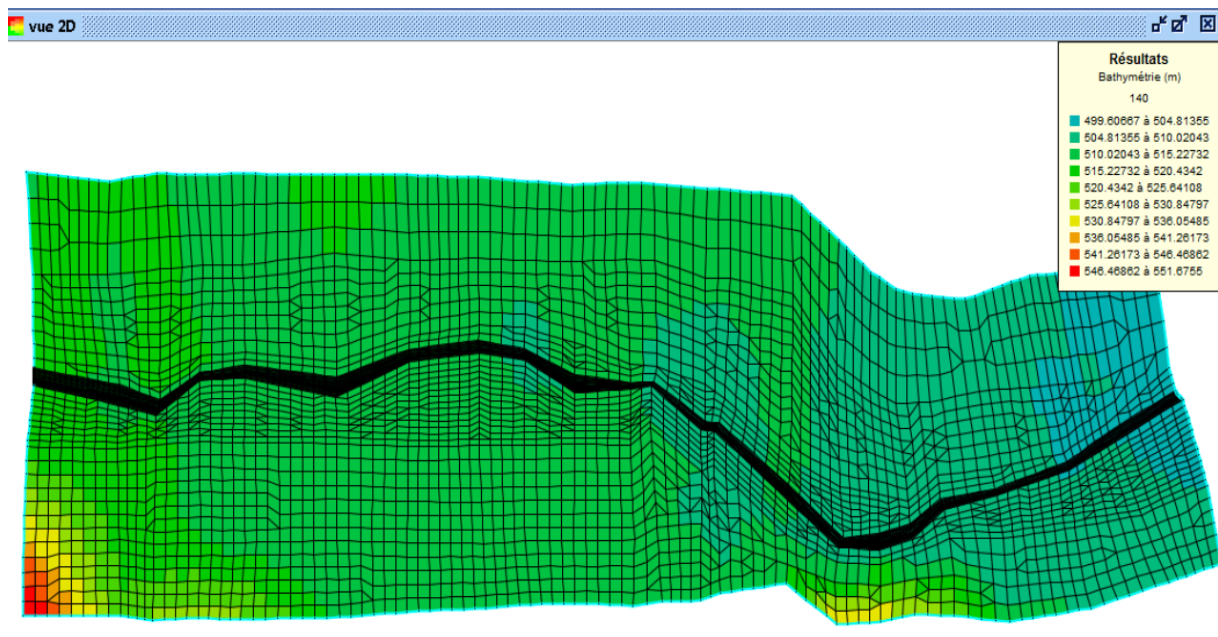


Figure V-8 : visualisation de la bathymétrie de la zone d'étude

##### b) Coefficient de frottement au fond

La valeur du coefficient de frottement du fond est le paramètre le plus délicat à introduire dans le modèle, tant sa valeur est dépendante que de la nature du sol en régime turbulent rugueux.

Pour les frottements au fond le code de calcul RUBAR20 donne le choix entre le coefficient de Chézy et de Strickler, ce dernier c'est le plus couramment utilisé.

La formule qui prend en considération les différentes caractéristiques du sol, est la formule de Cowan (Carlier, 1980). Cette formule permet d'estimer la valeur du coefficient de Manning  $n$  en séparant l'influence des différents facteurs. Elle s'écrit :

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Avec,  $n_0$  : facteur correctif du type de sol du lit de la rivière ;  $n_1$  : facteur correctif des irrégularités de la rivière ;  $n_2$  : facteur correctif du type et de la forme du profil en travers ;  $n_3$  : facteur correctif des effets des obstacles ;  $n_4$  : facteur correctif de l'effet de la présence de la végétation sur les berges et  $m_5$  : facteur correctif du degré de méandre dans la rivière.

**Tableau V-1** : valeurs des différents facteurs de la formule de Cowan [Carlier, 1980]

Facteurs	Caractéristiques	Valeur
$n_0$	Terre	0.020
	Roche	0.025
	Gravier	0.024
	Gravier grosse	0.028
$n_1$	Parois lisse	0.001
	Parois présente une mégère irrégularité	0.005
	Parois présente une irrégularité modérée	0.010
	Parois présente une irrégularité importante	0.020
$n_2$	Variations progressives du profil en travers	0.000
	Variations altérées du profil en travers	0.005
	Variations altérées fréquentes du profil en travers	0.001 à 0.015
$n_3$	Obstruction négligeable	0.000
	Obstruction faible	0.010 à 0.015
	Obstruction appréciable	0.030 à 0.040
	Obstruction importante	0.060
$n_4$	Végétation faible	0.005 à 0.010
	Végétation modérée	0.010 à 0.025
	Végétation importante	0.025 à 0.050
	Végétation très importante	0.050 à 0.100
$m_5$	Influence des méandres modérés	1.000
	Influence des méandres appréciable	1.250
	Influence des méandres importante	1.300

## IV.2. Définition des conditions initiales

Pour les conditions initiales on doit choisir la cote d'eau initiale et les débits initiaux selon l'axe des x et y.

## IV.3. Définition des conditions aux limites

Dans cette étape, on doit définir le type des arêtes entrantes et sortantes, ainsi que les courbes temporelles tel que l'hydrogramme de crue et la courbe de cote d'eau en fonction du temps.

## IV.4. Définition des paramètres de calcul.

Les paramètres qu'on va définir sont stockés dans un fichier (\*.par).

### a) *L'accélération de la pesanteur*

C'est la valeur de l'accélération de la pesanteur qui correspond à la région ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  comme valeur par défaut).

### b) *Calcul à nombre de courant constant ou non (le paramètre icfl)*

Cette option permet de conserver le pas de temps pendant le calcul. Pour ne pas conserver le pas de temps, il faut choisir l'option de calcul à nombre de courant constant (introduire le pas de temps initial **icfl** égal à 1). Sinon, le pas sera conservé durant tout le calcul (**icfl** = 0).

### c) *Conditions aux limites variables dans le temps ou non (paramètre iclvar)*

0 : si les conditions aux limites sont fixées dans le temps ;

1 : si les valeurs aux limites sont fluctuantes dans le temps.

### d) *Correction de Van Leer (le paramètre alpha)*

Représente la valeur de pente pour les schémas de Van Leer. La valeur est comprise entre 0.5 et 1 (0.6 par défaut).

Plus la valeur est proche de 1, plus on a de la précision mais le schéma sera moins stable.

### e) *Définition du type de frottement (le paramètre iofr)*

1 : pour **Chézy** ;

2 : pour **Strickler**.

**f) Calcul avec ouvrage ou non (le paramètre *Iosmb*)**

Ce paramètre permet de définir le calcul vis-à-vis de la présence d'ouvrages ou pas, aux apports de pluies...etc.

**Iosmb** = 3 : si il y a des ouvrages ;

**Iosmb** = 0.2 : pas d'ouvrage ;

**Iosmb** = 2.3 : si il y a des apports de pluies.

**g) Pas de temps de sauvegarde (le paramètre *dtr*)**

Ce paramètre représente le pas du temps de sauvegarde des lignes d'eau dans les fichiers (\*.tps), (\*.env) et (\*.out), le temps est compté depuis le début de chaque simulation, il ne doit pas être trop petit pour éviter des fichiers très importants.

**h) Précision sur les hauteurs (le paramètre *paray*)**

Ce paramètre représente la précision sur les hauteurs d'eau, autrement dit c'est la hauteur minimale au dessous de laquelle, les hauteurs sont considérées comme nulles. ( $10^{-4}$  m comme valeur par défaut).

**i) Reprise de calcul (le paramètre *irep*)**

Si on choisit cette option (**irep** = 1), c'est le cas de la reprise d'un calcul (après une ou plusieurs simulations) précisée par un temps et une ligne d'eau lue dans un fichier (\*.tps). Les fichiers (\*.tps) et (\*.env) précédents sont relus.

Dans le cas du calcul sans reprise (**irep** = 0), le RUBAR20 utilise directement le fichier (\*.cin) comme fichier des conditions initiales.

**j) Schéma de calcul (paramètre *ischem*)**

Ce paramètre permet de définir le type de schéma numérique, il vaut :

1 : pour schéma de **Van Leer** d'ordre 1 en temps ;

2 : pour schéma de **Van Leer** d'ordre 1 en temps et en espace (ce schéma est plus précis).

Si on ne fait pas le choix, alors **ischem** = 2 est prise par défaut.

## **Conclusion**

La construction du maillage de calcul est une tâche très importante pour lancer la simulation des crues dans les cours d'eau, et la précision des résultats obtenus dépendent de la qualité du maillage réalisé.

Dans l'étape suivante, nous allons lancer une simulation de la crue centennale dans l'oued Belghanem par le logiciel présenté dans ce présent chapitre.



## Chapitre VI

# SIMULATION DE LA CRUE CENTENNALE DE L'OUED BELGHANEM ET VISUALISATION DES RESULTATS

## Introduction

Par définition, simuler c'est faire paraître comme réel ce qui ne l'est pas, et toutes les sciences utilisent la simulation afin de créer des modèles pour tester ou représenter un phénomène quelconque.

Dans ce présent chapitre, nous allons exploiter les résultats du chapitre (II) et (V) pour lancer la simulation de la crue centennale, visualiser les résultats obtenus, afin de détecter les points de dysfonctionnement dans le cours d'eau et de délimiter les zones inondables.

### I. Simulation de la crue

Avant de lancer la simulation, nous allons définir certains paramètres nécessaires pour obtenir une simulation précise et plus proche de la réalité pour la crue considérée. Ces paramètres sont : les conditions aux limites, les conditions initiales, les paramètres de calcul et les ouvrages existant dans le cours d'eau.

#### I.1. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont fixées sur les arêtes extérieures de maillage, grâce au programme Fudaa-Prepro.

L'application correcte de ces conditions est indispensable pour obtenir des résultats fiables et précis.

Les conditions qu'on doit appliquer sur notre modèle de calcul sont :

Sur l'arête d'entrée, on doit définir un groupe de débit, qui est composé d'un débit normal qui est l'hydrogramme de crue (calculé au chapitre II) et un débit tangentiel considéré comme nul car les arêtes sont perpendiculaires à la direction de l'écoulement (figure VI-1).

Sur la même arête, on doit définir aussi la cote d'eau en fonction du temps et pour la crue considérée (figure VI-2).

Pour l'arête de sortie, on suppose qu'elle est libre.

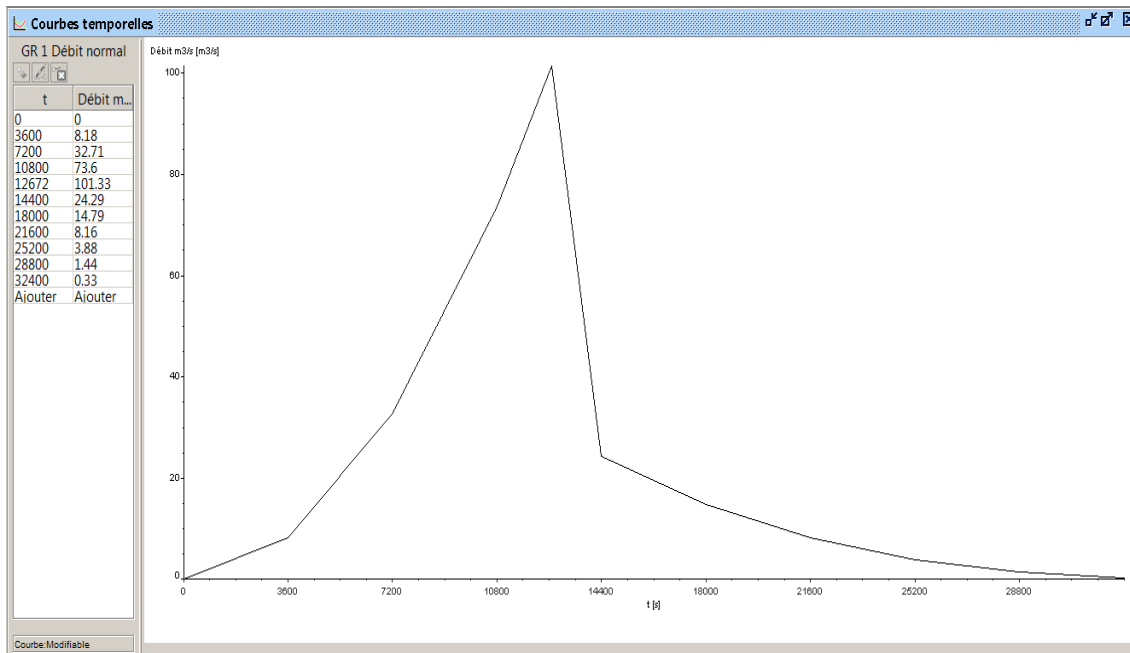


Figure VI-1 : données pour les arêtes d'entrée (hydrogramme de crue)

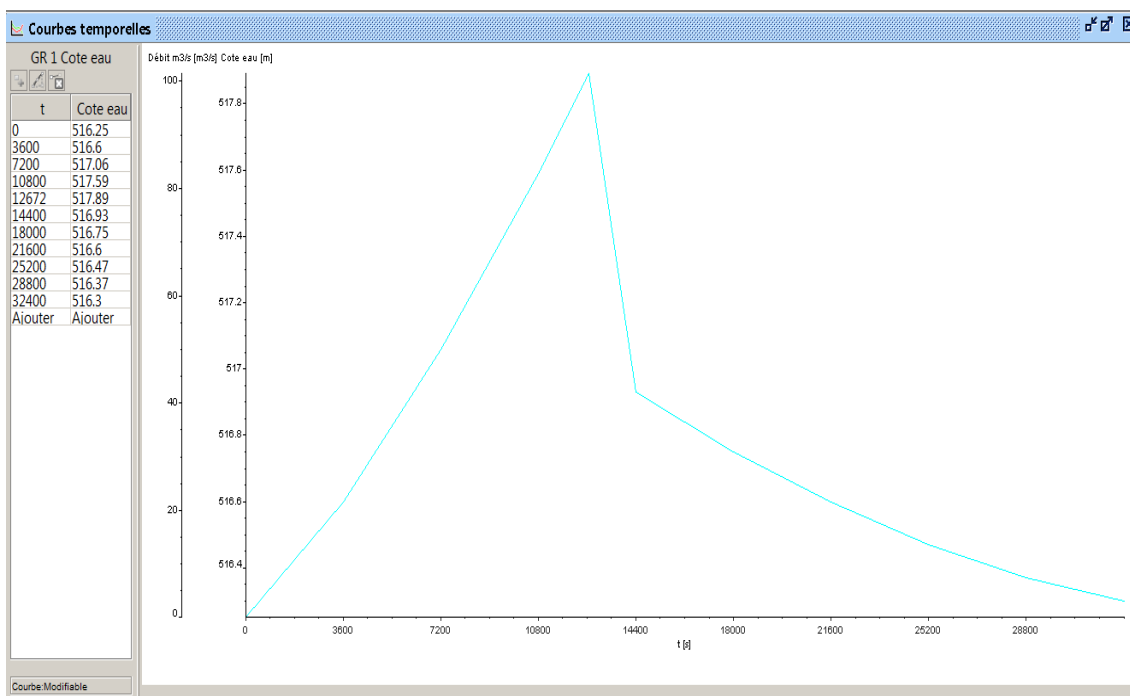


Figure VI-2 : données pour les arêtes d'entrée (côte d'eau)

## I.2. Conditions initiales

Les conditions initiales qu'on doit définir sont : le frottement, la hauteur d'eau et les débits selon x et y. Ces conditions sont appliquées au centre de chaque maille.

Dans notre cas, nous avons supposé pour l'ensemble du domaine que la hauteur d'eau et les débits dans le cours d'eau sont nuls (figure VI-3).

E Nouveau projet

Choix du type de projet Courantologie 2D

Les valeurs saisies ci-dessous seront appliquées sur tous les noeuds

**Frottement**

Frottement par défaut 25.0

**Conditions initiales**

Hauteur d'eau/Cote eau Hauteur d'eau

Hauteur d'eau 0.0

Débit/Vitesse Débit

Débit selon X 0.0

Débit selon Y 0.0

Concentration Concentration

Concentration

Valider

Figure VI-3 : définition des conditions initiales par le programme Fudaa-Prepro

### I.3. Présentation des ouvrages existant

La représentation des bâtis et des ouvrages est une tâche compliquée. Lorsque le fichier (\*.dat) du maillage est déjà généré, le programme ECRMUR permet de construire le fichier (\*.ouv) qui contient les bâtiments et les ouvrages.

Dans notre cas, nous avons utilisé le programme Fudaa-Prepro pour insérer les bâtiments et les ouvrages dans le cours d'eau (figure VI-4).

Nous avons commencé à introduire les bâtiments et les ouvrages par la sélection de la maille ou des mailles où il y a présence d'un bâtiment ou d'un ouvrage. Le programme nous permet de choisir plusieurs types d'ouvrage élémentaires tel que : déversoir, brèche, etc.

Pour chaque ouvrage on doit introduire les caractéristiques spécifiques comme : longueur de déversement, côte de seuil, côte de mise en charge et le coefficient de débit, en effet, Les ouvrages seront représentés par un contour vert clair.

Cependant, l'oued Belghanem traverse une zone urbaine très dense et d'une manière très anarchique comme ça a été montré au chapitre IV, ce qui rend très difficile la représentation des maisons et des ouvrages dans le cours d'eau par le programme Fudaa-Prepro.

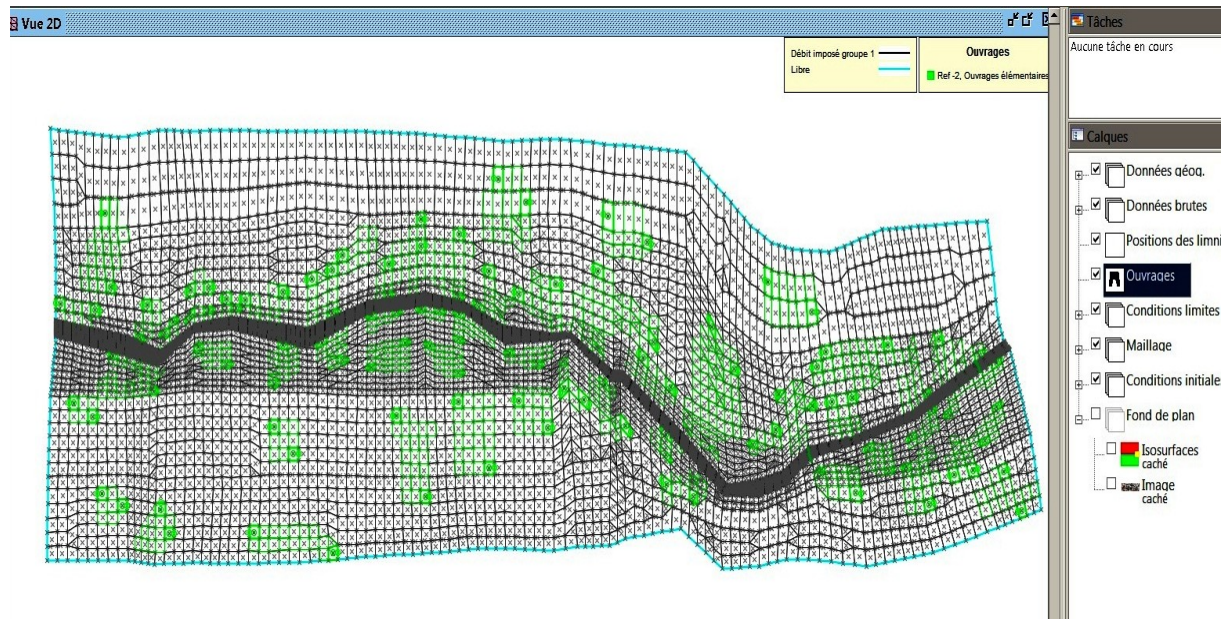


Figure VI-4 : représentation des ouvrages par le programme Fudaa-Prepro

#### I.4. Paramètres de calcul

Les différents paramètres de calcul sont :

- Accélération de la pesanteur :  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  ;
- Coefficient de frottement à la paroi : 0 ;
- Conditions aux limites variables dans le temps : oui ;
- Densité de l'eau : 1 ;
- Pas de temps de sauvegarde : 1 s ;
- Précision sur les hauteurs :  $10^{-4} \text{ m}$  ;
- Reprise de calcul : non ;
- Schéma de calcul: Van Leer ordre 2 ;
- Temps début de calcul : 0 ;
- Temps fin de calcul : 32400 s ;
- Valeur de nombre de courant : 0.5 ;
- Valeur pas de temps initial : 3 s ;
- Vitesse du vent selon x : 0 m/s ;
- Vitesse du vent selon y : 0 m/s.

## II. Visualisation des résultats

Après l'introduction des paramètres de calcul, les conditions initiales, les conditions aux limites et les courbes temporelles (côte d'eau et hydrogramme de crue). On lance la simulation à l'aide du programme d'exécution Fudaa-Prepro qui fait appel au logiciel RUBAR20 pour un temps de calcul de 32400 s avec un pas du temps égale à 1 s (figure VI-5).

```

C:\Windows\system32\cmd.exe - rubar.bat
installation\rubar20.exe" chchh.par
RUBAR20 : EQUATIONS ST-VENANT 2D PAR VOLUMES FINIS
VERSION 25 JUIN 2000
CEMAGREF LYON, FRANCE
DONNEZ EN 6 CARACTERES LE NOM DE L'ETUDE
chchh
LECTURE DONNEES DIVERSES
LECTURE DONNEES MAILLAGE
CALCUL DONNEES COMPLEMENTAIRES ARETES
LECTURE CONDITIONS INITIALES
CALCUL DONNEES COMPLEMENTAIRES ELEMENTS
CONDITIONS INITIALES EN DEBITS
LECTURE FROTTEMENTS EN STRICKLER
LECTURE CONDITIONS AUX LIMITES
DEBIT CALCULS SCHEMA DE WANLEER2
CALCUL AU TEMPS : 1.000000000000007
CALCUL AU TEMPS : 2.000000000000013
CALCUL AU TEMPS : 2.999999999999998
CALCUL AU TEMPS : 3.999999999999995
CALCUL AU TEMPS : 4.999999999999993
CALCUL AU TEMPS : 5.999999999999991
CALCUL AU TEMPS : 6.999999999999989
CALCUL AU TEMPS : 7.999999999999987
CALCUL AU TEMPS : 8.999999999999985
CALCUL AU TEMPS : 9.999999999999983
CALCUL AU TEMPS : 10.999999999999981
CALCUL AU TEMPS : 11.999999999999979
CALCUL AU TEMPS : 12.999999999999977
CALCUL AU TEMPS : 13.999999999999974
CALCUL AU TEMPS : 14.999999999999972
CALCUL AU TEMPS : 15.999999999999970
CALCUL AU TEMPS : 16.999999999999968
CALCUL AU TEMPS : 18.000000000000014
CALCUL AU TEMPS : 19.000000000000017
CALCUL AU TEMPS : 20.000000000000032
CALCUL AU TEMPS : 21.000000000000048
CALCUL AU TEMPS : 22.000000000000064
CALCUL AU TEMPS : 23.000000000000079
CALCUL AU TEMPS : 24.000000000000095
CALCUL AU TEMPS : 25.000000000000111
CALCUL AU TEMPS : 26.000000000000126
CALCUL AU TEMPS : 27.000000000000142
CALCUL AU TEMPS : 28.000000000000157
CALCUL AU TEMPS : 29.000000000000173
CALCUL AU TEMPS : 30.000000000000189
CALCUL AU TEMPS : 31.000000000000204
CALCUL AU TEMPS : 32.000000000000222
CALCUL AU TEMPS : 33.000000000000240
CALCUL AU TEMPS : 34.000000000000258
CALCUL AU TEMPS : 35.000000000000276
CALCUL AU TEMPS : 36.000000000000294
CALCUL AU TEMPS : 37.000000000000312
CALCUL AU TEMPS : 38.000000000000330
CALCUL AU TEMPS : 39.000000000000348
CALCUL AU TEMPS : 40.000000000000366

```

Figure VI-5 : fenêtre d'exécution

La simulation est terminée après 62 heures de calcul par ordinateur (station de calcul HP Intel R, Core i7-2600 CPU @ 3.40 GHz, 8.00 Go de RAM) au laboratoire d'hydraulique.

Le fichier d'enregistrement de la simulation porte l'extension (\*.tps). Ce dernier contient les différents résultats de la simulation tels que : les hauteurs d'eau, les côtes d'eau, les débits, vitesse et le sens de l'écoulement à chaque instant  $t$  en (s).

Pour mieux comprendre le comportement de la crue dans l'oued Belghanem nous avons présenté l'étendue de la crue (hauteur d'eau) pour différents pas de temps (pendant la période de montée, à la pointe de la crue et pendant la décrue). Dans ce qui va suivre nous allons présenter les résultats obtenus sous forme de figures pour chaque période de simulation.

## II.1. Période de montée

Dans cette période nous visualisons l'évolution de la crue pour deux instants, à  $t = 3000$  s et à  $t = 5000$  s.

A l'instant  $t = 3000$  s, nous remarquons bien que la hauteur d'eau atteint 1,38 m dans le lit de l'oued et certains endroits dans les rives gauches et droites sont inondées (figure VI-6), vu que la présence des zones de dépression dans ces endroits.



Figure VI-6 : étendue de la crue à  $t = 3000$  s

A  $t = 5000$  s, la crue arrive à inonder un rayon d'environ 400 m avec une hauteur d'eau de 0.7 m (figure VI-7). En effet, la hauteur d'eau a augmenté jusqu'à 2.4 m (en jaune) dans la zone où le rétrécissement est brutal à la fin du premier tronçon.



Figure VI-7 : étendue de la crue à  $t = 5000$  s

## II.2. Au sommet de l'hydrogramme

A  $t = 12672$  s c'est la pointe de la crue qui correspond à un débit  $Q_{100} = 101.33 \text{ m}^3/\text{s}$ . A cet instant, on voit bien que la crue arrive à l'exutoire avec une hauteur de 1m.

Nous remarquons un débordement de l'eau pratiquement le long de tout l'oued à cause de l'inexistence des berges. La hauteur d'eau arrive à son maximum qui est de 3.45 m (en rouge) au niveau de rétrécissement brutal et au changement de direction avant d'arriver au pont de Hamraia, ce dernier est totalement submergé (hauteur d'eau de 2.5 m), il forme un obstacle pour l'écoulement, mais par contre au pont exutoire la hauteur d'eau est de 1 m comme le montre la figure ci-dessous :

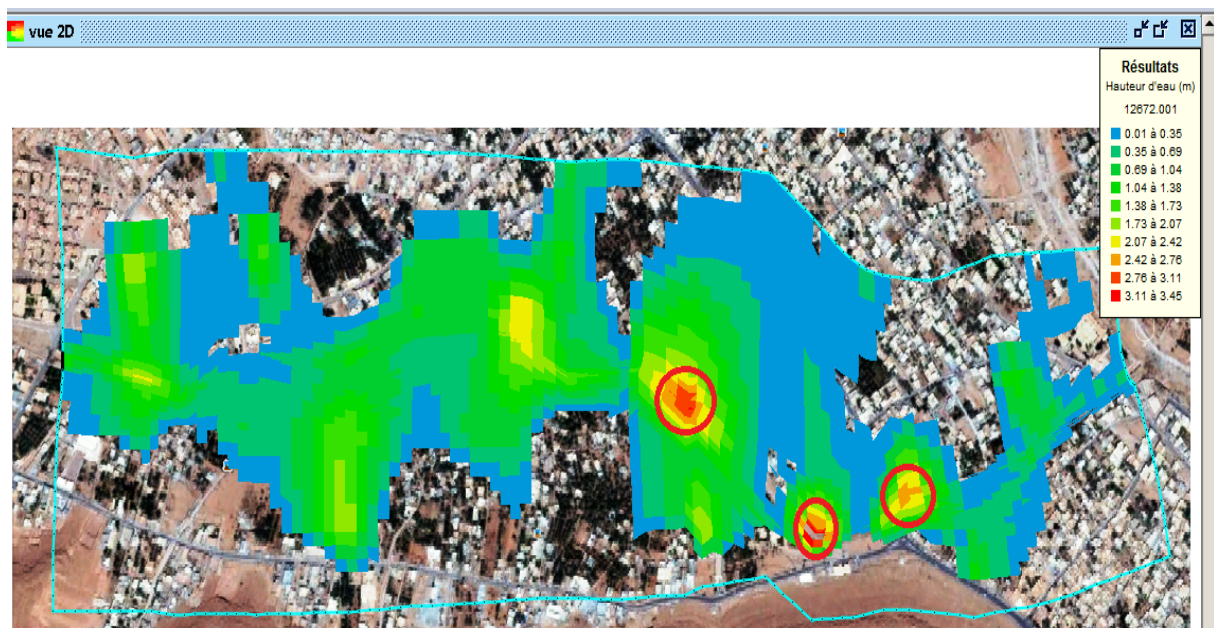


Figure VI-8 : étendue de la crue à  $t = 12672$  s

Le logiciel RUBAR20, nous permet d'avoir une idée sur le sens de l'écoulement ainsi que la vitesse (figure VI-9), indiqué par des vecteurs dans n'importe quel moment.

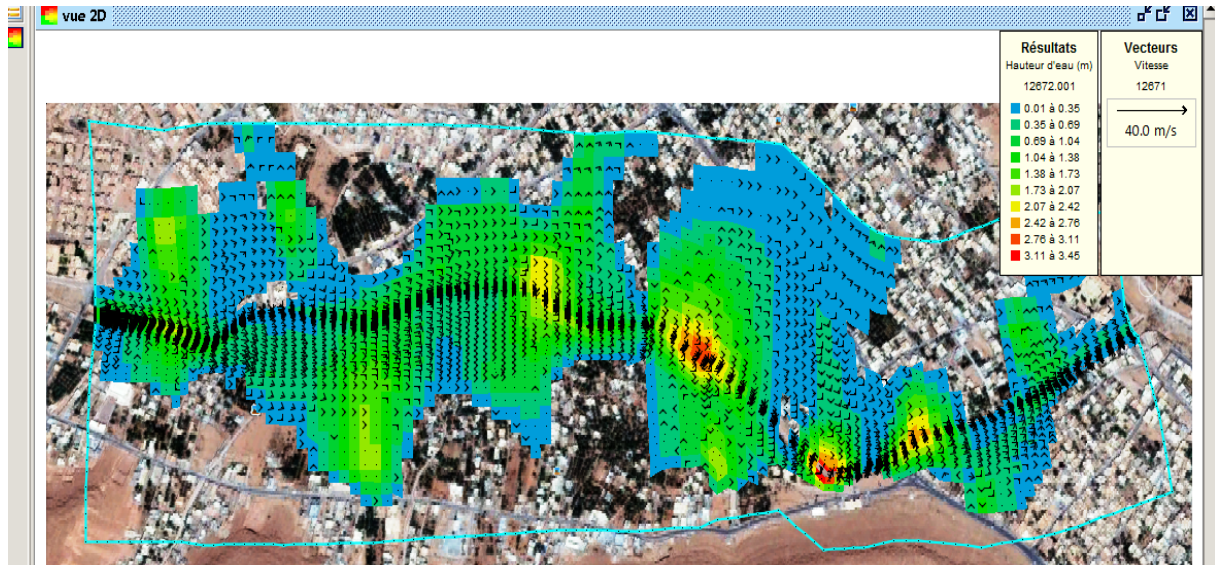


Figure VI-9: directions des vitesses à  $t = 12672$  s

### II.3. Période de décrue

A  $t = 32400$  s, ce qui correspond à la fin de la crue, nous remarquons une stagnation des eaux dans certain endroits au bord de l'oued, mais au niveau du rétrécissement la hauteur d'eau a diminué jusqu'à 2.7 m et reste environ 2 m en aval du pont de Hamraia comme le montre la suivante :

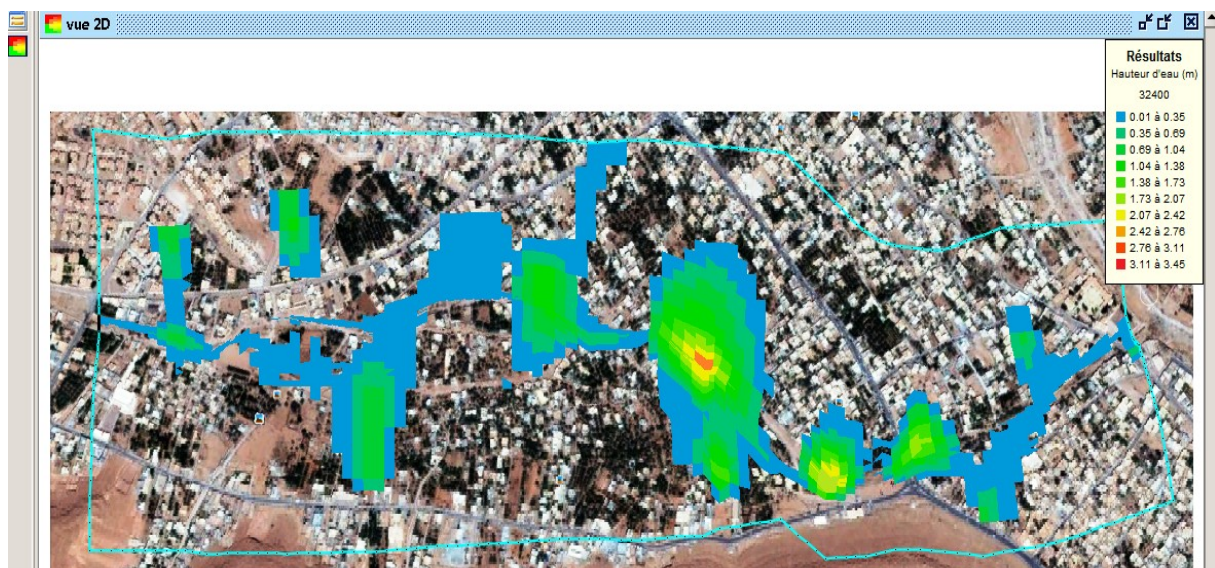


Figure VI-10 : étendue de la crue à  $t = 32400$  s



## Conclusion

Malheureusement pour notre zone d'étude, nous ne disposons pas de données hydrométriques et des mesures de débit. Par conséquent le calage du modèle n'a pas été fait.

Nous concluons à partir des résultats obtenus de cette simulation, que la ville de Belghanem a été totalement touchée et inondée par la crue centennale qui est une donnée de base pour logiciel RUBAR20, en effet, la cause principale est la construction anarchique au bord du cours d'eau, présence des singularités à savoir : les rétrécissements, les élargissements et les changements de directions dans plusieurs zones.

A l'aide de cette simulation, nous sommes arrivés à découvrir les zones de dysfonctionnement qui gênent l'écoulement dans l'oued pendant la période de crue.

Un réaménagement de l'oued Belghanem est nécessaire qui sera notre objectif au prochain chapitre, afin d'éviter d'avoir les mêmes conséquences et de minimiser les dégâts et les catastrophes provoqués par les crues violentes dans le futur.

## Chapitre VII

# AMÉNAGEMENT DE L'OUED BELGHANEM

## Introduction

Suite aux observations rencontrées lors du diagnostic de l'oued (chapitre IV) et aux résultats de la simulation de la crue centennale (chapitre VI), et après la visualisation de ces derniers, nous avons constaté un débordement quasi-total de l'oued Belghanem tout le long du tronçon étudié. En effet, nous allons voir dans ce présent chapitre comment établir un plan d'aménagement de cet oued accompagné d'une vérification par logiciel RUBAR20 afin de transiter la crue centennale dans l'oued sans avoir des inondations ou des débordements de ce dernier vers la ville.

### I. Principe de base d'aménagement

Avant tout projet de réhabilitation d'un cours d'eau, il faut respecter les principes suivants :

- La section du cours d'eau doit être suffisante pour évacuer l'eau sans provoquer des inondations ou de dégâts importants.
- Tout aménagement ne devra pas provoquer d'érosion dans le cours d'eau ou sur les berges car cette érosion signifie la modification de la section d'écoulement, la perte de terrain riverain, le transport de sédiments, l'ensablement et l'envasement de la partie aval du cours d'eau.
- Les talus du cours d'eau et la section d'écoulement devront être les plus stables possibles pour que le cours d'eau ait la durée de vie la plus longue.
- Les coûts de construction et d'entretien devront être minimisés.

### II. Données de base existante pour l'aménagement

Pour les besoins d'étude et dans le cadre de la réhabilitation d'oued Belghanem, nous avons utilisés des vues aériennes de la zone d'étude par Google earth, un levé topographique sous AutoCAD, la synthèse hydrologique du bassin versant (chapitre II) et les résultats de la simulation obtenus par RUBAR20.

Pour assurer une protection contre les inondations. La période de retour choisi est 100 ans qui correspond à un débit  $Q_{100} = 101.33 \text{ m}^3/\text{s}$  (chapitre II, tableau 10).

### III. Techniques d'aménagement

Les ouvrages de protection peuvent être répartis en deux groupes : directes et indirectes.

#### III.1. Protection directe

La protection directe consiste à intervenir directement sur le site menacé par la mise en œuvre des actions suivantes :

- ❖ **Curage** : Qui permet une nette amélioration des conditions d'écoulement suite à l'élimination de tous les obstacles et les dépôts entravant l'écoulement des eaux dans le cours d'eau. Le débroussaillage est également nécessaire à la traversée des agglomérations pour des raisons sanitaires et en sections courantes pour diminuer la rugosité et accroître la débitante.
- ❖ **Recalibrage** : Qui permet d'élargir et d'approfondir les sections des cours d'eau pour augmenter leur capacité d'évacuation des eaux et assurer une section mouillée répondant aux critères de protections désirées.
- ❖ **Renforcement des ouvrages** : De franchissements des oueds et modification de leurs caractéristiques et des systèmes existants en cas de leur insuffisance (ponts, dalots, buses...).
- ❖ **Réalisation des canaux** : 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 des bâtiments ou par la voirie.
- ❖ **Protection des berges** : Qui comprend tout ouvrage visant à maintenir la stabilité des terres en dépit de l'action de l'eau. Les berges sont en effet attaquées par des courants perturbateurs générés par les crues. De même, les terres glissent par suite de l'infiltration de l'eau après le retrait de la crue. La protection des berges est également nécessaire au voisinage de certains ouvrages tels que les ponts.
- ❖ **Endiguement des oueds** : Par la réalisation de digues qui longent le cours d'eau sur ses deux berges. Cette opération est aisément réalisable par les ressources locales en main-d'œuvre et en matériaux. Par ailleurs, ce type de protection permet en outre de réaliser une protection sélective. Il peut en effet être établi graduellement en commençant par mettre à l'abri, de la plupart des crues, la partie la plus riche et la plus

peuplée des zones exposées. En contrepartie, on notera que ce procédé de protection présente l'inconvénient de provoquer une surélévation souvent notable du niveau des eaux et rend en outre plus difficile le drainage des terrains bas [Sghara, 2013].

### III.2. Protection indirecte

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

- ❖ **Création des canaux périphériques** : Pour dérivation des eaux vers les oueds permettant de les restituer vers des zones situées en dehors des aires à protéger. Cette déviation pourrait concerner une partie ou la totalité des eaux d'un oued vers un autre.
- ❖ **Réalisation des barrages** : Ou des seuils pour stockage et laminage des crues à l'amont des zones menacées. Le volume et la capacité de laminage du barrage devront être optimisés de manière à répondre au-mieux à la protection envisagée.
- ❖ **Aménagement des bassins versants** : Contre l'érosion par des méthodes biologiques et/ou par la construction de seuils en béton ou en gabions qui permettent la réduction des vitesses d'écoulement et le dépôt des sédiments en amont [Sghara, 2013].

## IV. Généralités sur les écoulements à surface libre

### IV.1. Définitions

Les écoulements à surface libre présentent par définition la particularité de comporter une surface libre en contact avec l'air, généralement soumise à la pression atmosphérique et dont la forme peut varier. Ce type d'écoulement se fait sous l'action de la force de gravité à cause de l'existence de la pente.

Les écoulements à surface libre en régime permanent peuvent présenter deux aspects :

- Si les caractéristiques géométriques du canal sont constantes tout le long de tronçon considéré, le régime est uniforme ;
- Dans le cas contraire, le régime est varié.

## IV.2. Canaux à ciel ouvert

On appelle canal, un système de transport dans lequel l'eau s'écoule et dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique. Le profil de meilleure conductivité est le profil qui véhicule le débit maximum. Pour un canal de pente "I" et de coefficient de rugosité "n", la section qui véhicule le débit maximum est celle où le rayon hydraulique est maximum.

## IV.3. Différents type de canaux

Il existe deux catégories de canaux : canaux naturel et canaux artificiel.

### a) *Canaux naturel*

Ce sont les cours d'eau qui existent naturellement sur (ou sous) terre; tels que les ruisselets, torrents, rivières, fleuves et estuaires. Les propriétés géométriques et hydrauliques des canaux naturels sont généralement assez irrégulières. L'application de la théorie hydraulique ne donne que des résultats approximatifs obtenus moyennant certaines hypothèses.

### b) *Canaux artificiel*

Ce sont des cours d'eau réalisés par l'homme sur (ou sous) terre tels que : les canaux découverts construits au ras du sol (canaux de navigation, d'adduction et d'évacuation, d'irrigation et de drainage) ou les canaux couverts dans lesquels les liquides ne remplissent pas toute la section (tunnels hydrauliques, aqueducs, drains, égouts). Les propriétés hydrauliques des canaux artificiels sont généralement assez régulières. L'application de la théorie hydraulique donne souvent des résultats satisfaisants.

## IV.4. Dimensionnement des canaux

Pour un écoulement lentement variable, on peut admettre qu'en toute section la pente de la ligne de charge est celle d'un régime uniforme.

### a) *Hypothèses des écoulements uniformes*

- Le débit de l'eau dans chaque section des tronçons proposés est constant ;
- Le canal est prismatique ;
- La profondeur  $h$  du courant est constante en sa longueur ;
- La pente de chaque section est constante ;
- La rugosité des parois est constante.

### b) Formules de calcul pour les canaux artificiels

La formule générale de l'écoulement prend la forme suivante :

$$U = C\sqrt{R_h J} \quad (\text{VII-1})$$

Avec,  $R_h$  : rayon hydraulique (le rapport entre la section mouillée  $S_m$  et le périmètre mouillé  $P_m$ ) ,  $J$  : pente de la surface libre et  $C$  : coefficient de Chézy en ( $\text{m}^{0.5}/\text{s}$ ). [Cartier, 1980]

De nombreux hydrauliciens ont proposé des expressions pour le coefficient  $C$  de la formule de Chézy (VII-1), à priori ce coefficient doit dépendre :

- De la forme de la section transversale ;
- De la nature des parois ;
- De la vitesse ou de la pente.

Nous citerons les formules les plus usuelles :

#### - Formule de Bazin

Bazin a établi la formule suivante :

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}} \quad (\text{VII-2})$$

$$\text{soit } U = \frac{87\sqrt{RJ}}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}} \quad (\text{VII-3})$$

Avec,  $\gamma$  : coefficient qui dépend de la nature des parois. Les valeurs suivantes correspondant à six catégories de parois (tableau VII-1) :

**Tableau VII-1** : valeur de  $\gamma$  en fonction de la nature des parois [Cartier, 1980]

Catégories	Nature des parois	$\gamma$
1	Parois très unies (ciment, bois raboté)	0.06
2	Parois unies (planches, briques, pierres de taille)	0.16
3	Parois en maçonnerie de moellons	0.46
4	Parois de nature mixte (sections en terre régulières)	0.85
5	Canaux en terre dans les conditions ordinaires	1.30
6	Canaux en terre avec fonds de galets, parois herbée	1.75

- Formule de Manning

Manning a proposé la formule suivante :

$$C = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{6}} \quad (\text{VII-4})$$

$$U = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (\text{VII-5})$$

Le coefficient n est variable suivant la nature des parois du canal.

- Formule de Strickler

Strickler a cherché à déterminer la valeur du coefficient n de la formule de Manning, en fonction de la dimension des matériaux constitutifs des parois du canal.

Pour des parois (fond et berges) en matériaux non cohérents (terre non revêtue), il propose la formule suivante :

$$k_s = \frac{1}{n} = 26 \left( \frac{R_h}{d_{35}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (\text{VII-6})$$

Avec,  $R_h$  (rayon hydraulique en m),  $d_{35}$  c'est le diamètre (en m) auquel correspond 35% (en poids) de matériaux de diamètre supérieur.

La formule de Manning-Strickler s'écrit alors :

$$U = k_s R_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (\text{VII-7})$$

Avec,  $K_s = 1/n$  : coefficient de Strickler en  $(\text{m}^{1/3}/\text{s})$ , il est en fonction de la nature du lit.

Les valeurs de  $K_s$  sont données dans le tableau suivant (VII-2) en fonction de la nature des parois :

**Tableau VII-2** : coefficient de Strickler en fonction de la nature des parois

Nature des parois	Valeur de $K_s$ , en $m^{1/3}/s$
Béton lisse	75-90
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30
Rivière à berge étroites très végétalisée	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en forêt	< 10

#### IV.5. Ecoulement critique

L'écoulement critique apparaît lorsque l'énergie spécifique de l'écoulement est minimale. L'énergie spécifique  $E$  est définie comme la somme de la hauteur d'écoulement et de la hauteur de l'énergie cinétique, soit :

$$E = h + \frac{U^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{2gS_m^2} \quad (\text{VII-8})$$

En observant la figure (VII-1), on constate que l'énergie spécifique est minimale lorsque la hauteur d'écoulement est égale à la hauteur critique. Cette valeur peut être obtenue par annulation de la dérivée de l'énergie spécifique par rapport à  $h$ .

$$\frac{dE}{dh} = 1 - \frac{Q^2}{gS_m^3} \frac{dS}{dh} = 0 \quad (\text{VII-9})$$

Sachant que  $dS = b(h)dh$ , l'équation (VII-9) devient :

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{S_m^3}{b} \quad (\text{VII-10})$$

Finalement on trouve :



$$\frac{Q^2 b}{g S_m^3} = 1 = F_r^2 \quad (\text{VII-11})$$

Ce qui signifie bien que, pour un régime critique le nombre de Froude est égal à 1. Au delà de cette valeur, l'écoulement est en régime torrentiel et en deçà, il est en régime fluvial.

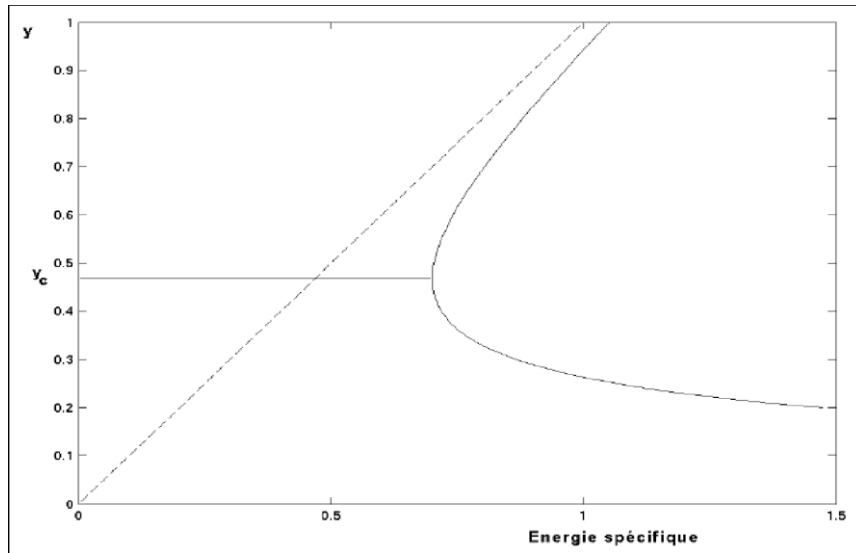


Figure VII-1 : diagramme d'énergie spécifique [Carlier, 1980]

#### a) Hauteur critique

À partir de l'équation (VII-10), il suffit de remplacer  $S_m$  par  $b * h_c$ , dans le cas d'un canal à section rectangulaire ( $S_m = b * h_c$ ), par la suite on obtient :

$$h_c = \left( \frac{Q^2}{g b^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{VII-12})$$

#### b) Pente critique

Une fois la hauteur critique est déterminée. On remplace ce dernier dans la formule de Manning Strickler, puis on obtient la formule suivante :

$$I_c = \frac{n^2 Q^2}{\alpha^2 S_m^2 R_h^{\frac{4}{3}}} \quad (\text{VII-13})$$

### IV.6. Hauteur normale

Pour un débit donné et une pente de canal fixée, l'écoulement s'effectue avec une certaine hauteur d'eau. Cette hauteur d'eau est ce que l'on appelle la hauteur normale. En comparant

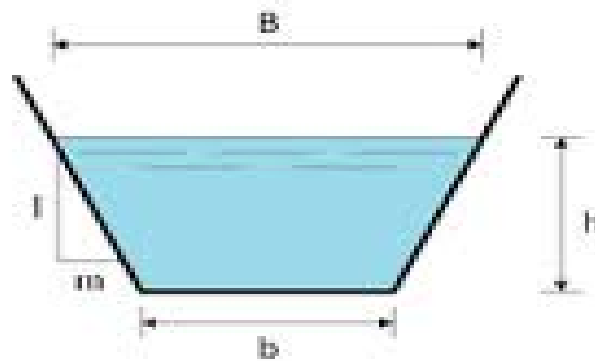
cette hauteur d'eau avec la hauteur critique, qui n'est pas fonction de la pente du canal, on est en mesure de déterminer si l'écoulement est fluvial, critique ou torrentiel. Cette information sera très utile lorsque l'on voudra évaluer les écoulements variés.

Le principe de base du calcul de la hauteur normale consiste à résoudre une équation de l'écoulement en termes de débit (Chézy, Manning-Strickler ou autre) de telle sorte que le seul inconnu soit la profondeur.

## V. Choix de section de la meilleure conductivité

Le profil de la meilleure conductivité est le profil qui véhicule le débit maximum  $Q_{\max}$ , dont le rayon hydraulique  $R_h$  est maximal, c'est à dire la section  $S_m$  soit maximale et le périmètre  $P_m$  soit minimal.

Notre choix portera sur la section trapézoïdale, dont les caractéristiques sont les suivantes :



**Figure VII-2** : canal trapézoïdal à ciel ouvert

Avec,  $m$  : fruit des talus,  $m = \cotg \varphi$  ;  $h$  : tirant d'eau maximum en (m) ;  $B$  : largeur supérieure du canal en (m) et  $b$  : largeur inférieure du canal en (m).

La section mouillée  $S_m$  et le périmètre mouillé  $P_m$  sont définis respectivement par les formules (VII-14) et (VII-15) :

$$S_m = h.(b + m.h) \quad (\text{VII-14})$$

$$P_m = b + 2.h.\sqrt{1 + m^2} \quad (\text{VII-15})$$

Le rayon hydraulique  $R_h$  sera max pour  $P_m$  minimal donc  $dP_m = 0$  et  $dS_m = 0$ , on obtient les deux formules suivantes :

$$dS_m = h.db + (b + 2.m.h) .dh = 0 \quad (\text{VII-16})$$

$$dP_m = db + 2.(1 + m^2)^{0.5}.dh = 0 \quad (\text{VII-17})$$

Les deux équations précédentes (VII-16 et VII-17) donnent :

$$b = 2.h [(1 + m^2)^{0.5} - m] \quad (\text{VII-18})$$

## VI. Aménagement de l'oued Belghanem

Parmi les propositions d'aménagement, plusieurs variantes sont souvent utilisées dans les projets de réhabilitation et de protection contre les crues. Dans ce qui va suivre, nous nous intéressons aux variantes les plus réalisables.

Notre choix est basé sur deux protections et qui sont :

- *Première variante* : construction d'un canal trapézoïdal à ciel ouvert en béton armé (protection directe).
- *Deuxième variante* : implantation de deux seuils de protection en poids (protection indirecte).

### VI.1. Première variante

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que, parmi les techniques d'aménagement par une protection directe : Réalisation des canaux dans le cas où le cours d'eau est occupé par les constructions. Cette solution est indispensable et pour cela, nous avons décidé de construire un canal trapézoïdal le long du domaine d'étude.

La largeur moyenne le long de tout l'oued est d'environ 20 m, donc la largeur supérieure sera inférieure ou égale à 15 m ce qui permet de laisser un passage pour les habitants sur les deux rives.

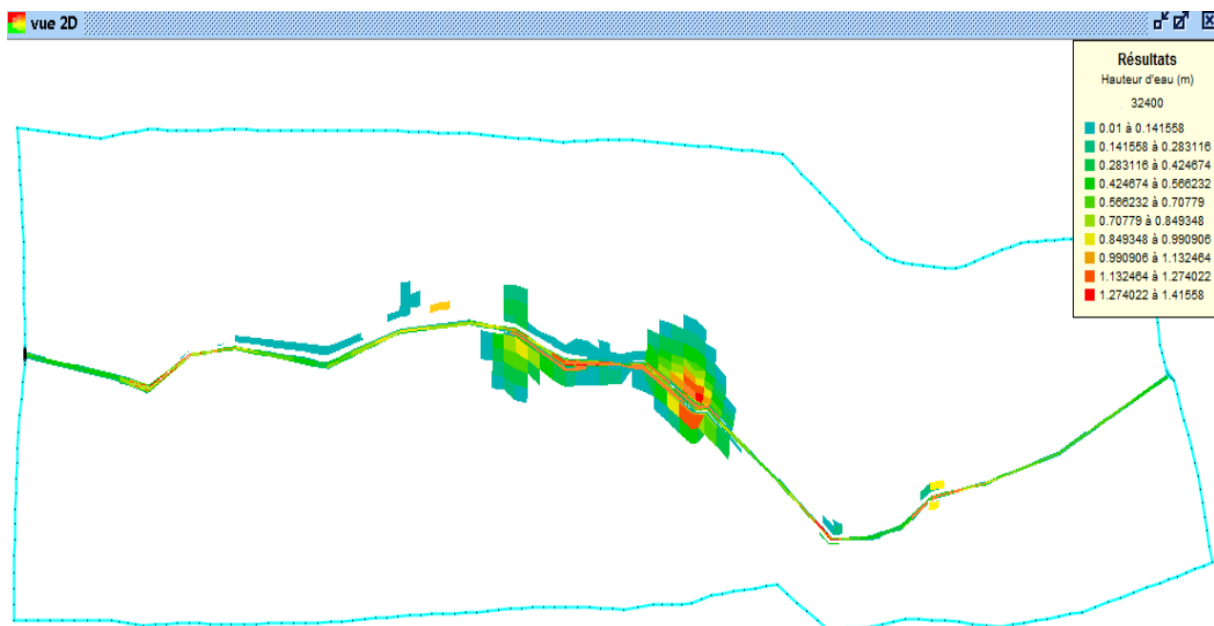
Sur la base de la simulation effectuée, la hauteur d'eau moyenne  $H_{\text{moy}}$  est de 1.8 m et par l'application des formules citées auparavant, nous arrivons à déterminer les caractéristiques géométriques et hydrauliques du canal à réaliser (tableau VII-3).

**Tableau VII-3** : caractéristiques du canal choisi

Débit de projet (Q)	101.33 m <sup>3</sup> /s
Longueur du canal (L)	2230.00 m
Largeur inférieur du canal (la base b)	8.00 m
Largeur supérieur du canal (B)	8.63 m
Hauteur du canal (h)	1.80 m
Pente du canal (I)	0.006 m/m
Coefficient de Strickler (K <sub>s</sub> )	75.00 m <sup>1/3</sup> /s
Fruit des talus (m)	0.176 ( $\alpha = 80^\circ$ )
Section mouillée (S <sub>m</sub> )	15.00 m <sup>2</sup>
Périmètre mouillé (P <sub>m</sub> )	11.70 m
Rayon hydraulique (R <sub>h</sub> )	1.28 m
Débit à évacuer	102.76 m <sup>3</sup> /s
Vitesse moyenne (V <sub>moy</sub> )	6.75 m/s

**Remarque :** Pour des mesures de sécurité, on ajoute une revanche de 0.2 m au canal. La hauteur de ce dernier sera donc  $h = 2$  m et le débit à évacuer :  $Q = 120.57$  m<sup>3</sup>/s.

Après la simulation de la crue centennale par RUBAR20 avec la première variante, nous avons remarqué des endroits où il y avait des débordements à cause de présence des singularités et par conséquent une apparition des eaux stagnantes après la décrue, comme nous le montre la figure (VII-3).

**Figure VII-3** : étendue de la crue après l'aménagement

## VI.2. Deuxième variante

Par définition, un seuil est un ouvrage déversant de faible hauteur construit dans le lit d'un cours d'eau dans le but de rehausser la ligne d'eau et non pas de stocker de l'eau.

Le lit du cours d'eau est barré totalement dans le sens de la largeur, et partiellement dans le sens de la hauteur. Les seuils ont généralement une hauteur varie entre 1 m et 3 m, parfois jusqu'à 5 m et très rarement au-delà, leur crête est en générale horizontale. Les plus courants sont de type poids en béton ou en maçonnerie.

Le profil classique d'un corps d'un seuil rigide en béton est celui d'un triangle ou d'un trapèze à parement amont vertical. Du point de vue hydraulique, la meilleure forme possible pour la partie haute du seuil est le profil Creager (figure VII-4), ce profil minimise l'impact du seuil sur la ligne d'eau amont en période de hautes eaux [Degoutte, 2006].

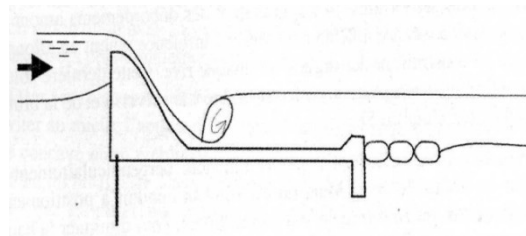


Figure VII-4 : seuil en béton profilé [Degoutte, 2006]

Les seuils ont pour but de :

- Stabiliser les lits des oueds à forte pente ;
- Diminuer la pente du lit pour obtenir l'équilibre ;
- Jouent le rôle d'un déversoir dénoyé pour les débits inférieur ou égale au débit de projet ;
- Amortissent la propagation de la crue dans les périodes de forte crue par diminution de sa vitesse de propagation ;
- Interdisent les riverains de considérer le lit de l'oued comme une voirie.

## VI.3. Précaution contre l'affouillement aval

Avant de construire un seuil, il faut prendre en considération des précautions contre l'affouillement aval. Il y a deux grands types de protection en cas de fondation alluviale. Le premier consiste à laisser la fosse se créer, mais à construire un para fouille aval vertical suffisamment profond pour empêcher tout affouillement sous le seuil (figure VII-5). Le second principe de protection consiste à prolonger le seuil par un bassin dissipateur d'énergie,

mais le seul inconvénient pour le deuxième type, son coût qui est très élevé du point de vue économique et pour cela, nous avons opté pour le choix des seuils sans bassin de protection qui est le premier type (figure VII-5). Dans ce cas, un parafouille aval est indispensable. Le calcul de sa hauteur nécessite tout d'abord d'évaluer la profondeur sous le niveau aval  $f$  de la fosse d'affouillement due à la chute d'eau de hauteur  $h$  pour le débit unitaire de la crue la plus pénalisante  $q$ . elle peut être estimée par recours à des formules empiriques, citons par exemple la formule de Veronese [Degoutte, 2006] :

$$f = 1,90 \cdot h^{0,225} \cdot q^{0,54} \quad (\text{VII-19})$$

Tel que  $f, h$  en (m) et  $q$  en ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

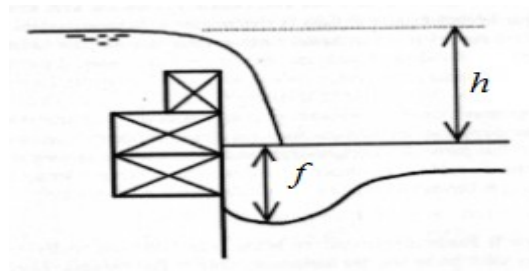


Figure VII-5 : seuil vertical sans bassin avec fosse d'érosion [Degoutte, 2006]

#### VI.4. Emplacement des seuils

Vue les résultats présentés par la figure (VII-3), nous recommandons de placer un seuil dans la section 1 et un autre dans la section 3, comme le montre la figure ci-dessous :

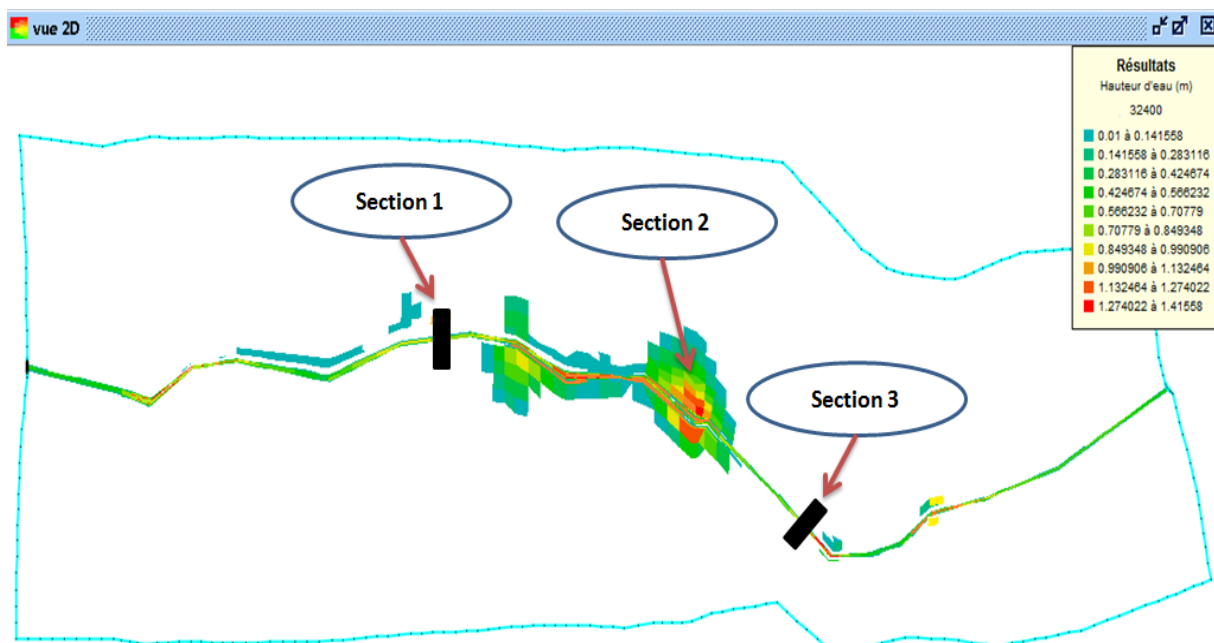


Figure VII-6 : emplacement des seuils dans le cours d'eau

## Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous avons proposé deux variantes pour la réhabilitation de l'oued Belghanem. La première c'est la construction d'un canal trapézoïdal en béton le long de tout l'oued et la deuxième c'est la réalisation de deux seuils de protection en poids dans deux endroits ciblés comme le montre la figure (VII-6).

Nous avons relancé la simulation par RUBAR20 pour la vérification du comportement de la crue centennale dans l'oued avec les variantes d'aménagement et par la suite, nous avons constaté aucun débordement du cours d'eau sauf dans la zone où elle est indiquée par la section 2 dans la figure (VII-6) à cause de la présence d'un rétrécissement brutale suit d'un changement de direction en arc de cercle. Donc le dimensionnement d'un convergent est nécessaire (objectif du mémoire de master de Mr. MERABET) afin d'assurer une sécurité totale lors de passage des crues violentes et dévastatrices, ainsi que, nous avons remarqué un débordement au niveau du pont de Hamraia qui nécessite un redimensionnement avant toute intervention dans l'oued dans le but d'améliorer les conditions d'écoulement à travers ce dernier en amont ou en aval.

Avant toute intervention ou travaux d'aménagement dans l'oued, il est important de débiter par :

- Un curage et nettoyage du lit de cours d'eau par l'enlèvement des déchets solide accumulés ou rejetés dans l'oued ainsi que l'élimination de la végétation spontanée ;
- Le redimensionnement des ouvrages de franchissement (pont de Hamraia et pont exutoire) et évacuation des déblais qui se trouvent à l'intérieur des buses pour éviter l'obstruction et le bouchage de ces derniers par les racines, les déchets solide ou autre... ;
- La reconstruction de réseau d'assainissement dans un endroit loin de l'oued, même pour les autres réseaux (AEP, gaz, électrique, etc...).

## Conclusion générale

Les inondations provoquant des dégâts humains et matériels qui peuvent être catastrophique, surtout dans les zones urbaines. Donc il faut faire certain aménagement pour minimiser et amortir ces dégâts.

La modélisation hydrodynamique des inondations, est un outil indispensable pour la compréhension de comportement des crues lors de passage de celles-ci dans les oueds.

L'indisponibilité et l'inexistence des mesures de débit dans l'oued, nous a obligés de faire une estimation de l'hydrogramme de la crue centennale par la méthode de Sokolovski, afin que nous puissions déterminer le débit de projet.

Notre travail a été fait à l'aide du code de calcul RUBAR20, qui se présente sous forme d'un ensemble de sous programmes exécutables. Ce caractère fait que la manipulation du code soit un peu difficile et que la simulation peut durer quelque jours. Cependant, Les résultats obtenus par la simulation de la crue centennale nous confirment bien que la ville de Belghanem est très vulnérable au risque d'inondation et que la crue elle s'est propagée rapidement.

Pour améliorer cette étude dans le futur, nous recommandons d'installer au moins une station hydrométrique en amont du bassin versant, dans le but d'avoir une bonne précision sur les hauteurs d'eau, ainsi que les débits à chaque instant.

Enfin, nous espérons que nous avons contribué par le biais de ce modeste travail à remédier aux risques d'inondation de la ville de Belghanem et que les solutions proposées pour l'aménagement du cours d'eau seront pris en considérations par les autorités locales et seront réaliser au futur, afin d'assurer la longévité et le bon fonctionnement des ouvrages hydrauliques et la sécurité des citoyennes, leur bien et les terres agricoles contre les inondations.



## Références bibliographiques

**ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques),** (2003). « Note relative a l'étude de la nappe phréatique ». Direction régionale Sud Ouargla.

**Ali Azouaou, F.,** (2009). « Simulation de la crue d'octobre 2008 dans la commune Ghardaïa via le code de calcul RUBAR20 ». Mémoire de projet de fin d'étude, ENP d'Alger, 78 pages.

**Baza, M.,** (2014). « Etude de la réhabilitation de l'oued El hamiz ». Mémoire de projet de fin d'étude, ENP d'Alger, 119 pages.

**Bouach, A.,** (2011). « Simulation numérique du transport solide par charriage via le code RUBAR20TS ». Mémoire de Magister, ENP d'Alger, 122 pages.

**Bounouadj, A.,** (2001). « Contribution à l'étude des inondations dans la vallée du M'Zab (wilaya de Ghardaïa) ». Mémoire de Magister, ENSH, Blida, 134 pages.

**Carlier, M.,** (1980). « Hydraulique générale et appliquée ». Edition Eyrolles, 567 pages.

**Degoutte, G.,** (2006). « Diagnostic, aménagement et gestion des rivières- hydraulique et morphologie fluviales appliquées ». Tec & doc -Lavoisier, 394 pages.

**Djebali, K.,** (2014). « Etude de protection d'une ville contre les inondations cas de la vallée de Abadia (Ain Defla) ». Mémoire de projet de fin d'étude, ENSH, Blida, 170 pages.

**Dubief, J.,** (1953). « Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara ». Institut de Météorologie et Physique du Globe de l'Algérie, 451 pages.

**Goudjil S., Kaci D.,** (2009). « Recalibrage d'un tronçon de l'oued M'Zab (El Atteuf) ». Mémoire de projet de fin d'étude, ENP d'Alger, 72 pages.

**Liamas, J.,** (2006). « Hydrologie générale : principe et application ». Gaitan Morin, Quebec, 487 pages.

**Mokeddem, H.,** (2014). « Etude d'aménagement de l'oued Réghaïa ». Mémoire de projet de fin d'étude, ENP d'Alger, 78 pages.

**Nacer, B.,** (2011). « Simulation de l'écoulement dans la palmeraie de Ghardaïa cas de la crue d'octobre 2008 ». Mémoire de projet de fin d'étude, ENP d'Alger, 109 pages.

**Paquier, A.,** (2008). « Estimation des écoulements de surface pour une crue extrême en milieu urbanisé ». Rapport de synthèse, Irstea, Unité de Recherches Hydrologie Hydraulique, Lyon, France, 25 pages.

**Sétra (Service d'études techniques des routes et autoroutes).** (2007). « cours d'eau et pont ». Guide technique, 172 pages.

**Sghara, N.,** (2013). « Protection de la ville de Béni-Ounif (Béchar) contre les inondations : Application de logiciels HEC-HMS et HEC-RAS ». Mémoire de Magister, Université des sciences et de technologie d'Oran, 150 pages.

**Taleb Bahmed, A.,** (2013). « Simulation de la rupture de barrage de Laadira (Ghardaïa) ». Mémoire de projet de fin d'étude, ENP d'Alger, 129 pages.

**Touaïbia, B.,** (2004). « Manuel pratique d'hydrologie ». Editeur les presses Madani Frères Guerrouaou, Blida, 166 pages.

### **Webographie :**

« <http://www.developpement-durable.gouv.fr> ». Consulté le 08/05/2015.

« [http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Berges\\_FR\\_web](http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Berges_FR_web) ». Consulté le 25/04/2015.

## Annexes

**Tableau A-01 : Pluies journalières maximales enregistrées par la station pluviométrique de Ghardaïa pour la période 1975 et 2008**

<b>Année</b>	<b>Pluie journalière maximale (mm)</b>	<b>Année</b>	<b>Pluie journalière maximale (mm)</b>
<b>1975</b>	24.70	<b>1992</b>	12.00
<b>1976</b>	17.20	<b>1993</b>	11.00
<b>1977</b>	17.90	<b>1994</b>	54.00
<b>1978</b>	11.30	<b>1995</b>	30.00
<b>1979</b>	18.60	<b>1996</b>	12.00
<b>1980</b>	46.50	<b>1997</b>	23.00
<b>1981</b>	13.00	<b>1998</b>	04.00
<b>1982</b>	09.40	<b>1999</b>	26.00
<b>1983</b>	02.90	<b>2000</b>	18.00
<b>1984</b>	20.20	<b>2001</b>	18.00
<b>1985</b>	06.80	<b>2002</b>	24.00
<b>1986</b>	36.60	<b>2003</b>	33.00
<b>1987</b>	08.80	<b>2004</b>	46.00
<b>1988</b>	08.90	<b>2005</b>	07.00
<b>1989</b>	06.70	<b>2006</b>	16.00
<b>1990</b>	27.90	<b>2007</b>	10.00
<b>1991</b>	10.90	<b>2008</b>	23.00

Tableau A-02 : Ajustement a la loi de Gumbel

Rang	Pluie journalière maximale (mm)	F(x)	Yi	Valeur théorique	Borne inférieur	Borne supérieur
1	2.9	0.015	-1.440	-0.6	-5.4	8.1
2	4.0	0.044	-1.138	2.4	-2.0	9.7
3	6.7	0.074	-0.959	4.2	0.0	10.8
4	6.8	0.103	-0.821	5.6	1.6	11.6
5	7.0	0.132	-0.704	6.7	2.8	12.3
6	8.8	0.162	-0.600	7.8	3.9	13.0
7	8.9	0.191	-0.504	8.7	4.9	13.7
8	9.4	0.221	-0.413	9.6	5.8	14.3
9	10.0	0.250	-0.327	10.5	6.6	15.0
10	10.9	0.279	-0.243	11.3	7.4	15.6
11	11.3	0.309	-0.161	12.1	8.1	16.3
12	11.9	0.338	-0.081	12.9	8.8	17.0
13	12.0	0.368	-0.001	13.7	9.5	17.7
14	12.6	0.397	0.079	14.5	10.1	18.4
15	13.0	0.426	0.160	15.3	10.8	19.1
16	16.2	0.456	0.241	16.1	11.4	19.9
17	17.2	0.485	0.324	16.9	12.0	20.7
18	17.9	0.515	0.409	17.8	12.6	21.6
19	18.0	0.544	0.497	18.6	13.1	22.5
20	18.0	0.574	0.587	19.5	13.7	23.4
21	18.6	0.603	0.681	20.5	14.3	24.5
22	20.2	0.632	0.780	21.4	14.9	25.5
23	23.0	0.662	0.885	22.5	15.5	26.7
24	23.0	0.691	0.996	23.6	16.2	28.0
25	24.0	0.721	1.116	24.8	16.8	29.3
26	24.7	0.750	1.246	26.1	17.5	30.8
27	26.0	0.779	1.389	27.5	18.3	32.5
28	27.9	0.809	1.550	29.1	19.2	34.4
29	30.0	0.838	1.735	30.9	20.1	36.6
30	33.0	0.868	1.952	33.1	21.2	39.2
31	36.6	0.897	2.220	35.7	22.5	42.5
32	46.0	0.926	2.572	39.2	24.2	46.8
33	46.5	0.956	3.098	44.4	26.7	53.2
34	54.8	0.985	4.212	55.5	32.0	67.0

Tableau A-03 : Ajustement a la loi de Galton

Rang	Pluie journalière maximale (mm)	F(x)	Z (x <sub>i</sub> )	Ln (x <sub>i</sub> )	Valeur théorique	Borne inférieur	Borne supérieur
1	2.9	0.015	-2.178	1.065	3.6	2.3	5.4
2	4.0	0.044	-1.705	1.386	4.9	3.4	7.0
3	6.7	0.074	-1.450	1.902	5.9	4.2	8.1
4	6.8	0.103	-1.265	1.917	6.6	4.9	9.0
5	7.0	0.132	-1.115	1.946	7.4	5.5	9.8
6	8.8	0.162	-0.987	2.175	8.0	6.1	10.6
7	8.9	0.191	-0.874	2.186	8.7	6.6	11.3
8	9.4	0.221	-0.770	2.241	9.3	7.2	12.1
9	10.0	0.250	-0.674	2.303	9.9	7.7	12.8
10	10.9	0.279	-0.585	2.389	10.6	8.2	13.5
11	11.3	0.309	-0.499	2.425	11.2	8.8	14.2
12	11.9	0.338	-0.417	2.477	11.8	9.3	15.0
13	12.0	0.368	-0.338	2.485	12.5	9.9	15.8
14	12.6	0.397	-0.261	2.534	13.1	10.4	16.6
15	13.0	0.426	-0.185	2.565	13.8	11.0	17.4
16	16.2	0.456	-0.111	2.785	14.6	11.6	18.3
17	17.2	0.485	-0.037	2.845	15.3	12.2	19.2
18	17.9	0.515	0.037	2.885	16.1	12.8	20.2
19	18.0	0.544	0.111	2.890	16.9	13.5	21.3
20	18.0	0.574	0.185	2.890	17.8	14.1	22.4
21	18.6	0.603	0.261	2.923	18.7	14.9	23.7
22	20.2	0.632	0.338	3.006	19.8	15.6	25.0
23	23.0	0.662	0.417	3.135	20.9	16.4	26.5
24	23.0	0.691	0.499	3.135	22.0	17.3	28.1
25	24.0	0.721	0.585	3.178	23.4	18.2	29.9
26	24.7	0.750	0.674	3.207	24.8	19.3	32.0
27	26.0	0.779	0.770	3.258	26.5	20.4	34.4
28	27.9	0.809	0.874	3.329	28.4	21.7	37.2
29	30.0	0.838	0.987	3.401	30.7	23.2	40.6
30	33.0	0.868	1.115	3.497	33.5	25.1	44.8
31	36.6	0.897	1.265	3.600	37.1	27.3	50.4
32	46.0	0.926	1.450	3.829	42.1	30.3	58.4
33	46.5	0.956	1.705	3.839	50.0	35.0	71.6
34	54.8	0.985	2.178	4.004	69.0	45.4	105.0

**Tableau A-04 : Données brutes du relevé topographique effectué**

<b>Point</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>	<b>Point</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
1	4672.363	5017.077	287.979	61	4675.634	5000.063	289.086
2	4672.363	5017.076	287.982	62	4515.211	4940.054	289.095
3	4684.755	5031.416	288.028	63	4515.211	4940.053	289.098
4	4667.165	5008.555	288.029	64	4678.663	4998.042	289.106
5	4684.755	5031.417	288.031	65	4678.663	4998.042	289.109
6	4667.166	5008.554	288.032	66	4630.400	4989.957	289.112
7	4675.144	5032.310	288.301	67	4630.401	4989.956	289.115
8	4675.145	5032.310	288.304	68	4621.751	4982.060	289.123
9	4667.471	5023.935	288.353	69	4621.752	4982.060	289.126
10	4667.472	5023.935	288.356	70	4678.770	5002.216	289.130
11	4675.82	5034.449	288.442	71	4678.770	5002.216	289.133
12	4675.821	5034.448	288.445	72	4673.842	4998.734	289.136
13	4673.048	5002.896	288.568	73	4673.842	4998.735	289.139
14	4673.049	5002.896	288.571	74	4530.308	4942.979	289.140
15	4643.477	4992.198	288.612	75	4530.309	4942.979	289.143
16	4643.477	4992.198	288.615	76	4615.165	4976.007	289.182
17	4635.954	4987.721	288.690	77	4615.166	4976.008	289.185
18	4606.266	4961.125	288.691	78	4609.532	4972.309	289.190
19	4635.955	4987.721	288.693	79	4609.533	4972.308	289.194
20	4606.266	4961.126	288.694	80	4596.825	4967.402	289.204
21	4644.495	4989.561	288.698	81	4596.825	4967.402	289.207
22	4644.496	4989.562	288.701	82	4506.97	4934.756	289.251
23	4670.930	5028.416	288.705	83	4506.971	4934.756	289.254
24	4670.931	5028.416	288.708	84	4620.006	4980.942	289.255
25	4610.617	4967.713	288.720	85	4620.006	4980.943	289.258
26	4610.617	4967.714	288.723	86	4505.502	4938.56	289.277
27	4611.627	4964.006	288.755	87	4505.503	4938.559	289.280
28	4611.627	4964.006	288.758	88	4550.491	4952.982	289.300
29	4659.043	5016.404	288.761	89	4550.492	4952.983	289.303
30	4659.043	5016.405	288.764	90	4565.281	4957.434	289.303
31	4495.96	4950.323	288.782	91	4586.21	4952.574	289.346
32	4495.961	4950.323	288.785	92	4586.211	4952.574	289.349
33	4600.778	4958.713	288.799	93	4549.434	4943.387	289.351
34	4630.012	4980.570	288.801	94	4549.435	4943.387	289.354
35	4600.778	4958.714	288.802	95	4501.684	4941.148	289.368
36	4630.013	4980.570	288.804	96	4561.152	5049.529	289.370
37	4671.941	5000.977	288.840	97	4501.684	4941.148	289.371
38	4671.942	5000.977	288.843	98	4561.152	5049.529	289.373
39	4625.881	4979.983	288.845	99	4479.035	4948.776	289.388

40	4625.881	4979.984	288.849	100	4479.036	4948.776	289.391
41	4501.741	4947.497	288.872	101	4587.517	4964.533	289.393
42	4601.683	4963.666	288.873	102	4587.518	4964.533	289.396
43	4636.029	4993.008	288.874	103	4465.909	4952.149	289.400
44	4588.221	4956.05	288.875	104	4465.91	4952.149	289.403
45	4601.684	4963.666	288.876	105	4606.533	4972.672	289.413
46	4636.029	4993.008	288.877	106	4606.533	4972.672	289.416
47	4588.221	4956.05	288.878	107	4562.662	5050.134	289.428
48	4628.356	4973.647	288.893	108	4562.662	5050.134	289.431
49	4628.357	4973.647	288.896	109	4462.144	4957.775	289.469
50	4573.32	4954.097	288.91	110	4488.867	4943.411	289.472
51	4573.321	4954.097	288.913	111	4462.145	4957.775	289.472
52	4561.518	4950.974	288.955	112	4488.867	4943.411	289.475
53	4561.518	4950.974	288.958	113	4596.825	4968.985	289.493
54	4520.217	4940.810	288.998	114	4596.825	4968.986	289.496
55	4520.218	4940.810	289.001	115	4417.438	4991.966	289.524
56	4541.680	4945.668	289.062	116	4482.770	4938.568	289.524
57	4541.681	4945.668	289.065	117	4428.321	4994.669	289.527
58	4514.305	4942.960	289.067	118	4417.438	4991.966	289.527
59	4514.305	4942.960	289.070	119	4482.770	4938.568	289.527
60	4675.633	5000.063	289.083	120	4428.321	4994.669	289.530

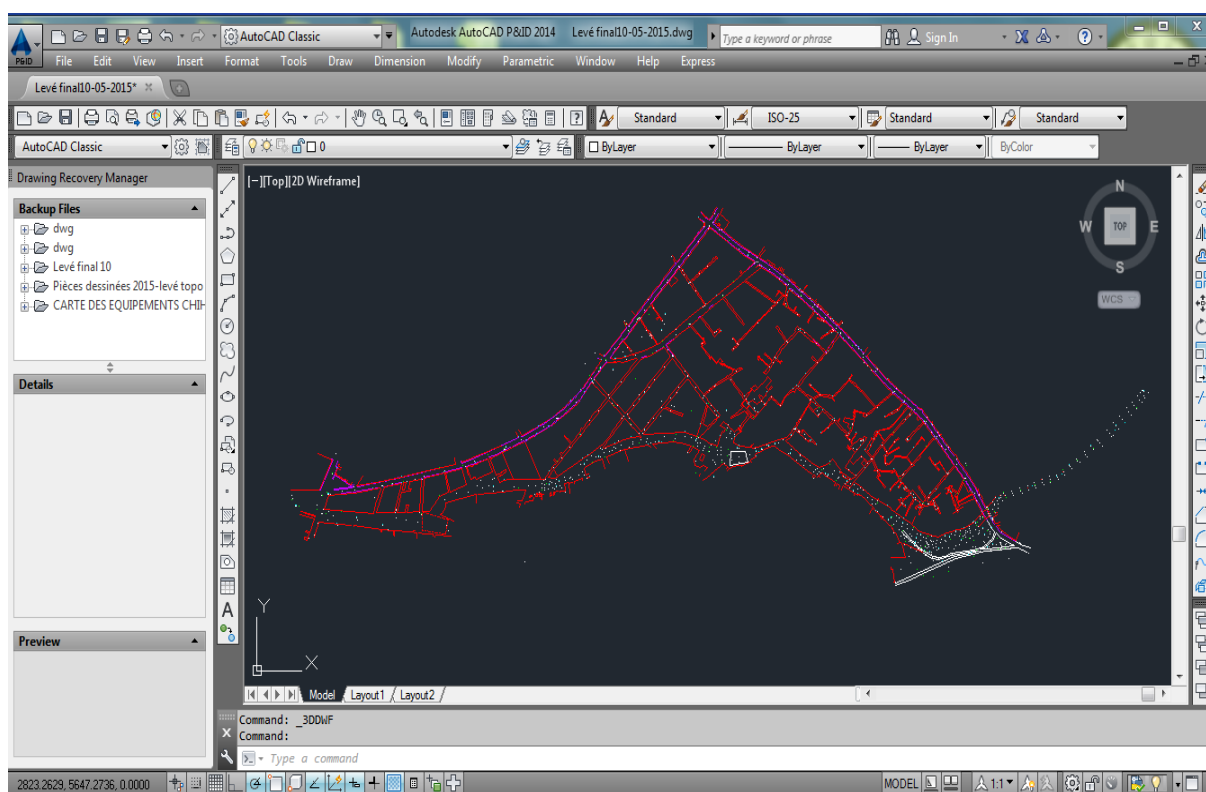


Figure A-01 : schéma générale du relevé topographique sous AutoCAD