

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de **DOCTEUR EN SCIENCES**

En : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Par : BEKHIRA Abdelghani

Sujet

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU RISQUE
D'INONDATION DANS LES ZONES ARIDES**

Soutenue publiquement, le 21/09/2020, devant le jury composé de :

Me BOUCHELKIA Hamid	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Me HABI Mohamed	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur
Me MORSLI Boutkhil	Maître de recherche A	INRF. Tlemcen	Co-Directeur
Me REMINI Boualem	Professeur	Univ. Blida	Examineur 1
Me ELOUISSI Abdelkader	Maître de Conf. A	Univ. Mascara	Examineur 2
Me HAMOUDI Saaed .A	Professeur	Univ. Chlef	Examineur 3

Dédicace

*A ma chère mère, mon cher père, et ma chère femme pour tout le mal
qu'ils se sont donnés afin de me faciliter ma tâche,
en témoignage de la profonde affection
que je leur porte.*

*A mon frère Kamel Eddine qui ma beaucoup
soutenu durant toutes mes études.*

*A mon fils Mouhamed Abdelhadi et la fille de mon frère Nour elhouda
A tous ceux qui me sont proches et ceux qui ont contribué
à ma formation qu'ils trouvent là
toute ma reconnaissance.*

*A tous mes amies surtout : Dellauoi Mouhamed,
Ali Bendida, Amine Kandoussi,
et Douha abdelouahab.*

Remerciements

Je remercie Dieu, le Tout-Puissant, qui m'a donné la force et le courage pour poursuivre mes études et d'arriver à l'achèvement de cette thèse.

Je tiens à remercier tout d'abord les membres du jury pour le grand intérêt qu'ils sont montrés pour mon travail.

Je tiens à remercier vivement mon adorable professeur Mr. HABI Mohammed d'avoir accepté l'encadrement de ce travail, J'éprouve un grand respect pour son travail, son parcours, ainsi que pour ses grandes qualités humaines, je remercie mon Co-encadreur Mr. MORSLI Boutkhil pour le soutien et l'aide qu'il n'a jamais manqué de m'apporter, aussi pour ses conseils et ses orientations durant l'élaboration de ce travail.

Ma gratitude va à ceux qui m'ont donné beaucoup de soin à l'élaboration de cette thèse et m'ont guidé sur le bon chemin en espérant que ce mémoire soit le reflet de la bonne formation que j'ai reçue.

J'exprime également mes amples remerciements et pieuse pensée à M. TABOUCHE Mouhamed qui nous a quitté et laissant derrière lui un vide qui sera difficilement comblé, mais il restera toujours dans ma mémoire pour tout ce qu'il a fait pour moi.

Un grand merci à tous mes collègues et amis de la promotion de doctorat pour leurs précieuses aides et orientations.

Je suis reconnaissant à mes proches, parents, ma femme et amis, qui ont su rester à mes côtés pendant toute cette période de formation.

*Je remercie
.....A vous tous, merci.*

LISTE D'ABREVIATION

AEP	Alimentation en Eau Potable
ANRH	Agence National des Ressources Hydraulique
BET	Bureau d'Etude Technique
CFA	Centres de Formation d'Apprentis
CEMAGREF	Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts
CTH	Contrôle Technique Hydraulique
ETTABET	Bureau d'Etude Technique ELTTABAT
DEM	Digital Elevation Model
DHW	Direction d'Hydraulique du Wilaya
ETP	Evapotranspiration potentielle
ETR	Evapotranspiration Réel
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center River Analysis System
IDF	Intensité–Durée–Fréquence
GR	Génie Rurale
MEDD	Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NOAA	National Oceanic and Atmosphéric Administration
OMNA	Office National de la Météorologie Algérie
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
QDF	Débit–Durée–Fréquence
RN	Route National
SIG	Système d'Information Géographique
PC	Protection Civil
PLU	Plans Locaux d'Urbanisme

RESUME

Le phénomène des crues et des inondations va en s'amplifiant à cause du développement démographique et urbain. La ville de Béchar qui constitue le point de convergence des eaux de la partie Nord des Ksours du Nord, est très touchée par des inondations fréquentes dans les dernières décennies, on peut citer parmi ces événements l'inondation de 2008 qui a marqué une crue exceptionnelle de débit $830 \text{ m}^3/\text{s}$ ($h_{\text{eau}}= 8\text{m}$), et aussi celle de 2012 et de 2014.

Le phénomène des inondations est de plus en plus ressenti, causant des dégâts corporels et matériels considérables (Morts, coupure de la route RN6, difficulté de circulation, isolement de la ville, perte des terres agricoles...).

Notre contribution à l'étude d'inondation a pour but d'établir une étude hydrologique et hydraulique basée sur les approches de la modélisation. Deux approches ont été utilisées. L'approche hydrologique en utilisant le logiciel Génie rural annuel (GR1A) et mensuel (GR2M) qui révèle un diagnostic des mécanismes d'écoulements et pour proposer des mesures efficaces pour assurer un meilleur passage et gestion des crues au niveau de la ville de Béchar. Cette approche nous a permis d'estimer le bilan hydrologique de bassin versant de l'Oued Béchar. La deuxième approche qui est l'approche hydraulique, présentée par le logiciel HEC-RAS, consiste à représenter les débits écoulés qui sont estimés selon les périodes des retours (10 ans, 25 ans, 50 ans, 100 ans), d'après les lois d'ajustement statistique pour détecter précisément les zones d'inondation dans la ville de Béchar, nous avons fait appel à un support informatique l'HEC-RAS, l'HEC-GeoRAS et l'ArcGis pour la cartographie de l'événement.

Hydrologiquement à l'échelle mensuel la valeur du paramètre estimé de X_1 , qui est égale à 4.74 mm, indique que la partie infiltrée est plus importante au niveau du bassin versant de l'Oued Béchar qui implique un processus de ruissellement superficiel plus rapide au niveau de la station de Béchar. La valeur du paramètre estimée de X_2 qui est égale à 0.02 désigner l'influence d'un passage des eaux du bassin versant sur l'extérieur et relié par le réservoir de routage.

A l'échelle annuelle, la valeur du paramètre estimée de X qui est égale à 2.20 ($X > 1$) indique que le bassin versant de l'Oued Béchar perd de l'eau en profondeur vers les nappes souterraines ou vers d'autres bassins versants adjacents de l'Oued Zousfana et de l'Oued Guir.

Hydrauliquement l'étude hydraulique à été réalisée pour avoir les hauteurs d'eau correspondant aux débits prévus sur 25 ans ($Q_{25}=388.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{eau}}= 3.5 \text{ m}$), 50 ans ($Q_{50}=478.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{eau}}=5 \text{ m}$) et 100 ans ($Q_{100}=567.3$, $h_{\text{eau}}=7 \text{ m}$), et pour la meilleure simulation d'aménagement, on adopte celle qui a un importante décalage sur la côte d'eau.

Enfin, un concept de protection est proposé selon la simulation adéquate, afin de protéger la ville de Béchar contre les crues et pour améliorer l'état environnemental du cours d'eau.

Ce travail constituera la base d'un véritable outil de gestion capable de prendre en compte conjointement l'influence des différents processus impliqués dans le fonctionnement du bassin versant de l'Oued Béchar.

Mot clés : Inondation, Bassin versant de l'Oued Béchar, Modélisation hydrologique (GR), Modélisation hydraulique (HEC-RAS), aménagement, simulation, protection de la ville de Béchar.

ABSTRACT

Flooding phenomenon is intensifying because of demographic and urban development, the city Bechar is the focal point of the waters of the northern part of North Ksours. She was very affected by frequent flooding in recent decades, among these the flood of 2008 which marked an exceptional flood of $830 \text{ m}^3/\text{s}$ ($h_{\text{water}} = 8\text{m}$) of flow, and also that of 2012 and 2014.

The phenomenon of floods is increasingly felt here and there, causing considerable human and material damage (the Dead, cut the national road N6, difficulty of movement, isolation of the city, loss of agricultural land ...).

Our goal is to establish a hydrologic study and hydraulic-based modeling approaches, there is a way hydrological approach presented by the annual Agricultural Engineering (GR1A) and monthly software (GR2M), which is a diagnostic mechanisms flows and propose effective measures to ensure a better transition and flood management in the city of Bechar, this approach allows us to estimate the water balance of the watershed of Oued Bechar other way one notes hydraulic approach presented by the HEC-RAS software is to represent the elapsed flows which are estimated according to the periods of returns (10 years, 25 years, 50 years, 100 years). According to the adjustment Gumbel to accurately detect flooding in the town of Bechar areas.

Hydrologically to the monthly scale the value of the parameter estimated in this case X_1 is equal to 4.74 mm, indicates that the infiltrated part is more important at the watershed Bechar Oued which involves a process of faster surface runoff at the station Bechar, and value of the parameter estimated in this case X_2 is equal to 0.02, reflects the influence of an opening on the outside of the basin and not connected by the air reservoir routing.

At the annual scale the parameter estimated in this case X is equal to $2.20 > 1$ indicates that the watershed of Wadi Bechar loses water depth to groundwater or to other adjacent watersheds.

Hydraulically a hydraulic study was carried out to have the water heights corresponding to the expected flow rates of 25 years ($Q_{25} = 388.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{water}} = 3.5 \text{ m}$), 50 years ($Q_{50} = 478.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{water}} = 5 \text{ m}$) and 100 years ($Q_{100} = 567.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{water}} = 7 \text{ m}$), and for the best planning simulation one adopts that has an important shift on the water coast.

Finally, a concept of protection will be provided according to the adequate simulation to protect the town of Bechar against flooding and improve the environmental condition of the rivers.

This work will form the basis of a true management tool able to take into account jointly the influence of different processes involved in the functioning of the watershed Bechar Oued.

Keyword: Flood, Wadi Bechar watershed, Hydrological modeling (GR), hydraulic modeling (HEC-RAS), , development, hazard, simulation, Bechar Oued protection.

المخلص

إن ظاهرة خطر الفيضانات والسيول تزداد حدة بسبب التطوير الديموغرافي والحضري، إن مدينة بشار هي نقطة التقاء محورية في الجزء الشمالي لقصور الشمال والتي تأثرت كثيرا بسبب الفيضانات المتكررة في العقود الأخيرة، نذكر من بينها فيضانات 2008 التي تعتبر من الفيضانات الغير عادية حيث وصل التدفق ($830 \text{ m}^3/\text{s}$ ($h_{\text{eau}}=4\text{m}$))، وكذلك فيضان 2012 و فيضان 2014.

إن ظاهرة الفيضانات شيئا فشيئا تسبب أضرار هنا وهناك مخلقتنا أضرار إنسانية و مادية مثل (موت الأشخاص، قطع الطرقات كالطريق الوطني رقم 06، عزل المدن وفقدان الأراضي الزراعية ...).

إن هدفنا من هذه الدراسة هو إقامة دراسة هيدرولوجية وهيدرولوجية تعتمد على منهج النماذج، فمن جهة نذكر المنهج الهيدرولوجي المدروس ببرنامج الهندسة الريفية السنوية (GR1A) والشهرية (GR2M)، وهي آليات تعمل على تشخيص التدفقات ويقترح قياسات فعالة لضمان إنتقال أفضل وإدارة الفيضانات في مدينة بشار، وهذا الأسلوب يتيح لنا تقدير توازن المياه في حوض واد بشار، ومن جهة أخرى نذكر المنهج الهيدرولوجي المدروس ببرنامج HEC-RAS الذي يعمل على محاكاة التدفقات المحسوبة وفقا لفترات عودة التدفقات (10 سنة، 25 سنة، 50 سنة، 100 سنة) حسب قانون التصحيح الإحصائية من أجل تحديد بدقة مناطق الفيضانات في مدينة بشار.

هيدرولوجيا على المستوى الشهري، قيمة المعامل المقدر في هذه الحالة $X_1 = 4.74$ مم، تشير إلى أن الكمية المرتشحة كبيرة جدا في حوض واد بشار الذي يشير على عملية سرعة الجريان السطحي في محطة بشار و تعكس القيمة الأخرى للمعامل المقدر في هذه الحالة $X_2 = 0.02$ على إنفتاح حوض واد بشار على السطح الخارجي الغير جوي و المتصلة بخزان التوجيه. على المستوى السنوي قيمة المعامل المقدر في هذه الحالة $X = 2.20 < 1$ تشير إلى أن حوض واد بشار يفقد المياه في العمق في اتجاه المياه الجوفية أو في الأحواض المجاورة الأخرى.

هيدرولوجيا إن الدراسة الهيدرولوجية سمحت لنا بمعرفة إرتفاع الماء للتدفقات 25 سنة ($Q_{25}=388.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{eau}}= 3.5 \text{ m}$) و 50 سنة ($Q_{50}=478.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{eau}}=5 \text{ m}$) و 100 سنة ($Q_{100}=567.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{eau}}=7 \text{ m}$) إن أفضل محكات (simulation) معتمدة لتهيئة واد بشار هي تلك التي لها أقل مستوى مائي.

في الأخير سنعرض تهيئة شاملة لواد بشار الهدف منها حماية مدينة بشار من خطر الفيضانات و بذلك تحسين الحالة البيئية لمجرى الماء.

إن هذا العمل سيكون بمثابة القاعدة للأداة الحقيقية للتسيير الأمثل للفيضانات في حوض واد بشار، ويأخذ بعين الاعتبار على سبيل الربط تأثير مختلف التطورات المتخللة في سير حوض واد بشار.

الكلمات المفتاحية: الفيضان، حوض واد بشار، نموذج الهيدرولوجيا (GR)، نموذج الهيدرولوجيا (HEC-RAS)، التهيئة، الخطر، المحاكات، حماية واد بشار.

TABLE DES MATIERES

Dédicace	
Remerciement	
Liste d'abréviations	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	page
CH I) GENERALISTES ET SYNTHESSES BIBLIOGRAPHIQUES	
1. Introduction	04
2. Le phénomène d'inondation	04
2.1 Définition d'inondation	04
2.2 Définition du risque inondation.....	04
2.3 La crue.....	05
2.4 Les types d'inondations et ses origines.....	05
2.4.1 Inondations par submersion direct.....	05
2.4.2 Inondations par submersion indirect.....	05
2.4.3 Inondations par ruissellement.....	05
2.5 Les Processus conduisant aux inondations.....	06
2.6 Les causes des inondations.....	06
2.6.1 Les causes naturelles.....	06
2.6.2 Les causes anthropiques directes.....	06
2.6.3 Cause anthropiques indirectes.....	06
2.7 Les facteurs aggravant l'inondation.....	06
2.7.1 Les facteurs naturels.....	06
2.7.2 Les facteurs anthropiques.....	07
2.8 Les effets des inondations.....	08
2.8.1 Les effets directs de l'inondation	08
2.8.2 Les effets indirects de l'inondation.....	08
2.9 Les conséquences d'inondation dans le monde.....	08
2.10 Les conséquences des inondations en Algérie.....	09
3. Le risque d'inondation de l'oued Béchar	10

3.1 Un aperçu historique sur les inondations de l'oued Béchar.....	11
3.1.1 L'inondation de 19-21 mars 1959.....	11
3.1.2 L'inondation de 18-19 octobre 2007.....	13
4. Le risque d'inondation du 10 octobre 2008.....	14
4.1 Les cause d'inondation d'oued Béchar d'octobre 2008.....	15
4.2 Les facteurs aggravant le risque d'inondation d'octobre 2008.....	15
4.2.1 Le rétrécissement du lit d'oued.....	15
4.2.2 Les virages tronqués.....	16
4.3 Les conséquences d'inondation d'oued Béchar d'octobre 2008.....	17
4.3.1 Les dégâts du secteur de logements.....	17
4.3.2 Les dégâts du secteur de l'éducation.....	18
4.3.3 Les dégâts du secteur de la formation professionnelle.....	18
4.3.4 Les dégâts du secteur des travaux publics.....	18
4.3.5 Les dégâts du secteur du transport.....	18
4.3.6 Les dégâts du secteur des mines.....	18
4.3.7 Les dégâts du secteur d'hydraulique.....	19
4.3.8 Les conséquences sociologiques.....	20
4.3.9 Les conséquences positives.....	20
4.4 L'évaluation du risque d'inondation.....	20
5. Formation des crues et la réaction hydrologique.....	21
5.1 Développent de la formation de crue.....	22
5.1.1 Théorème de Horton.....	22
5.1.2 Théorème des aires contributives.....	22
5.2 Les facteurs influençant la réaction hydrologique.....	23
5.2.1 Facteurs intrinsèques.....	23
5.2.2 Facteurs extrinsèques.....	24
5.3 Schématisation de la réaction Hydrologique.....	24
6. Risque d'inondation.....	25
7. L'aléa.....	26
8. La vulnérabilité.....	26
9. Gestion de risque.....	27
9.1 La prévision.....	27
9.2 La prévention.....	27

9.3 Annonce et alerte.....	27
9.4 Gestion de crise.....	27
9.5 Analyse post crise.....	27
10. Gestion de l'aléa.....	28
10.1 Prévision de crue.....	28
10.1.1 Méthode de maxima annuels.....	28
10.1.2 Méthode de renouvellement.....	28
10.1.3 Les méthodes hydrométéorologiques.....	29
10.1.4 Les méthodes stochastiques.....	29
10.1.5 Relation pluies -débits.....	29
10.2 Chois entre modèles.....	29
10.3 Notion de crue projet.....	29
10.4 Mesures pour réduire de l'aléa.....	31
10.4.1 Aménagements en versant avant le lit de cours d'eau.....	31
10.4.2 Changement d'occupation de sol.....	31
10.4.2.1 Banquettes.....	31
10.4.2.2 Le reboisement.....	32
10.4.3 Aménagement en lit mineur.....	34
10.4.3.1 Correction torrentiel.....	34
10.4.3.2 Barrage écrêteur.....	35
10.4.3.3 Création des zones d'expansion de crue.....	35
10.4.3.4 Ouvrages de stockage en dérivation.....	35
10.4.3.5 Dignes de protection contre les inondations.....	37
10.5 Mesures pour réduire la vulnérabilité.....	38
10.5.1 Délimitation des zones à risque.....	38
10.5.2 Détermination des enjeux.....	39
Conclusion.....	40
CH II) METHODES ET MATERIELS	
1. Introduction	41
2. Méthodologie.....	41
3. Caractéristiques générales de la zone d'étude.....	43
3.1 Localisation et situation.....	43
3.1.1 Le cadre administratif de la wilaya de Béchar.....	43

3.1.2 Le cadre administratif de la commune de Béchar.....	44
3.2 Situation démographique.....	44
3.2.1 Structure de la population.....	44
3.2.2 Evaluation de la population	44
3.2.3 La population résidente et sa répartition.....	45
3.4. Contexte géologique.....	45
3.5. Contexte morphologique.....	47
3.6. Condition climatique et hydrologique.....	47
4. Définition du bassin versant.....	48
5. Situation géographique de bassin versant d'Oued Béchar.....	49
6. Géomorphologie.....	49
7. Impact de la géologie sur l'hydrologie.....	50
8. Le Couvert Végétal.....	50
9. Morphométrie.....	51
9.1 Superficie du bassin versant.....	51
9.2 Périmètre du bassin versant.....	51
9.3 Indice de compacité de Gravéllius.....	51
9.4 Rectangle équivalent.....	52
10. Etude de relief.....	52
10.1 Courbe hypsométrique.....	53
10.2 Les altitudes caractéristiques.....	54
10.2.1 Les altitudes maximale et minimale.....	54
10.2.2 L'altitude moyenne.....	54
10.2.3 L'altitude médiane.....	54
10.3 Les indices des pentes.....	55
10.3.1 Indice de pente de Roche.....	55
10.3.2 Indice de pente globale (Ig).....	56
10.3.3 Dénivelée spécifique (Ds).....	56
10.3.4 Profil en long.....	57
10.3.5 La pente moyenne d'un cours d'eau.....	58
11. Etude de réseau hydrographique.....	59
11.1 La topologie : structure du réseau et ordre des cours d'eau.....	59
11.2 Densité de drainage (Dd).....	60

11.3 Coefficient de torrentialité (Ct).....	60
11.4 Rapport de confluence (Rc).....	61
11.5 Rapport des longueurs (RL).....	61
11.6 Temps de concentration (TC).....	61
Conclusion.....	63
CH III) ANALYSE DES PARAMETRES HYDROCLIMATOLOGIQUES	
1. Introduction	64
2. Climatologie.....	64
2.1 Les paramètres physiques.....	64
2.2 Etude des précipitations.....	64
2.3 Etude de l'évapotranspiration potentielle.....	66
2.3.1 Etude des températures.....	66
2.3.2 Températures annuelles.....	66
2.3.3 Températures mensuelles.....	67
2.3.4 Notion d'évapotranspiration et potentielle.....	67
2.3.4.1 Estimation de l'évapotranspiration.....	67
2.3.4.1.1 Formule de Turc.....	68
3. Hydrologie.....	69
3.1 Etude des débits (les lames d'eaux écoulées).....	69
3.1.1 Débit annuel.....	70
3.1.2 Débits mensuels.....	70
3.2 Etude statistique.....	71
3.2.1 Caractéristiques de l'échantillonnage.....	71
3.2.2 Ajustement à une distribution théorique.....	72
3.2.2.1 Méthode des Moments (MM).....	74
3.2.2.2 Méthode du Maximum de Vraisemblance (MVS).....	74
3.2.3 Adéquation d'une loi de probabilité.....	75
3.2.3.1 Test de Chi – Carré.....	75
3.2.3.2 Test de Kolmogorov – Smirnov.....	75
3.2.3.3 Test du coefficient de corrélation.....	76
3.2.3.4 Test de la racine de la moyenne des quadratiques de la déviation.....	76
3.2.4 Analyse fréquentielle des débits instantanés maxima.....	77

3.2.5 Distributions de probabilités.....	77
6. Résultats et discussion.....	77
Conclusion.....	79
CH IV) MODELISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE	
1. Introduction	80
2. Modélisation Hydrologique.....	80
2.1 Le Modèle GR.....	80
2.1.1 Objectifs de développement.....	80
2.1.2 Mode de développement.....	81
2.1.3 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A.....	81
2.1.3.1 Définition.....	81
2.1.3.2 Description mathématique.....	82
2.1.3.3 Paramètre.....	82
2.1.4 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	82
2.1.4.1 Définition.....	82
2.1.4.2 Description mathématique.....	83
2.1.4.3 Paramètres.....	85
2.2 Applications des modèles.....	86
2.3 Modélisation pluies débit.....	87
2.3.1 Application de modèle GR.....	87
2.3.1.1 Modèle annuel GR1A.....	87
2.3.1.1.1 Résultat du calage.....	87
2.3.1.1.2 Résultats du calage du modèle annuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc.....	87
2.3.1.2 Modèle mensuel GR2M.....	89
2.3.1.2.1 Résultat du calage.....	89
2.3.1.2.2 Résultats du calage du modèle mensuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc.....	89
2.3.1.2.3 Bilan hydrologique estimatif de bassin versant d'Oued Béchar	91
3. Modélisation Hydraulique.....	92
3.1 Modèle HEC-RAS.....	92
3.1.1 Bases théoriques de logiciel HEC-RAS.....	93

3.1.2 L'environnement HEC-RAS.....	96
3.1.3 Etapes de simulation par HEC-RAS.....	98
3.1.3.1 Création d'un nouveau projet.....	98
3.1.3.2 Création de la géométrie de cours d'eau.....	98
3.1.3.3 Données hydrométriques.....	99
3.1.3.4 Les conditions aux limites.....	99
3.1.3.5 Simulation.....	99
3.1.4 Programmes auxiliaires de la famille HEC.....	101
3.1.5 Contraintes d'utilisation de modèle HEC-RAS.....	101
3.2 Données topographiques requises.....	101
3.3 Modélisation de l'Alea.....	105
3.3.1 Extraction des données topographiques pour l'HEC-RAS.....	105
3.3.2 Données hydrométriques et conditions aux limites.....	107
3.3.3 Simulation hydraulique.....	108
3.3.3.1 La simulation numérique des crues de l'Oued Béchar.....	111
3.3.3.2 La cartographie des les inondations.....	112
Conclusion.....	115
CH V) AMENAGEMENT DU COURS D'EAU D'OUED BÉCHAR ET PROTECTION DE LA VILLE CONTRE L'INONDATION	
1. Introduction	117
2 Aménagement de cours d'eau.....	117
2.1 Cartographie de vulnérabilité.....	118
2.1.1 Notion.....	119
2.1.2 Niveaux de vulnérabilité.....	120
2.1.3 Analyse de risque.....	121
2.1.3.1 Approche qualitative.....	121
2.1.3.2 Approche quantitative.....	122
2.1.3.3 Approche semi-quantitative.....	123
3. La protection contre les inondations.....	123
3.1 Différents types de protection.....	123
3.1.1 La protection directe.....	123
3.1.2 La protection indirecte.....	124
4. Proposition d'aménagement du cours d'eau de la ville de Béchar.....	125

4.1 A court terme.....	125
4.2 A long terme.....	127
5. Simulations et scenarios selon l'aménagement proposé.....	128
5.1 Simulation N°01(aménagement en génie civil).....	129
5.1.1 Scenario d'aménagement.....	129
5.2 Simulation N°02 (aménagement avec suppression de tous les ponts existants).....	132
5.2.1 Scenario d'aménagement.....	132
5.3 Simulation N°03(aménagement avec réalisation d'un canal en béton a ciel ouvert).....	135
5.3.1 Scenario d'aménagement.....	135
5.4 Simulation N°04 (aménagement en génie végétal).....	138
5.4.1 Scenario d'aménagement.....	138
5.5 Simulation N°05 (aménagement avec gabionnage sur les berges).....	141
5.5.1 Scenario d'aménagement.....	141
5.6 Résultats et Discussions.....	144
Conclusion.....	145
Conclusion générale.....	146
Références bibliographiques	
Annexes	

LISTE DES FIGURES

Figures	Pages
<i>Figure I.1: La crue de l'Oued Béchar du 1959(Halilou 2011)</i>	12
<i>Figure I.2: La prise lord de la crue d'octobre 2008</i>	15
<i>Figure I.3: L'engorgement au niveau du pont la Chouffane (Halilou 2011)</i>	16
<i>Figure I.4: L'exploitation illicite du sable de l'Oued Béchar (Halilou 2011)</i>	16
<i>Figure I.5 : Les dégâts du secteur du logement (quartier Mezarrif)</i>	18
<i>Figure I.6: Dégâts causée par l'inondation</i>	19
<i>Figure I.7: Litho-structuraux clair représente la hauteur des eaux dans une maison</i>	21
<i>Figure I.8: Litho-structuraux clair représente la hauteur des eaux dans une maison</i>	21
<i>Figure I.9: Genèse de crues, principaux processus d'écoulement (Kreis 2004)</i>	23
<i>Figure I.10: Génération de débit de crue (Musey et al 2004)</i>	24
<i>Figure I.11: Hyétogramme et hydrogramme résultat d'un évènement Pluie-Débit (Musey et al 2004)</i>	25
<i>Figure I.12: Risque d'inondation</i>	25
<i>Figure I.13: Réseau de banquettes dégradées avec plantation d'arbres fruitiers dans le secteur Trara-Tlemcen (Algérie). (Morsli 2008)</i>	32
<i>Figure I.14: Correction torrentiel (Belghobra 2006)</i>	34
<i>Figure I.15: Schéma de fonctionnement d'un barrage écrêteur de crues (Duglas 2004)</i>	35
<i>Figure I.16: Fonctionnement hydraulique d'ouvrages de stockage en dérivation (Duglas 2004)</i>	36
<i>Figure I.17: Schéma de digue (Serre 2005)</i>	37
<i>Figure I.18: Coupe type de vallée endiguée (Mériaux et al 2001)</i>	38
<i>Figure I.19: Quelques types des digues</i>	38
<i>Figure II.1: Localisation de la wilaya de Béchar (Bekhira et al 2019b)</i>	43
<i>Figure II.2: Localisation de la région de Béchar</i>	44
<i>Figure II.3.a: Graphe de l'évolution de la population de la région de Béchar</i>	45
<i>Figure II.3.b: Graphe de l'évolution de la population de la région de Béchar (Kabour 2011)</i>	45
<i>Figure II.4: La carte géologique de la ville de Béchar (Bekhira et al 2019b)</i>	46
<i>Figure II.5: La carte morphologique de la ville de Béchar (Bekhira et al 2019b)</i>	47
<i>Figure II.6: Le bassin versant d'Oued Béchar (Bekhira et al 2019b)</i>	48

<i>Figure II.7: La situation géographique de bassin versant de l'Oued Béchar</i>	49
<i>Figure II.8: Les rectangles équivalents du bassin versant d'Oued Béchar (Boulnouar 2007)</i>	52
<i>Figure II.9: Schéma explicatif de la Courbe hypsométrique</i>	53
<i>Figure II.10: Indice de pente de Roche</i>	55
<i>Figure II.11: Profil en long de bassin versant d'Oued Béchar</i>	58
<i>Figure II.12: Répartition du réseau hydrographique de l'Oued Béchar et ordre des cours d'eau</i>	59
<i>Figure III.1: Précipitations annuelles</i>	64
<i>Figure III.2: Précipitations mensuelles</i>	65
<i>Figure III.3: Précipitations saisonnières</i>	65
<i>Figure III.4: Températures moyennes annuelles</i>	66
<i>Figure III.5: Températures moyennes mensuelles</i>	67
<i>Figure III.6: Evaporation de Turc dans le bassin versant de l'Oued Béchar</i>	69
<i>Figure III.7: Lames d'eau écoulées interannuelles</i>	70
<i>Figure III.8: Lames d'eau écoulées mensuelles</i>	70
<i>Figure III.9: Ajustement et intervalles de confiance à 95 % de la série QIX à la loi Gumbel (Bekhira et al 2019b)</i>	78
<i>Figure IV .1: Modélisation hydrologique</i>	80
<i>Figure IV.2: Schéma de la structure du modèle GR2M</i>	83
<i>Figure IV.3: Corrélacion entre les débits observés et les débits simulés (Bekhira et al 2018)</i>	88
<i>Figure IV.4: Résultat du calage (Bekhira et al 2018)</i>	88
<i>Figure IV.5: Corrélacion entre les débits observés et les débits simulés (Bekhira et al 2018)</i>	90
<i>Figure IV.6: Résultat du calage</i>	90
<i>Figure IV.7: Courbe indique le niveau S du réservoir production (Bekhira et al 2018)</i>	91
<i>Figure IV.8: Courbe indique le niveau R du réservoir de routage (Bekhira et al 2018)</i>	91
<i>Figure IV.9: Le bilan hydrologique estimatif du bassin versant d'Oued Béchar</i>	92
<i>Figure IV.10: Représentation des termes de l'équation d'énergie (Chachoua 2010)</i>	94
<i>Figure IV.11: Exemple de la façon dont l'énergie moyenne obtenue (Manuel de HEC-RAS)</i>	95

<i>Figure IV.12: Fenêtre principale de HEC-RAS</i>	97
<i>Figure IV.13: Création de nouveau projet</i>	98
<i>Figure IV.14: Fenêtre des données géométriques</i>	99
<i>Figure IV.15: Fenêtre de simulation pour le régime permanent</i>	100
<i>Figure IV.16: Affichage des résultats de simulation</i>	100
<i>Figure IV.17: Schématisation d'une rivière naturelle (Kreis 2004)</i>	102
<i>Figure IV.18: Carte d'occupation de sol de l'Oued Béchar</i>	103
<i>Figure IV.19: Carte de l'extension des leviers topographique d'Oued Béchar (Bekhira et al 2019b)</i>	103
<i>Figure IV.20: Carte de tracé des profils en travers et profil en long (Bekhira et al 2019b)</i>	104
<i>Figure IV.21: Représentation en 3D d'Oued Béchar d'après le MNT (Bekhira et al 2019b)</i>	104
<i>Figure IV.22: La géométrie d'Oued Béchar dans le logiciel HEC RAS (Bekhira et al 2019b)</i>	106
<i>Figure IV.23: Fenêtres des données hydrométriques</i>	107
<i>Figure IV.24: Fenêtres des conditions aux limites</i>	108
<i>Figure IV.25: Fenêtres de simulation pour le régime permanent</i>	108
<i>Figure IV.26: Affichage des résultats de simulation sous forme d'un tableau détaillé</i>	109
<i>Figure IV.27: Affichage des résultats de simulation sous forme graphique</i>	109
<i>Figure IV.28: Vue en 3D des résultats de simulation (Bekhira et al 2019b)</i>	110
<i>Figure IV.29: Profil en travers (N°94) d'Oued Béchar après simulation</i>	110
<i>Figure IV.30: Profil en travers (N°78) du pont de Djneien après simulation</i>	111
<i>Figure IV.31: Le résultat de la simulation numérique des crues de l'Oued BECHAR (Bekhira et al 2019)</i>	112
<i>Figure IV.32: Carte de la hauteur d'inondations de l'Oued Béchar (Bekhira et al 2019b)</i>	113
<i>Figure V.1: Carte de vulnérabilité (Bekhira et al 2019b)</i>	121
<i>Figure V.2.a: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 01 (Bekhira et al 2019a)</i>	129
<i>Figure V.2.b: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 02 (Bekhira et al 2019a)</i>	130
<i>Figure V.2.c: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le</i>	

<i>scénario d'aménagement pour la zone 03 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>131</i>
<i>Figure V.3.a: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 01 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>132</i>
<i>Figure V.3.b: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 02 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>133</i>
<i>Figure V.3.c: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 03 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>134</i>
<i>Figure V.4.a: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 01 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>135</i>
<i>Figure V.4.b: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 02 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>136</i>
<i>Figure V.4.c: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 03 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>137</i>
<i>Figure V.5.a: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 01 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>138</i>
<i>Figure V.5.b: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 02 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>139</i>
<i>Figure V.5.c: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 03 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>140</i>
<i>Figure V.6.a: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 01 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>141</i>
<i>Figure V.6.b: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 02 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>142</i>
<i>Figure V.6.c: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 03 (Bekhira et al 2019a)</i>	<i>143</i>

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Pages
<i>Tableau I.1: Les inondations dans le monde (Ghazli 2009)</i>	09
<i>Tableau I.2: Les inondations en Algérie</i>	10
<i>Tableau I.3: Les Crues de l'Oued Béchar</i>	11
<i>Tableau I.4: Les précipitations du 1959</i>	12
<i>Tableau I.5: Les dégâts enregistré par commune dans la crue du mars 1959</i>	13
<i>Tableau I.6: Les dommages d'inondation d'octobre 2007</i>	14
<i>Tableau I.7: Méthodes d'estimation des crues du type de données et des objectifs (Chachoua 2010)</i>	30
<i>Tableau I.8: Banquettes en fonction de pente et type de culture (Chachoua 2010)</i>	32
<i>Tableau I.9: Différents plantes utilisées dans le reboisement (Khentouche 2005)</i>	33
<i>Tableau II.1: Caractéristiques de forme des unités hydrologiques du bassin versant d'Oued Béchar (Boulnouar 2007)</i>	51
<i>Tableau II.2: Répartition hypsométrique du bassin versant d'Oued Béchar (Boulnouar 2007)</i>	53
<i>Tableau II.3: Altitude caractéristique de bassin d'Oued Béchar</i>	55
<i>Tableau II.4: Classification du relief selon Ig (O.R.S.T.O.M) (Boulanouar 2007)</i>	56
<i>Tableau II.5: Classement O.R.S.T.O.M du relief à partir de la dénivelée spécifique (Boulanouar 2007)</i>	57
<i>Tableau II.6: Indices des pentes pour le bassin d'Oued Béchar</i>	57
<i>Tableau II.7: Les paramètres du profil en long de bassin versant d'Oued Béchar</i>	57
<i>Tableau II.8: Classification, longueur, et nombre des cours d'eau du bassin versant de d'Oued Béchar (Boulnouar 2007)</i>	60
<i>Tableau II.9: Paramètres morphométriques des principales unités hydrologiques du bassin versant d'Oued Béchar</i>	62
<i>Tableau III.1 : Caractéristiques empiriques de la série QIX</i>	72
<i>Tableau III.2: Valeurs des quantiles de Kolmogorov – Smirnov</i>	76
<i>Tableau III.3: Quantiles estimés par la loi Gumbel (Bekhira et al 2019b)</i>	77
<i>Tableau IV.1: Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants d'Oued Béchar (Radia 2012)</i>	85
<i>Tableau IV.2: Valeurs des paramètres après calibration et performances du bassin</i>	

<i>versant d'Oued Béchar (Bekhira et al 2018)</i>	87
<i>Tableau IV.3: Valeurs des paramètres après calibration et performances du bassin</i>	
<i>versant de l'Oued Béchar (Bekhira et al 2018)</i>	89
<i>Tableau V.1: Les facteurs de vulnérabilité</i>	118
<i>Tableau V.2: Grille simple d'analyse du risque</i>	122
<i>Tableau V.3: Résultats des simulations d'après les scénarios d'aménagement proposés</i>	
<i>de l'Oued Béchar</i>	144

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Beaucoup des régions dans le monde sont soumises à des inondations qui résultent principalement de la montée des eaux dans les régions de plaine, de la formation rapide de crues consécutives a des averses violentes ou du ruissellement pluvial en milieu urbain ou rural (Ghazli 2009).

Ces phénomènes sont déterminés par l'importance des précipitations, par la concentration des eaux et par la configuration des bassins versants (Houze 2010; Walls 2013; Madsen 2014), mais ils peuvent aussi être aggravés par les activités humaines. Ces inondations sont amplifiées par le changement climatique (Bekhira et al 2018; Bekhira et al 2014 ; Schmidt et al 2013; Hoegh-guldberg et al 2010). Les évènements climatiques extrêmes tels que les vagues de chaleur, les sécheresses et les inondations, ont entraînés des dommages de plus en plus coûteux, d'autres impacts sont attendus, qui sont susceptibles d'entraîner de nombreux impacts sur la société et l'environnement. Dans le monde, les inondations représentent plus de 50 % des catastrophes naturelles et causent en moyenne 20 000 morts par an.

Ces dernières années, l'Algérie comme beaucoup d'autre pays, a enregistré des catastrophes, parmi lesquelles l'inondation de Bab El Oued (Alger) en novembre 2001, ou celles de l'automne 2008, notamment à Ghardaïa, AïnDefla, Batna et Béchar ; ou encore celles de 2012 qui ont touché le Nord-Est et le Nord-Ouest de l'Algérie. Les conséquences de ces inondations ne cessent de s'amplifier : dégradation des voies de communication, inondation des terres agricoles, inondation de certaines agglomérations avec quelquefois des pertes humaines (Morsli 2012). En moyenne, on enregistre plus de 30 cas d'inondations par an (Tabet 2008). L'importance des enjeux, a fait apparaître la nécessité d'une analyse des risques d'inondation. Pour réaliser un bon diagnostic des risques, il est nécessaire de connaître les caractéristiques et l'ampleur des inondations et leur l'impact.

Ce travail rentre dans cadre, il contribue à l'étude du risque d'inondation. Il a pour objectif l'étude des caractéristiques et de l'ampleur de l'impact du phénomène d'inondation dans les zones arides. La zone du Saoura et plus particulièrement la zone de Bechar, zone aride de l'extrême sud-ouest algérien, a fait l'objet d'étude. Cette zone apparue comme un bon exemple pour l'étude du risque d'inondation dans les milieux arides. Cette région est soumise à des inondations répétées dont les conséquences se traduisent par l'inondation de la ville de Bechar et des terres agricoles et la dégradation des voies de communication entraînant quelquefois des pertes humaines (Halilou 2011). Notre travail est une contribution pour la compréhension des mécanismes d'écoulement superficiel dans le bassin versant de l'Oued Bechar et pour

l'amélioration de la gestion du risque d'inondation. Cette recherche vise à attirer l'attention des décideurs et des aménagistes sur les risques d'inondation dans les zones arides et à orienter l'action des pouvoirs publics dans la gestion aussi les résultats seront utilisés comme outils d'aide à la décision et à la conception de projets pour une meilleure gestion et protection de l'environnement.

Le bassin versant de l'Oued Béchar, est l'une des zones touchées par les inondations dont la plus importante est celle d'Octobre 2008, causées par les fortes précipitations qui ont provoquées des crues et des impacts socio-économiques importants sur les agglomérations et les populations installées au alentour du cour d'eau. Les dégâts corporels et matériels sont comme suit (Merzougui 2014) : 08 morts, 506 familles touchées et 17 677 têtes de bétail.

La plupart des définitions conviennent, que l'inondation, est une débordement des eaux, rapide ou bien lente, sur une zone habituellement hors d'eau, suite a des précipitations de forte intensité en peu de temps, et où les causes de l'inondation sont dues principalement aux conditions de climatologie, de topographie et de l'intervention de l'homme. Le risque d'une inondation est la conséquence de deux composantes : l'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement (aléa) ; l'homme qui s'installe dans la zone inondable pour y implanter toutes sortes de constructions, d'équipements et d'activités (enjeu) (Benmechernane 2013). La maîtrise des risques liés aux crues devient donc un enjeu majeur.

Après l'inondation de l'Oued Béchar du 08 octobre 2008, la prise de conscience de la nécessité d'une lutte contre les inondations avait fait son chemin. Le lourd bilan de cette catastrophe conduit à s'interroger sur les causes des inondations d'abord les causes naturelles : Quels sont les facteurs qui ont contribué à augmenter ces phénomènes naturels ? Quels sont les facteurs météorologiques responsables de telles catastrophes ? Y a-t-il des études ou des projets d'aménagement déjà réaliser pour réduire l'impact d'inondations ? Comment peut-on réduire les risques d'inondation ? Quelles sont les méthodes de protections disponibles pour faire face à ce danger naturel ? Les niveaux du cours d'eau ont-ils dépassé les niveaux connus précédemment ? Quelle est la durée de retour des débits hydrologiques du bassin versant de l'Oued Béchar ? Est-on en présence d'un phénomène de récurrence cinquantennale, centennale ou pluri-centennale ? Comment gérer les crues dans le bassin versant de l'Oued Béchar ?

Pour aboutir à notre objectif et répondre à ces questions, nous avons suivi la méthodologie suivante :

Sur la base d'une recherche bibliographique relative à l'étude et à la gestion de risque d'inondation, la modélisation hydrologique représentée par le modèle pluie-débit et la modélisation hydraulique représentée par le modèle HEC-RAS (Kouakou et al 2016; Lyon et al

2017; Niemi et al 2017; Otmame et al 2017; Nounangnonhouet al 2018), apparaissent comme des outils appropriés pour l'étude de ce phénomène (Blahsaini 2018; Yahyaoui 2012; Xiong 2010). Ces modèles sont utilisés dans ce travail.

Sur un plan pratique, nous avons contacté tous les services et les organismes ayant une relation directe ou indirecte avec notre sujet de thèse pour collecter les données concernant l'Oued de Béchar (études, cartes...etc.). Des investigations de terrain et d'enquêtes ont été effectuées pour compléter les données recueillies. Les documents de l'ANRH, CTH, ETTABET, et de l'ONM ont été utilisés. Sur la base des études et des enquêtes, nous essayons de proposer un aménagement du cours d'eau de l'Oued Béchar.

Nous avons conçu ce travail sur cinq chapitres distincts:

Le premier chapitre, décrit l'aspect théorique et la problématique ainsi que les composantes entrent dans la reconstitution de la gestion de risque d'inondation on mentionne les méthodes et les techniques requises pour réduire les risques d'inondations.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la méthodologie et à la présentation de la zone d'étude : situations géographiques, démographiques, géomorphologiques, géologiques et l'hydrogéologique de la région de Béchar. Ainsi qu'à l'étude du bassin versant de l'Oued Béchar à savoir : la morphométrie, la géomorphologie, les caractéristiques de forme...

Ensuite le troisième chapitre est destiné à l'analyse des paramètres hydroclimatologiques, en traitant les données climatiques telles que les évaporations, les précipitations, les températures et les données hydrométriques comme les débits, ainsi que l'ajustement de ces dernières par les lois statistiques.

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation hydrologique et hydraulique, la modélisation hydrologique par l'application du modèle GR pour les pas de temps annuel et mensuel, et modélisation hydraulique par l'application du modèle HEC-RAS.

Le cinquième chapitre est consacré à la détermination et à la cartographie de l'aléa, ainsi qu'à l'analyse et la cartographie de la vulnérabilité. Aussi à la cartographie des risques dûe aux inondations probables dans le tronçon étudié de l'Oued Béchar.

A partir des résultats de cartographie des risques, un aménagement de cours d'eau de l'Oued Béchar est proposé afin de protéger la ville contre l'inondation.

Une conclusion générale est présentée à la fin de ce travail.

CHAPITRE I
GENERALISTES ET SYNTHESSES
BIBLIOGRAPHIQUES

**GENERALISTES ET SYNTHESES
BIBLIOGRAPHIQUES****1. Introduction**

La nature et l'origine des crues ou hautes eaux sont liées aux régimes hydrologiques et à la taille du bassin versant. Dans Ce chapitre, on va effectuer un passage important allant des aspects descriptifs de l'hydrologie par le biais de la compréhension des processus sous-jacents à la notion de réponse hydrologique, arrivant au terme de ce cours, on va citer les principaux facteurs qui conditionnent le comportement hydrologique d'un bassin.

2. Le phénomène d'inondation**2.1 Définition d'inondation**

Une inondation est un débordement d'un cours d'eau, le plus souvent en crue, qui submerge les terrains voisins. Le terme est souvent étendu aux débordements d'ouvrages artificiels tels que retenues ou réseaux d'assainissement. Des inondations peuvent aussi se produire en amont des cours d'eau, suite à la génération de quantités importantes de ruissellement, ce ruissellement donne alors lieu à une inondation boueuse.

Pour les assurances, le droit de l'environnement et l'Aménagement du territoire (règlements d'urbanisme..), des définitions officielles prévalent. Par exemple, une directive européenne (2007/60/CE) définit l'inondation comme suit: Submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal. Cette notion recouvre les inondations dues aux crues des rivières, des torrents de montagne et des cours d'eau intermittents méditerranéens ainsi que les inondations dues à la mer dans les zones côtières et elle peut exclure les inondations dues aux réseaux d'égouts.

2.2 Définition du risque d'inondation

Le risque d'inondation est la conséquence de deux composantes : l'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement et l'homme qui s'installe dans l'espace alluvial pour y implanter toutes sortes de construction, d'équipements et d'activités (Benmechernane 2013).

Un phénomène naturel où induit involontairement par des transformations artificielles du milieu, ou encore une action humaine volontaire ou accidentelle. C'est une submersion qui affecte généralement des terrains avoisinant un cours ou un plan d'eau à niveau variable .Elle peut être régulière, par exemple dans les zones tempérées et froides au moment de la fonte des neiges, ou bien dans les pays tropicaux de vent pendant la saison des pluies ...etc. elle peut être aléatoire ou accidentelle lors d'une crue produite par des pluies exceptionnelles ou par la rupture d'ouvrages.

L'inondation se produit lorsque de l'eau est en excès, ne peut être évacuée par les voies naturelles ou artificielles prévues à cet effet (drains ou réseaux d'assainissement).

Les inondations sont le plus souvent causées par les crues des cours d'eau. Elles peuvent aussi résulter d'une lenteur, et d'une absence d'infiltration dans des espaces soumis à des averses de forte intensité, que les conditions « accidentelles » de l'accumulation, seules ou réunies, soient d'ordre hydrologique, topographique, météorologique ou anthropique.

2.3 La crue

La crue correspond à l'augmentation de la quantité d'eau qui s'écoule dans la rivière (débit) et peut concerner l'ensemble du lit majeur de la rivière.

L'importance de l'inondation dépend de trois paramètres : la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la durée de la crue.

Ces paramètres sont conditionnés par les précipitations, l'état du bassin versant et les caractéristiques du cours d'eau (profondeur, largeur de la vallée, ...etc.). Ces caractéristiques naturelles peuvent être aggravées par la présence d'activités humaines (Benmechernane 2013).

2.4 Les types d'inondations et ses origines

Les inondations peuvent être la conséquence de crues ou simplement de fortes averses. L'inondation des zones urbanisées n'est pas toujours liée à la proximité d'un cours d'eau. Les principaux facteurs qui influencent la durée et l'intensité des inondations, sont la quantité de pluie qui tombe, l'état des sols : le degré d'imperméabilisation, les pratiques culturelles, l'aménagement et l'entretien du réseau hydrographique c'est-à-dire l'ensemble des milieux aquatiques présents. Les inondations sont presque toutes différentes (Benmechernane 2013).

2.4.1 Inondations par submersion direct

Le cours d'eau sort de son lit mineur pour occuper son lit majeur. Le niveau de l'eau augmente et la rivière déborde alors de sa situation habituelle. Le cours d'eau peut alors envahir des vallées entières.

2.4.2 Inondations par submersion indirect

Les eaux remontent par effet de siphon à travers les nappes alluviales, ce sont des nappes souterraines, dans les réseaux d'assainissement ou encore des points bas localisés. Cette remontée empêche toute infiltration de l'eau dans le sol, ce qui provoque des inondations.

2.4.3 Inondations par ruissellement

Ce sont les inondations qui peuvent se produire principalement en zone urbanisée lorsque l'imperméabilisation des sols c'est-à-dire la capacité du sol à faire passer l'eau, et la conception de la ville, font obstacle au bon écoulement des "grosses" pluies (dûes par exemple aux orages) ou bien parce que la capacité des systèmes de drainage ou d'évacuation des sols est insuffisante.

2.5 Les Processus conduisant aux inondations

Comprendre le processus à l'origine des crues et des inondations suppose d'analyser les différents facteurs qui concourt à la formation et à l'augmentation temporaire des débits d'un cours d'eau. On distingue :

-L'eau mobilisable : constituée de l'eau reçue par le bassin versant par exemple la fonte de neiges ou de glaces associées ou non à des pluies.

-Le ruissellement : il correspond à la part de l'eau qui n'a pas pu s'infiltrer dans le sol. Il dépend de la nature du sol et de son occupation de surface.

-Le temps de concentration : définie par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau parvienne jusqu'à l'exutoire. Ce temps dépend du bassin versant, de la topographie et de l'occupation des sols.

-La propagation de crue : est fonction de la structure du lit et de la vallée alluviale, c'est-à-dire du champ d'écoulement des eaux et du coefficient de la pente.

2.6 Les causes des inondations

Les principales causes de l'inondation sont :

2.6.1 Les causes naturelles

Liées aux aléas climatiques et les phénomènes météorologiques attendus ou à un événement naturel (glissement de terrain) qui empêche l'écoulement habituel de l'eau.

2.6.2 Les causes anthropiques directes

Le drainage, irrigation, l'imperméabilisation et la dégradation des sols, et certaines pratiques agricoles intensives peuvent accélérer le ruissellement de l'eau et en limiter l'infiltration.

2.6.3 Cause anthropiques indirectes

Liées 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, cela pourrait entraîner des cyclones plus intenses.

2.7 Les facteurs aggravant l'inondation

Les inondations sont souvent aggravées par des facteurs naturels mais aussi à cause de l'activité de l'homme. Nous allons tout d'abord étudier les facteurs naturels puis l'impact des actes humains.

2.7.1 Les facteurs naturels

La pente du bassin versant et sa nature font que l'inondation sera plus ou moins importante. Plus la pente est forte, plus l'inondation sera importante, mais l'inondation sera aussi aggravée si on trouve beaucoup de végétaux alors l'écoulement des eaux se fera plus lentement. De plus si les

pluies sont très fréquentes dans la zone frappée, les nappes phréatiques et le sol auront beaucoup de mal pour absorber toute l'eau, donc l'écoulement de toute cette eau prendra plus de temps.

Les perturbations orageuses d'automne et les pluies océaniques en hiver et au printemps aggravent les inondations. De plus ces facteurs peuvent encore aggraver les inondations de part l'intensité et la durée des précipitations. A la sortie de l'hiver, les inondations sont aussi accentuées par la fonte des neiges qui facilite les inondations dans les principaux massifs montagneux.

2.7.2 Les facteurs anthropiques

L'Homme joue aussi un rôle important dans le développement des inondations par :

-L'agriculture intensive et la déforestation (le déboisement)

Durcit le sol, réduit la capacité de rétention de l'eau et provoque les inondations. Le déboisement de grandes zones peut faciliter les inondations. Lorsque trop d'arbres sont abattus, le régime des pluies diminue, le ruissellement augmente et l'érosion des sols s'accélère car la terre n'est plus retenue par les racines.

- Le mauvais aménagement des Oueds

Rétrécissement du lit majeur.

Déformation du rayon hydraulique du cours d'eau.

Diminution des champs d'expansions des crues.

- La densification de l'urbanisation

L'augmentation de surfaces imperméables, le manque d'espaces naturels et des espaces verts réduisent l'infiltration de l'eau et favorisent le ruissellement, provoquant ainsi les inondations.

- L'urbanisation et les aménagements extérieurs

L'urbanisation dans l'espace alluvial et les zones inondables.

Le non prise en compte du sens d'écoulement des eaux de ruissellement dans les aménagements et les constructions afin d'éviter le blocage de la libre circulation des eaux de ruissellement provoque l'inondation des zones n'ayant pas connus ce phénomène.

Le non pris en compte du sens d'écoulement des eaux de ruissellement dans la réalisation des routes et voiries, du point de vue pente, sens et niveau de la voie, aggrave les risques d'inondation.

2.8 Les effets des inondations

2.8.1 Les effets directs de l'inondation

Le déplacement de la population lors d'inondation des maisons, le décès et les blessures de certaines populations voisines.

La destruction des bâtiments, des maisons, des établissements et les infrastructures telles que les ponts et les lignes de chemin de fer en plus de divers réseaux vitaux (électricité, gaz, téléphone et eau)

2.8.2 Les effets indirects de l'inondation

-Crises économiques résultantes de la destruction de la Récolte.

-L'arrêt d'activité commerciale et industrielle à cause des pertes d'équipements et l'infrastructure de base.

-Les maladies, les épidémies à la suite au manque d'eau potable.

-La pollution et la possibilité de contamination des cultures.

On note que les inondations ont des conséquences positives dont l'alimentation des barrages, et sert à débarrasser les vases du barrage lord de la crue dans la condition de vidanger le barrage et la bonne utilisation des eaux de crue.les inondation ont aussi un rôle de nettoyé le cours de la vallée des déchets solides et des eaux usées et la réduction des insectes.

2.9 Les conséquences d'inondation dans le monde

Il y a des inondations partout dans le monde, avec différents degrés de gravité d'une région à l'autre, les inondations les plus dévastatrices affectent principalement les plaines alluviales, généralement dans les pays en voix de développement comme le Bangladesh, l'Inde, le Soudan et la Chine à cause des pluies saisonnières qui ont inondées de vastes régions du pays pendant plusieurs jours et même des semaines. Par contre les inondations du climat méditerranéen ne dépassent pas dans la plupart un jour. On note aussi que ce phénomène n'est pas rare dans les pays développés, par exemple, les États-Unis ont connu plus de 40 inondations entre 1928 et 1988.

Le tableau I.1 présente l'historique des crues à travers le monde qui est devenu un grand problème qui menace l'homme et l'environnement.

Tableau I.1: Les inondations dans le monde (Ghazli 2009)

Continent	Pays	Année	Victimes
L'Amérique	États-Unis d'Amérique	1913	500
	Mexique	1993	62
	Chili	1993	21
	Colombie	1993	27
	Costa Rica	1993	05
	Cuba	1993	49
	Équateur	1993	70
L'Asie	Honduras	1993	201
	L'Inde	1993	1690
	Iran	1993	375
	Malaisie	1993	07
	Népal	1993	1048
	Pakistan	1971	250000
	Chine	1911	100000
L'Europe	Royaume-Uni	1998	05
	Turquie	1948	332
		1956	138
		1968	147
	Grèce	1977	25
		1997	10
	Italie	1951	100
		1954	322
		1963	1189
		1966	113
	France	1988	10
		1992	47
	Espagne	1972	474
		1973	350
1982		104	
1996		87	
L'Afrique	Maroc	1995	243
	Algérie	1927	3000
	Tunisie	1969	542
		1982	117
	Égypte	1994	600
1995		501	
L'Australie	Australie	1955	50

2.10 Les conséquences des inondations en Algérie

Le territoire national soumis aux inondations qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social. D'après Le recensement effectué par les services de la protection civile une commune sur trois (48

communes) est susceptible d'être inondée en partie ou en totalité. Ces inondations sont les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus destructrices, provoquant d'importants dégâts humains et matériels comme montre le tableau I.2 (Zeggane 2017).

Tableau I.2: Les inondations en Algérie

La date	La région	Les dégâts
28 au 30 Mars 1974	Alger, Tizi Ouzou	-52 morts. -16 000 sinistrés. - 4570 maisons détruites. - 130 villages isolés. -13 ponts détruisent.
03 Février 1984	Constantine, Jijel	-20 morts à Jijel. - 1140 familles sinistrées à Constantine.
4 avril 1996	Annaba, El Tarf	-05 morts. -10 blessés. -endommageant les infrastructure de base et les terres agricoles.
23 septembre 2001	Bourdj bou Areridj, m'sila, Djelfa, Médéa, Bouira, Ain Defla, Tiaret	-27 morts. -84 blessés -941 familles touchées
Du 9 au 10 Novembre 2001	Alger (Bab El Oued)	-Plus de 712 morts. - 311 blessés - 1454 familles sans abri
Octobre 2008	Ghardaïa, Béchar, Naama, Mascara, l'Adrar et Sidi Bel Abbes et Saida et El Bayadh.	-87 morts. -endommagé de 16.000 logements, dont environ 5.500 ont été gravement touchés, et 2500 totalement détruits.
11-12 septembre 2009	Biskra	-164 maisons inondées -744 serres détruites -200 hectares de cultures perdues

Source : PC

3. Le risque d'inondation de l'Oued Béchar

La région de Béchar appartient à un climat désertique aride où sont rares les précipitations, et en contrepartie de fortes évaporations sont fréquentes pendant la période estivale ce qui entraîne une grande sécheresse, et rend la région rarement exposée à l'écoulement des crues qui sont séparées par des longues périodes ce qui excite la construction dans les zones du risque.

Malgré cette sécheresse, la région a subi des inondations, soudaines dûes à des pluies torrentielles provoquant des dégâts considérables et disparaissant en peu de temps.

3.1 Un aperçu historique sur les inondations de l'Oued Béchar

Malgré que notre région connaisse un déficit pluviométrique très important moyenne annuelle des précipitations n'excédant guère les 90 mm, il n'est pas rare que les précipitations orageuses violentes y sévissent produisent des dégâts importants en vies humaines et en matériels.

L'historique de la région de Béchar a connue des précipitations pluviales et les indices fournis par Lasserre sur Béni Ounif, localité située également au pied de l'atlas Saharien, peuvent s'appliquer aussi à la ville de Béchar (Halilou 2011).

Les hauteurs d'eau recueillies à Béchar pendant l'année agricole 1924-1925 sont les suivantes :

Du 1er septembre au 31 décembre 1924, reçoit 29mm Avec 11jours de pluie.

Du 1er janvier au 30 avril 1925, reçoit 36mm Avec 4 jours de pluie.

Du 1er mai au 31 aout 1925, reçoit 3 mm. Avec 3 jours de pluie. Soit, au total, 69 mm. Avec 18 jours de pluie.

Ces chiffres permettraient de considérer Béchar comme une région sèche si les relevés successifs apportaient les mêmes renseignements concordants ; par contre en 1927 a enregistré un totale de 295mm avec une chute considérable de 254 mm en mois de mai et on note aussi 107 mm en 1928 (Tableau I.3) (Halilou 2011).

Tableau I.3: Les Crues de l'Oued Béchar

Année	P (mm)	Année	P (mm)
1908-1909	65	1964-1965	48
1911-1912	103	1979-1980	40.7
1927-1928	295	1985-1986	52.5
1928-1929	107	1990-1991	48.6
1940-1941	47	1993-1994	108.3
1958-1959	77	2008-2007	151.8

Source : OMNA

Les crues de 1928 et de 2008 constituent toujours les crues de référence. Des crues importantes se sont produites ces dernières années ayant inondé les zones urbanisées et ont causé des pertes intéressantes parmi eux celles de 1991 et 1992, que leurs niveaux de l'hauteur d'eau ont dépassé les 4 m, et ont conduit tout ce qui a été sur ses trajets (dans certains cas, ces inondations ont ramené les mines plantées dans la région de la période coloniale).

Les dernières crues ont été celle de décembre 1999, octobre 2007 et octobre 2008, où de quantités importantes de pluie durant un laps de temps relativement très court.

Les principaux événements naturels recensés dans la ville concernent les inondations provoquées par de très fortes précipitations. Les événements les plus significatifs sont ceux :

3.1.1 L'inondation de 19-21 mars 1959 :

En 1959, l'effet de l'évènement était régionale qui a connu des chutes de pluie très importantes, où les services de la météorologie ont enregistré durant la période du 19 au 21 mars, les quantités suivantes dans le tableau I.4.

Tableau I.4: Les précipitations du 1959

Les communes	Les précipitations (mm)
Béchar	84 mm
Béni-Ounif	65mm
Abadla	60mm
Taghit	60mm
Béni-Abbes	51 mm
Kerzaz	40mm
Tabelbala	40mm

Ces précipitations exceptionnelles, tant par leur quantités que par leurs intensités ont occasionnés des crues d'une extrême violence qui ont provoqué des dégâts considérables dans la ville de Béchar (Figure I.1).

Le rapport émis par le préfet de la Saoura fait état d'environ de 1900 sinistrés ,470 maisons détruites et 50 tentes emportées.

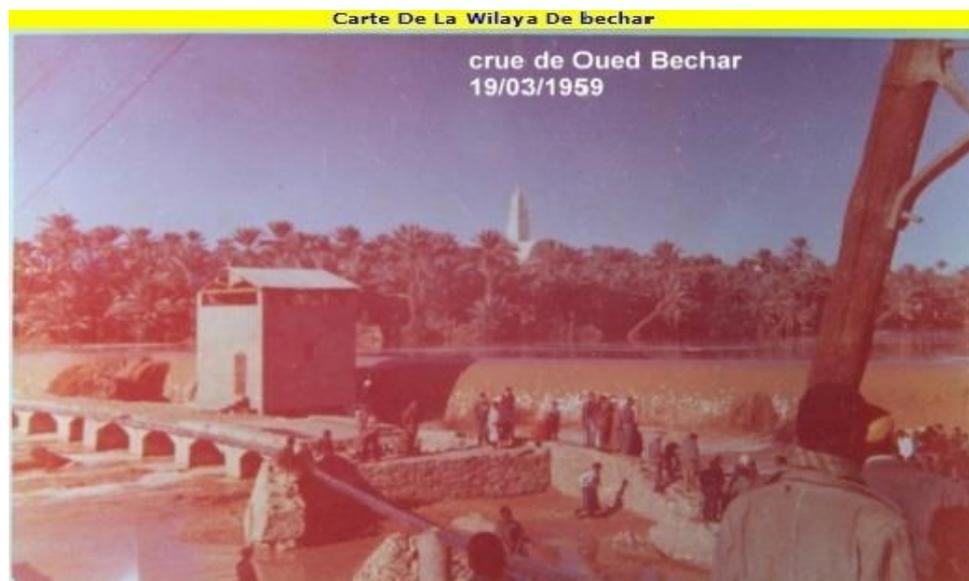


Figure I.1: La crue de l'Oued Béchar du 1959 (Halilou 2011)

Quant aux dégâts occasionnés à l'échelle de la région, ils ont été d'une très grande ampleur représentée par commune dans le tableau I.5.

Tableau I.5: Les dégâts enregistré par commune dans la crue du mars 1959

Les communes	Les dégâts enregistrés
Bechar	-25 maisons endommagées ,60 palmiers.
Béni-Ounif	-5 maisons effondrées ,23 autres endommagées -Endommagement du 3 km de voie ferrées ,169 palmiers ,30 puits envasés.
Igli	- 60 maisons endommagées ,28 puits détruits ou envasés. -1 véhicule emporté par les eaux.
Béni-Abbes	-222 maisons effondrées ,243 autres endommagées ,250 arbre fruitiers. -25 puits détruits ou envasés.
Louata	-14 maisons effondrées, 43 autres endommagées.
Kerzaz	-13 maisons effondrées, 43 autres endommagées. -74 puits avec pompes électriques endommagées.
Ouled-Khodeir	-134 maisons effondrées ou menacées d'effondrement, -62 puits envasés.

Un autre exemple de l'étendue d'un évènement régionale est celui du 25 au 30 septembre et du 08 au 09 octobre de l'année 1994 où les services de la météorologie ont enregistrés respectivement 14 mm et 45 mm à Bèchar provoquant 03 victimes par noyades et des centaines de sinistrés (Halilou 2011).

3.1.2 L'inondation de 18-19 octobre 2007

Les journées du 18-19 octobre 2007, une pluie torrentielle s'est abattue sur la région sud-ouest du pays, notamment sur la wilaya de Béchar. La ville de Béchar et ses environs ont connu 27 mm de pluie, sous forme de fortes averses.

De points de vue régionaux, tous les Oueds et Chaaba ont connu très fort crues l'Oued Ain Safra a emporté le pont reliant d'Ain Safra (W.Naama) et Béchar. Ce qui engendré l'isolement des autre wilayas de Béchar, d'Adrar et Tindouf, des wilayas du nord.

Le même scénario a été causé par les dégâts occasionnés au chemin de fer.

En ce qui concerne la ville de Béchar, deux personnes on été noyé.

L'Oued Béchar qui traverse la ville, a inondé une partie des quartiers Mer Niger et Béchar-Djedid en particulier la zone mitoyenne à berge droit de l'Oued et une école et des habitations sur la berge droite de l'Oued sur le secteur de Debdaba cette crue a endommagé les collecteurs du réseau d'assainissement. Toutes les Chaaba et les affluents de l'Oued Béchar ont connu de fortes crues sauf Oued El Faidja ce qui a occasionnée des dégâts sur les petits ponts situés sur la

route nationale RN°06 et la nouvelle rocade, sur les digues d'eau et l'activité d'élevage, les dommages causés par l'inondation d'octobre 2007 sont représentés dans le tableau I.6.

Tableau I.6: Les dommages d'inondation d'octobre 2007

Population (pertes en vie humaine, sinistrée)	-02 morts (noyés)
Voiries	-Endommagements des petits ponts sur la route nationale RN°06 et la nouvelle rocade. -Dégâts importants au niveau de la voie ferrée
Infrastructures	-Inondation de l'école de Hai Noor par le débordement d'Oued Bechar. -Inondation de quatre écoles par ruissellement des eaux pluviales en milieu urbain
Réseaux	-endommagements du collecteur D 400 mm, au niveau du pont Mirassoli - détérioration totale du regard de visite du collecteur principal D 600 mm, au niveau du pont Mirassoli - détérioration des regards de visite du collecteur principal D 400 mm, au niveau du pont Mirassoli -détérioration de la traversée du réseau d'assainissement de Hai Noor D 200mm - détérioration de la traversée du collecteur des eaux usées D 300mm, au niveau du lit de l'Oued, à Ouakda. - endommagements de la traversée du collecteur des eaux usées D 300mm, au niveau du pont Oued Ba Zaid. Réseaux -dégâts importants d'une partie du collecteur principale qui relie le tronçon P7 et P8, au niveau du pont Oued Ba Zaid.
Secteur de l'agriculture	-inondations de parcelles agricoles
Milieu naturel	-Erosions des berges des Oueds et des chaaba -pollution du lit d'Oued Bechar par les eaux usées
Secteur hydraulique	-Erosions partielles du remblai au niveau de la coulée gauche de la digue d'Ouakda. - Effondrement du mur de protection et du gabionnage de la berge droite, côté du pont d'Ouled Ba Zaid.

4. Le risque d'inondation du 10 octobre 2008

La plus grande inondation de toute l'histoire de la région est celle du 10 octobre 2008, où la montée était exceptionnelle des eaux de l'Oued Béchar. La hauteur maximale était entre 5,50 et 7 m, avec un débit estimé à 830 m³/sec.

Même selon les dégâts causés par cette dernière, c'est l'inondation la plus catastrophique du point de vue humaine, animale et socio-économique.

La perturbation atmosphérique qui a sévi du mercredi 08 au vendredi 10 octobre 2008 a

provoqué un changement dans le temps caractérisé par une baisse de la température et de fortes chutes de pluie.

Ces précipitations ont commencé le mercredi 08 octobre 2008 vers 19h00 pour se terminer le vendredi 10 octobre 2008 vers 08h30. Elles sont intensifiées le 09 octobre à 7h20 et le 10 octobre à 1h35, une hauteur de 84,6 mm d'eau a été recueillie durant ce laps de temps, correspondant à une intensité moyenne de 4,47 mm/heure.

4.1 Les cause d'inondation de l'Oued Béchar d'octobre 2008

En Octobre 2008, la région de Béchar a subit des quantités considérables des pluies torrentielles qui ont dépassé la moyenne annuelle où a été recueillie durant cette période environ 90 mm, Alors que la moyenne annuelle enregistrée dans la région est de 100 mm, ce qui a entraîné des très grande inondations (Figure I.2).

En plus, les facteurs qui ont aggravé le degré de cette inondation sont les précipitations considérables dans les régions frontières avec Béchar surtout celles du nord comme Naama et El Bayadh et le Maroc qui a leur tour alimentent le bassin versant de l'Oued Béchar.



Figure I.2: La prise lord de la crue d'octobre 2008 (Halilou 2011)

4.2 Les facteurs aggravant le risque d'inondation d'octobre 2008

4.2.1 Le rétrécissement du lit d'Oued

Le développement urbain et la construction illégale sur les deux côtés (bordures) de l'Oued ont provoqué un rétrécissement et des engorgements surtout dans certains endroits, qui ont conduit à l'obstruction et l'emprisonnement des eaux de la crue et donc inondé les zones environnantes qui l'entourent par exemple haï El Guettara.

Le rétrécissement du lit d'Oued avec les berges artificielles a provoqué l'immersion des quartiers voisine comme se produit au niveau du pont Oueld Ba Zaid et le quartier El Fath et le pont de la

Chouffane (Figure I.3).



Figure I.3: L'engorgement au niveau du pont la Chouffane (Halilou 2011)

4.2.2 Les virages tronqués

Les virages tronqués d'une manière artificielle sans études techniques et la dissimulation du béton le long du cours de l'Oued conduisent le débit d'eau à augmenter dans l'Oued, ce qui augmente la chance d'exposer la région au risque d'inondations par exemple : du haï El Nour qui a été complètement inondé par les eaux débordées de l'Oued.

Des autres facteurs indirects qui aggravent le risque d'inondation de la ville de Béchar comme :

- L'exploitation illícite du sable de l'Oued résulte à une destruction de sa structure (Figure I.4).
- l'élimination des palmiers et les parcelles agricoles dans certains endroits dans la ville qui maintiennent la cohésion du sol.



Figure I.4 : L'exploitation illícite du sable de l'Oued Béchar (Halilou 2011)

4.3 Les conséquences d'inondation de l'Oued Béchar d'octobre 2008

Trente-six heures de pluies torrentielles sans interruption ont suffi pour transformer la capitale de la Saoura et sa périphérie en gigantesques torrents de boue, cela a incité les autorités locales pour créer une cellule de crise installée à la wilaya pour prévenir et faire un diagnostic des dégâts causé par ce phénomène nous citerons ceux enregistrés dans la ville de Béchar comme suit:

4.3.1 Les dégâts du secteur de logements

Cette inondation a provoqué des dégâts considérables représentés par l'effondrement d'infrastructures (constructions et bâtiments), et le déplacement des personnes lors de la crue en plus l'isolement des populations des deux côtés de l'Oued, où ont été enregistrées environ 386 maisons classées inhabitables et 1590 habitations recensées au niveau de tout la wilaya et 70 familles sinistrées, évacuées au centre d'accueil des sinistrés réalisé dans le moment du précipitation au niveau d'une auberge de jeunesse, l'ex CFA et de l'école paramédicale.

Les quartiers les plus touchés par cette inondation sont ceux qui se situent sur les rives de l'Oued comme : Hai Djenene Dayf Allah, Hai Numéro, Le vieux Ksar, Hai Nour, Hai Gharassa, Hai Tinkroud, Hai El-Katara et a causé de la concentration d'une forte densité de population et du type de construction fragile tels que les bidons villes et les maisons construites en pisé (TOUB) (Figure I.5).

La cellule de crise qui a été désignée, a évalué les pertes enregistrées dans le secteur du logement par degré de vulnérabilité des bâtiments en quatre catégories (Halilou 2011).

-la première catégorie classée du signe rouge sont les maisons les plus touchées (destruction totale).

- la deuxième catégorie classée du signe orange correspondent aux maisons quasiment touchées

-la troisième catégorie classée du signe orange sont partiellement effondrées.

La quatrième catégorie classée du signe vert sont les maisons inondées qui ont subit l'infiltration des eaux de crue.



Figure 1.5 : Les dégâts du secteur du logement (quartier Mezarrif) (Halilou 2011)

4.3.2 Les dégâts du secteur de l'éducation

A connu un effondrement tout entier d'une école primaire Bessadet Cheikh dans le quartier Hai Nour, ainsi qu'une paralysie de la majorité des établissements scolaires qui ont été inondés.

4.3.3 Les dégâts du secteur de la formation professionnelle

Le centre Hafsi Slimane a subi un envasement d'eaux et de boue ce qui a provoqué l'effondrement du mur mitoyen à l'Oued.

4.3.4 Les dégâts du secteur des travaux publics

Ce secteur a connu des importants dégâts dans la ville sans compter ceux qui sont hors de la ville, où a été connu des grandes détériorations des routes ce qui a provoqué l'isolement de Béchar avec les autres wilayat du nord. La ville de Béchar a subi une paralysie, où les flaques d'eaux pluviales stagnantes ont entraîné l'arrêt de la circulation entre plusieurs quartiers et l'isolement des deux rives de l'Oued, ainsi que le dérivé de certaines routes et la détérioration des ponts du centre ville comme le pont de la Chouffane qui est endommagé et menacé de s'effondre ainsi que les deux ponts séparant le quartier Debdaba du centre-ville.

4.3.5 Les dégâts du secteur du transport

La détérioration du secteur précédent a créé des obstacles à la circulation des transports routiers et ferroviaires, ce qui a obligé les autorités à procéder l'interdiction de l'excès.

4.3.6 Les dégâts du secteur des mines

Les dégâts enregistrés ont conduit négativement à la vie des citoyens surtout au quartier Hai Nour à cause de la destruction du réseau électrique qui se trouve dans la trajectoire de l'Oued, ce qui a provoqué une coupure d'électricité pendant quelques jours.

4.3.7 Les dégâts du secteur d'hydraulique

Tous les réseaux (AEP, Assainissement, Eaux pluviales) ont connu des importants dégâts, où nous avons enregistré une coupure d'eaux potable dans certain quartier (Debdaba, Hai Nour).

Le réseau d'assainissement a connu généralement un grand blocage dû à la vase et un débordement des eaux usées dans certains quartiers.

En plus nous avons enregistré au niveau du lit de l'Oued une détérioration du réseau et la destruction de la majorité des équipements (regards, les berges artificielles....etc.) (Figure I.6).

On note ici que le reste des autres secteurs ont aussi subit des dégâts avec des degrés moins importants, on cite comme exemple la coupure des liaisons téléphoniques, le déracinement des palmiers et l'emporté de quelques animaux du jardin public riverain à l'Oued.



Figure I.6: Dégâts causée par l'inondation

4.3.8 Les conséquences sociologiques

A chaque fois que l'inondation se déclenche, elle laisse des affects marquant la population de la zone touchée (zone sinistrée) on les globalise comme suite :

- la peur et le stress où vivent les habitants voisins à l'Oued à chaque fois que les pluies tombent.
- les victimes de l'inondation quittent leurs logements vers d'autres hébergements temporaires et souvent difficiles à trouver et qui ne couvrent pas tous leurs besoins.
- les voies d'accès étant impraticables provoquent le manque de ravitaillement et conduisent à des affects sociaux négatifs comme le vol.
- la détérioration d'infrastructure conduit à un manque de vivre dans plusieurs domaines à savoir l'alimentation en eau potable et le manque de nourriture ce qui influe négativement à vie des citoyens.
- la propagation des maladies épidémiques.
- l'inondation s'est produite en hiver, le froid a formé un grand danger pour les personnes qui se trouvent sous les tentes provisoires.

4.3.9 Les conséquences positives

Vu que l'inondation fait beaucoup des dégâts et des conséquences négatives qui ont perturbé la stabilité du milieu, l'inondation reste toujours un élément naturel qui se produit pour le retour à l'origine, parmi ses conséquences positives :

- ressource naturelle d'eau qui alimente les barrages et les nappes.
- le dégagement de la vase du barrage lors de la crue.
- le nettoyage des lits de l'Oued des déchets ménagers et les eaux usées.
- le changement de la formation du sol ce qui donne sa fertilité.

4.4 L'évaluation du risque d'inondation

Le risque d'inondation s'évalue par le croisement des cartes thématiques relatives à la vulnérabilité de l'inondation et à l'aléa (facteur déclencheur).

- La carte de vulnérabilité à l'inondation provient de la combinaison de diverses cartes : la carte des pentes, la carte de densité de drainage, la carte des zones d'influence des cours d'eau et celle des domaines litho-structuraux (Figure I.7, Figure I.8).
- La carte de l'aléa établie par combinaison de la carte de la répartition spatiale des isohyètes et de celle de la couverture du sol.



Figure I.7: Litho-structuraux clair représente la hauteur des eaux dans une maison



Figure I.8: Litho-structuraux clair représente la hauteur des eaux dans une maison (Halilou 2011)

5. Formation des crues et la réaction hydrologique

Le processus de la genèse de crue est le résultat de plusieurs processus concomitants. Il peut être le résultat de l'écoulement superficiel ou souterrain ou les deux ensembles.

Les crues sont de trois types :

- **Les crues d'averses** : Ce sont les crues les plus connues et plus répandues.
- **Les crues de fonte de neige** : Caractéristiques aux régimes climatiques neigeux. Elles sont liées à l'augmentation de température.
- **Les crues d'embâcles** : Généralement dues aux blocs de glaces ou troncs d'arbres qui s'accumulent formant des petits barrages et provoquant des inondations à l'amont.

La débâcle est l'effet de la rupture de ces petits barrages résultant des inondations à l'aval (Chachoua 2010).

5.1 Développement de la formation de crue

La chronique des débits dans un cours d'eau caractérise deux types d'écoulement: l'écoulement de base où les eaux ne dépassent pas un niveau bas quasiment stable, et l'écoulement rapide ou crue.

Ce régime d'écoulement est lié étroitement au régime de précipitation avec un décalage dans le temps que nous observons lorsqu'on compare une série de pluies-débits instantanées.

Le volume d'eau précipitée se répartit en eau interceptée, évaporée, infiltrée, et ruisselée.

Les deux dernières formes contribuent à l'écoulement dans les cours d'eau augmentant les crues.

Le processus de la genèse de crues diffère selon le régime de précipitation ainsi que selon les caractéristiques morphologiques et biomécanique du bassin versant (Chachoua 2010).

5.1.1 Théorème de Horton

La genèse de crue a fait l'objet de plusieurs théories en hydrologie ; la première conception était de Horton qui a considéré que les crues sont générées par un ruissèlement de surface se produisant sur l'ensemble du bassin versant lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration des sols (Cosandey et al 2000).

Cette capacité est caractérisée par l'infiltrabilité et supposée décroissante tout au long de l'épisode pluvieux jusqu'à une valeur minimale où une infime partie de l'eau peut s'infiltrer et le reste participe à l'écoulement de surface.

Dans cette conception Hortonienne la partie d'eau infiltrée rejoint les nappes souterraines par percolation, ou les cours d'eau par écoulement hypodermique retardé, qui par conséquent ne contribue pas à la genèse de crue. Donc l'ensemble du bassin versant contribue et seulement une partie des précipitations contribue à l'écoulement (Chachoua 2010).

5.1.2 Théorème des aires contributives

Le théorème de Horton restait pour des longues années l'explication la plus fondée du processus de la genèse des crues, ce qui incitait les chercheurs à s'orienter vers une meilleure détermination de deux facteurs, capacité minimale d'infiltration, et intensité des pluies. Pour l'établissement de la fonction de production $Q=f(I, k_{inf})$, les recherches menées dans ce sens par les observations sur le terrain, et les chercheurs ont constaté que :

- L'intensité des pluies ne joue pas toujours un rôle essentiel pour déterminer le volume d'eau ayant contribué à l'écoulement de crue.
- Des valeurs mesurées de la capacité d'infiltration sont bien supérieures à des intensités de pluies.

- L'absence de ruissellement sur le bassin versant même pendant des grosses crues.

Cappus en 1960 était le premier, suite à ses recherches dans des milieux agricoles et pastorales, qui présentait une explication différente de celle de Horton consistait que « le ruissellement est le produit de la totalité de la pluie tombante sur une zone imperméable ou saturée, dont l'étendue varie avec le niveau moyen de la nappe phréatique » (Cosandey et al 2000). La même idée dite de « surfaces contributives » était évoquée par Hewlett en 1961 sauf que ce dernier a mené ses recherches dans un milieu forestier (Figure I.9) (Chachoua 2010)..

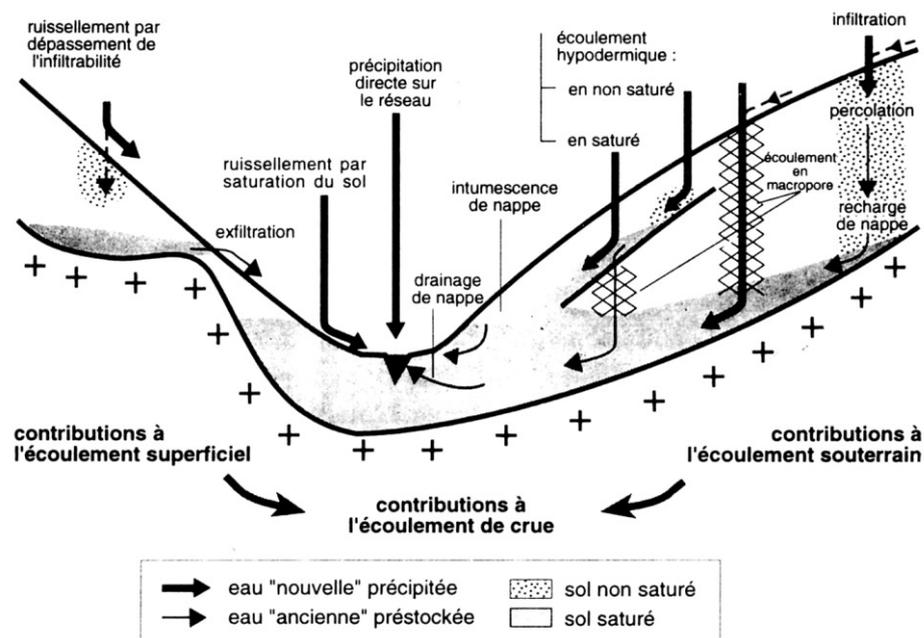


Figure I.9: Genèse de crues, principaux processus d'écoulement (Kreis 2004)

5.2 Les facteurs influençant la réponse hydrologique

Les facteurs influençant la réponse hydrologique de bassin versant peuvent être groupés en deux ensembles :

5.2.1 Facteurs intrinsèques

Ce sont des facteurs liés aux caractéristiques du bassin versant, dont on peut citer :

- Caractéristiques morphologiques du bassin versant (forme, hypsométrie, orientation des versants).
- Propriétés physiques du bassin versant (nature de sol, couvert végétaletc).
- Etat hydrique antécédent du sol.
- Physiographie (caractéristiques du réseau hydrographique) (Chachoua 2010).

5.2.2 Facteurs extrinsèques

Ce sont les facteurs relatifs aux conditions climatiques du milieu et la répartition spatio-temporelle des précipitations (Chachoua 2010).

5.3 Schématisation de la réaction Hydrologique

Le processus de la genèse de crue est conditionné par la succession de deux fonctions (Figure I.10).

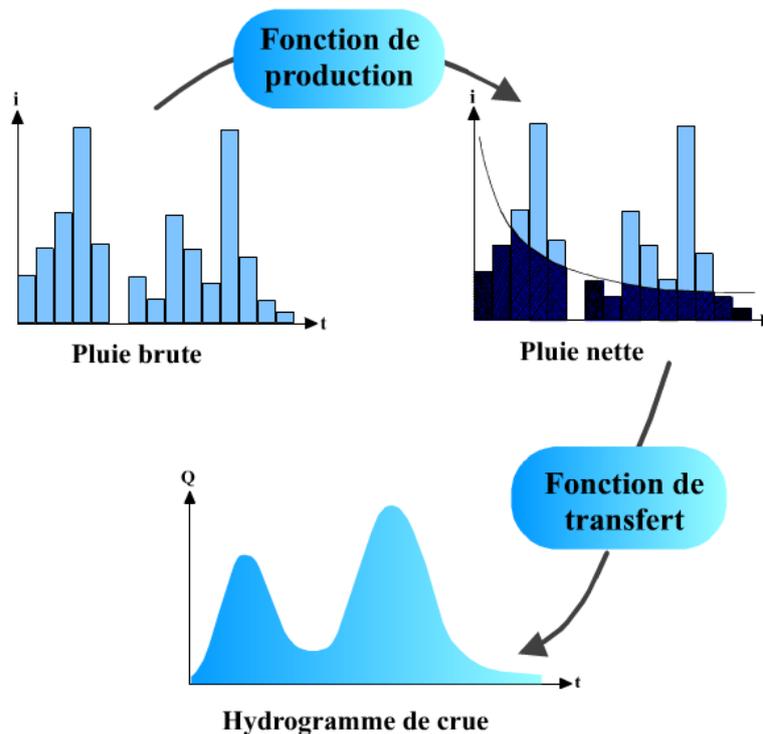


Figure I.10: Génération de débit de crue (Musey et al 2004)

Fonction de production : c'est la fonction qui décrit le passage de la pluie brute à la pluie nette.

Fonction de transfert : cette fonction consiste à établir l'hydrogramme de crue à partir de la pluie nette (Chachoua 2010).

La transformation pluie-débit peut être schématisée comme le montre la figure I.11, l'hydrogramme de crue qui prend la forme de cloche comprend les temps caractéristiques suivants :

Temps de base (t_b) : c'est la durée de ruissellement directe.

Temps de réponse (t_p) : c'est l'intervalle de temps entre la pointe de crue et le centre de gravité de la pluie nette.

Temps de concentration (t_c) : il est estimé par la durée entre la fin de la pluie nette et la fin de ruissellement directe. Il présente le temps dans lequel tout le bassin versant participe à l'écoulement.

Temps de montée (t_m) : C'est le temps compris entre le début de la montée de crue et la pointe de l'hydrogramme (Chachoua 2010).

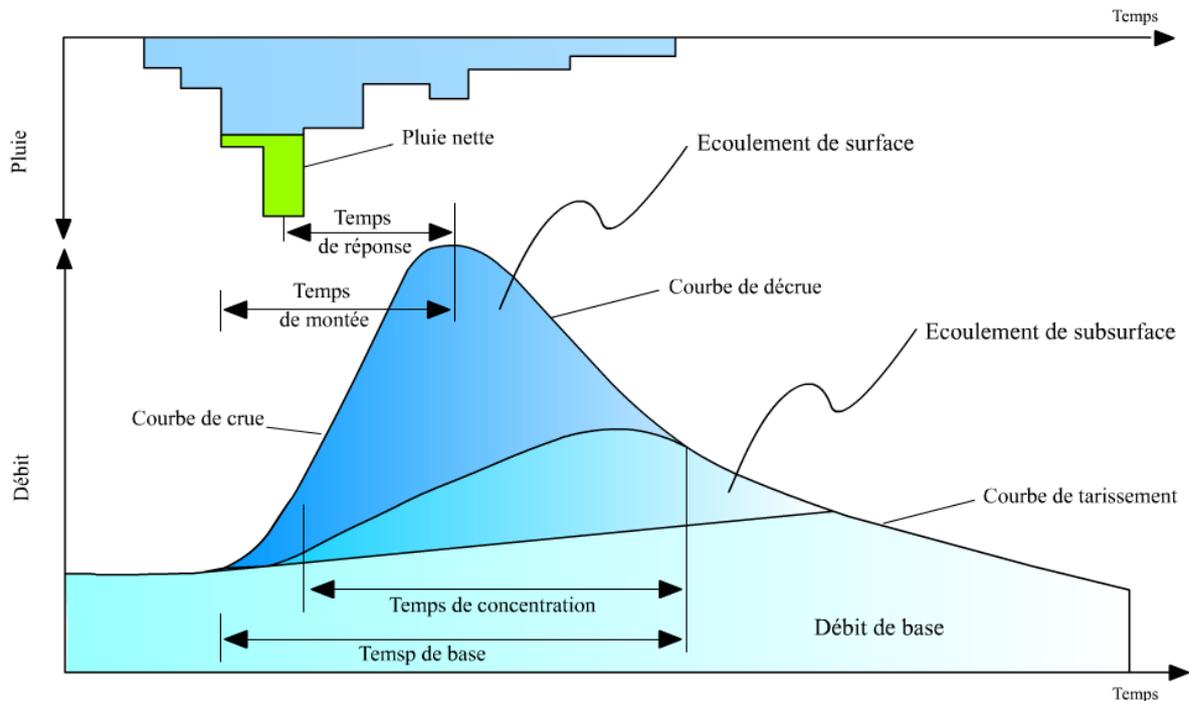


Figure I.11: Hyétogramme et hydrogramme résultant d'un évènement Pluie-Débit
(Musey et al 2004)

6. Risque d'inondation

Le risque d'inondation est défini par le croisement de deux composantes, l'aléa décrit à partir de phénomène aléatoire de crue et la morphologie de cours d'eau, et la vulnérabilité déterminée en fonction des conséquences prévisibles des inondations sur les personnes et leurs biens (Figure I.12) (Chachoua 2010).

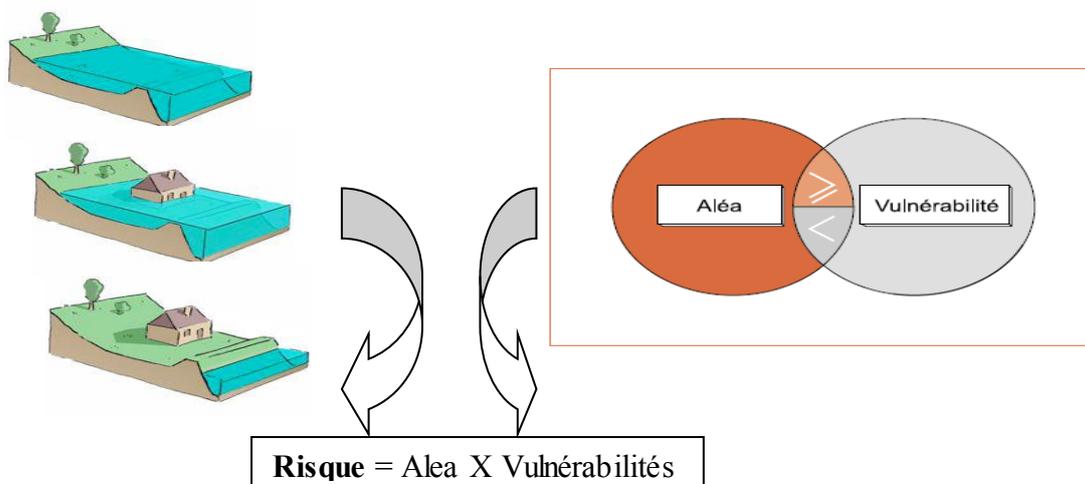


Figure I.12: Risque d'inondation

La détermination de risque est loin d'être maîtrisée vu la variabilité spatio-temporelle de deux composantes qui la constituent (Chachoua 2010).

7. L'aléa

L'aléa semble le terme le plus adéquat pour définir le phénomène physique, naturel et non maîtrisable, d'occurrence et d'intensité donnée (définition du ministère de l'environnement et de développement durable français). Cette définition révèle le caractère hasardeux du risque et le faire différencier de sa définition linguistique qui le présente comme un risque et non pas un de ses composantes (Chachoua 2010).

Dans notre cas où le risque est l'inondation l'aléa n'est que le phénomène naturel de crue non maîtrisable d'occurrence et aléatoires, cette prévision est probabiliste et la détermination de l'intensité et la fréquence de crue est basée sur le traitement stochastique de l'historique des événements où la longueur de la série observée joue un rôle principal sur la validité des prévisions. Néanmoins la notion de période de retour est purement statistique et elle ne correspond qu'à l'appréciation de l'intensité du phénomène en comparaison à d'autres (Henry 2004).

En résumé les éléments constituant de l'aléa sont :

- Une fréquence d'occurrence
- Une extension spatiale
- Une durée

8. La vulnérabilité

La vulnérabilité est une notion composite. Elle prend en compte divers paramètres géographique et socioéconomique. Plusieurs définitions existent dans la littérature, parmi lesquelles on choisit deux définitions officielles :

- **La définition de MEDD** (le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable français) « la vulnérabilité est le niveau des conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux »
- **Et celle de NOAA** (National Oceanic and Atmospheric Administration) « la susceptibilité des ressources à être affectées par des aléas »

Les enjeux sont les éléments à risque (personne, biens, activités, patrimoine.....) attribuent à la vulnérabilité une dimension complexe quantitative et qualitative (Chachoua 2010).

La notion de vulnérabilité peut être résumée en quatre points:

- La perception sociale de l'aléa.
- L'aléa est ses conséquences prévisibles sur les enjeux.

- Les dispositions prises pour limiter l'effet de l'aléa.
- Les enjeux.

Cette complexité de concepts d'aléa et de vulnérabilité montre que la considération de risque sommairement comme un produit de deux facteurs est limitative et pour mettre en œuvre une politique de gestion précise et scientifique, on doit décomposer ces deux facteurs en plusieurs éléments afin de déterminer ces susceptibles d'être maîtriser pour minimiser le risque (Henry 2004).

9. Gestion des risques

Le phénomène d'inondation à l'échelle des bassins versant est un phénomène cyclique et continu, il se décompose en plusieurs étapes dont chacune a son propre temps d'action et d'analyse, ses propres acteurs et domaines d'application. On peut classer ces étapes par ordre d'action comme suit (Henry 2004) :

9.1 La prévision

La prévision est relative à l'aléa, elle consiste à la modélisation du phénomène naturel et l'observation instantanée et régulière des variables descriptives. Les informations qu'on tire de cette prévision sont de deux types :

A long terme : intensité et probabilité d'occurrence de crue.

En temps réel : valeurs des variables météorologiques en temps réel (Chachoua 2010).

9.2 La prévention

Consiste à l'analyse des données fournies par la modélisation, afin de mettre en œuvre les politiques et recommandations pour lutter contre les dégâts d'un événement de probabilité d'occurrence donnée. On ne peut pas se protéger entièrement de risque mais selon les moyens qu'on dispose on choisit la meilleure façon de se protéger d'un aléa d'occurrence fixé préalablement (Chachoua 2010).

9.3 Annonce et alerte

Basée sur la prévision en temps réel des facteurs météorologiques, elle permet de préparer les moyens et sensibiliser la population, et dans le cas échéant procéder à l'évacuation et la mise en place des mesures de gestion de crise (Chachoua 2010).

9.4 Gestion de crise

Planifiée précédemment par des plans de gestion et de formation des éléments de secours, permet de bien gérer la situation en cours et protéger les biens et les personnes, elle permet ainsi de remédier instantanément aux conséquences de l'événement qui peuvent aggraver la crise (ouverture des voies, pannes de téléphones et d'électricité.....etc) (Chachoua 2010).

9.5 Analyse post crise

Consiste à analyser les étapes précédentes et détecter les défaillances de plans de gestion et des résultats de calcul afin d'améliorer les qualités des factures d'interventions (Chachoua 2010).

10. Gestion de l'aléa

Notre travail est focalisé sur la gestion de crue (l'aléa) sans négliger la deuxième composante (la vulnérabilité) qui sera abordée de façon que cette étude réponde à la notion de gestion intégrée de crue (Chachoua 2010).

10.1 Prévision de crue

La prévision est l'étape la plus importante dans tout travail d'aménagement hydraulique, il s'agit de choisir un débit et forcer un risque de dépassement de ce débit (Miquel 1984).

En plus pour la gestion de crues on se trouve devant la nécessité de prédire la crue en temps réel, ce qui nous amène à décomposer la prévision de crue selon deux exigences :

- *L'estimation des probabilités de crue* ; il s'agit de prédéterminer la fréquence d'apparition d'un débit donnée.
- *L'estimation de la réponse hydrologique en temps réel* (relation pluies-débit).

L'approche statistique reste la meilleure façon d'avoir une telle information, cependant ils existent d'autres méthodes empiriques et déterministes basées sur le régime climatique de la région, mais elles sont à éviter vu les résultats maximisés qu'elles fournissent « aussi incertaine soit elle, reste la moins mauvaise façon d'effectuer un dimensionnement » (Miquel 1984).

Les méthodes de prévision de crues se rangent en quatre catégories :

- Les méthodes à échantillonnage fixes (maximas annuels).
- Les méthodes de type renouvellement.
- Les méthodes hydrométéorologiques.
- Les méthodes stochastiques.

10.1.1 Méthode de maxima annuels

C'est la méthode la plus répandue dans la littérature, et la plus simple à mettre en œuvre, son idée est de relever toutes les crues maximales de chaque année et de faire une analyse fréquentielle où le débit Q est la variable aléatoire et on cherche parmi les lois d'ajustement classiques celle qui s'ajuste le mieux avec la série des maximas annuels observés. L'inconvénient de cette méthode d'une longue série d'observations est le nombre d'années élevé où les Q maximums dépassent la crue fixée (Chachoua 2010).

10.1.2 Méthode de renouvellement

Son principe est de fixer un seuil critique et de coupler la probabilité de débit de crues qui dépassent ce seuil avec la probabilité de l'occurrence d'apparition dans le temps de ces crues, afin d'obtenir le risque annuel de dépassement d'un certain débit, le choix de seuil est fait de façon qu'il réponde à un compromis de deux tendances, le seuil élevé implique l'indépendance des crues et l'homogénéité d'échantillon que le seuil bas augmente le nombre des crues retenue et par conséquence améliorer l'échantillonnage (Miquel 1984).

10.1.3 Les méthodes hydrométéorologiques

Leur application donne des résultats faibles pour des bassins versants de taille limitée. Elles intègrent l'approche conceptuelle de mécanisme interne de bassin versant. Leurs inconvénients est d'ajouter l'incertitude de mesures météorologiques au processus de calcul. Néanmoins, ils sont très utiles dans les bassins versants mal jaugés ou les mesures hydrométriques font défaut (Chachoua 2010).

10.1.4 Les méthodes stochastiques

Les méthodes sont basées sur le traitement spastique des données journalières ou mensuelles, leur utilité est d'étudier des variables complexes, avec l'inconvénient de mauvais contrôle d'incertitude (Chachoua 2010).

10.1.5 Relation pluies-débites

Les données d'entrée sont des données météorologiques (histogramme de pluie) issues par calcul statistique des pluies historique ou par prévision météorologique. La modélisation faite pour obtenir une relation pluies-débites traduisant la réponse hydrologique du bassin versant. Le modèle étant établie et par conséquences les débits correspondants, ce modèle sera utilisé pour prédire les débits de crues à partir des pluies escomptées.

Les modèles qui peuvent être utilisés sont divers autant qu'ils rendent le choix de modèle adéquat pour une tache relativement délicate (Chachoua 2010).

10.2 Choix entre modèles

Le choix d'un modèle hydrologique se fait en fonction des éléments suivants :

- Objectif de l'étude hydrologique : les objectifs de l'étude hydrologique sont multiples selon lesquels on peut négliger ou simplifier certain paramètres dans la modélisation.
- Disponibilité de données : en dépit des incertitudes que présentent des modèles par rapport à d'autres le manque de données nous contraigne à les utiliser.
- Nature de modèle, la robustesse et la simplicité de modèle influence le choix en particulier dans le cas où le temps ou le coût présente une contrainte.

Musey. A et Higy. Ch ont réalisé un tableau I.7 qui illustre un exemple de classification de choix de modélisation selon les critères précédents (Musey et al 2004).

10.3 Notion de crue projet

Tout calcul de redimensionnement des aménagements hydrologiques évoque la notion de la crue de projet, ce débit est choisi selon deux cas :

- Le choix à partir d’une étude économique des conséquences, on étudie tous les scénarios possibles afin de choisir le plus optimale.
- Le choix à partir d’un risque hydrologique fixé (période de retour T) duquel on déduit la crue correspondante.

De point de vu probabilité, on ne peut pas se protéger de tout évènement hydrologique, et les contraintes financières ne sont pas à négligées. En résumé, dans les deux cas le choix est lié à la vulnérabilité, et un passage par une étude économique, si c’est possible, reste le choix le plus rationnel (Chachoua 2010).

Tableau I.7: Méthodes d’estimation des crues du type de données et des objectifs (Chachoua 2010)

Variable de dimensionnement	Données nécessaires enregistrées dans le bassin versant		Pas de données
	Type de données	Méthodes	
Débit de pointe	- Longue série de débits maximaux - Longue série de précipitations maximales (P_{max}) - Courte série de débits maximaux (Q_{max}) Courbes IDF	- Analyse fréquentielle - GRADEX et méthodes dérivées - Méthodes rationnelles et méthodes dérivées	- Formules empiriques - Méthodes régionales - Méthodes analogiques
Hydrogramme de crue	- Courbes séries concomitantes de précipitations et de débits et courbes IDF - Longue série de débits	- Méthode hydrologique simple (hydrogramme unitaire, méthode du SCS-CN) - Méthode déterministe	- Hydrogramme unitaire synthétique - Coefficient de ruissellement - Pluie de projet

		<ul style="list-style-type: none"> - Courbes QDF et hydrogramme synthétique monofréquence - Catalogue de crue et analyse fréquentielle 	
Scénarios de crues historique et / ou probables	<ul style="list-style-type: none"> - Courtes séries concomitantes de précipitations et de débit et longues séries de précipitations 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode de simulation continue. Calage sur la courte série de pluie-débits puis validation sur une longue série de débits à partir d'une longue série de précipitations. - Modèle stochastique de précipitation pour générer des chroniques synthétiques de pluie 	

10.4 Mesures pour réduire de l'aléa

10.4.1 Aménagements en versant avant le lit de cours d'eau

Les aménagements des bassins versants ont plusieurs avantages sur les ruissellements de crue et sur l'érosion.

Leur implantation en zone rurale se fait en fonction de la topographie en repérant sur la carte topographique.

En zone urbanisée, la réalisation de nombreux espaces de stockage de différentes natures se fait selon l'influence relative au volume d'eau ruisselé (Chachoua 2010).

10.4.2 Changement d'occupation de sol

Le reboisement est une technique qui favorise la stabilité du sol contre l'érosion et ralentit le ruissellement par conséquent lamine les crues, l'effet de réduction de ruissellement n'est pas illimité lorsqu'ils tombent des grands volumes dans des courtes durées (Chachoua 2010).

10.4.2.1 Banquettes

La technique des banquettes est de doubles objectifs, la lutte contre l'érosion et la réduction de ruissellement en favorisant l'infiltration dûe à la diminution de pente (Tableau I.8). Leurs effets

sont considérables dans la défense et la restauration du sol. La banquette mécanique se divise en quatre zones (Figure I.13) :

- 1) Le fossé large reçoit les eaux de ruissellement de l'impluvium
- 2) Le talus reçoit la pluie et un apport latéral des eaux du fossé
- 3) L'impluvium à l'amont du fossé ; zone cultivé entre les bourrelets.
- 4) La zone de l'impluvium à l'aval est proche du bourrelet qui pourrait recevoir un appoint d'eau par drainage à travers le bourrelet lors des grosses averses (Chachoua 2010).



Figure I.13: Réseau de banquettes dégradées avec plantation d'arbres fruitiers dans le secteur Trara-Tlemcen (Algérie) (Morsli 2008)

Tableau I.8: Banquettes en fonction de pente et type de culture (Chachoua 2010)

Culture	Pente du terrain	Type de banquette
Céréales	2 à 3 %	Labours horizontaux
	3 à 6%	Cultures à bandes
	3 à 5%	Banquette à triple courbure
	5 à 12%	Banquette à double courbure
	12 à 18%	Banquette à simple courbure
	18 à 30%	Banquette à talus coupé en V
	30 à 50%	Banquette à profil en V
Céréales et arbres fruitiers, sur bourrelet	< 18%	Banquette à simple courbure
	< 30%	Banquette à talus coupé
	< 50%	Banquette à profil normal

Arbre fruitiers vignes	< 30%	Banquette à talus coupé
	< 50%	Banquette à profil normal
	< 30%	Banquette à talus coupé
Pâturage et reboisement	< 80%	Banquette à profil en V

10.4.2.2 Le reboisement

En plus de leur rôle à développer le volet écologique et touristique, les forêts ont un rôle considérable dans la conservation de sol et des eaux.

Le volume intercepté de pluie est non négligeable et contribue dans le ralentissement de la montée de crue et en opposé, on doit conserver les forêts existantes contre le reboisement (un fort accroissement de ruissellement a été observé après des coupes sélectives des forêts, (Bruijnzel 1999).

Le taux d'infiltration sous un couvert végétal naturel non modifié est généralement élevé ; et le ruissellement est un phénomène relativement rare sauf dans le cas de pluie exceptionnellement violente (Chachoua 2010).

Le choix des espèces utilisées dans le reboisement se base sur les altitudes et le type de voie (Tableau I.9).

Tableau I.9: Différents plantes utilisées dans le reboisement (Khentouche 2005)

Catégories des plantes	Types des plantes	Champs d'implantations
Résineux	Pins halpensis pin d'alep Pinus pinea Pinus coulteri Cedrus etlantica Juniperus phonicea	calcaire siliceux altitudes élevées
	Cuprussus semperirense Cuprussus arisonica Cuprussus globra	calcaire siliceux
	Abies numidica Pinus nigra	altitudes élevées calcaire
Feuillus	Ilex quercus Quercus afares	altitudes moyennes
	Castanea vesca Populus nigra peulier noir Populus alba peulier blanche	lits des Oueds (calcaire siliceux)
	Fraxinus angustofilia Fraxinus dimorpha frêne	ped de monts (calcaire siliceux)
	Celtis australis	
	Pistatia atlantica Morus alba	

	Robinia pseudo acacia	
	Eleagnus angustifolia	
Eucalyptus	Eucalyptus camaldulensis Eucalyptus geophcephale Eucalyptus melliodora	lits des Oueds altitudes moyennes (marnes-alluvionnées)
Arbres fruitiers	Amygdalus Fircus carcia figuier	altitudes moyennes (plaines) (marnes)
	Olea europea	calcaire, marnes
	Certonia siliqua Crategus Monnagyna aubepine	calcaire, marnes glacis, piémonts

10.4.3 Aménagement en lit mineur

10.4.3.1 Correction torrentielle

Selon la pente, les rivières se classent en trois types, dans les rivières torrentielles la vitesse d'écoulement est très élevée et provoque le transport des éléments par la force de l'eau sous forme de laves torrentielles, pour diminuer cette vitesse, on utilise les travaux de correction torrentielle qui consistent à implanter des digues le long du cours d'eau (Figure I.14) (Chachoua 2010).

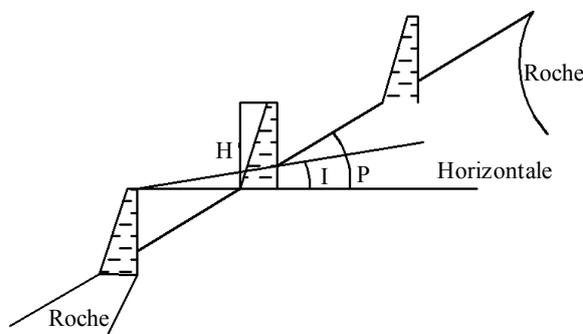


Figure I.14: Correction torrentiel (Belghobra 2006)

Le dimensionnement des digues se fait selon la formule suivante (Khentouche 2005):

$$N = L \cdot \frac{P - I}{H} \tag{I.1}$$

Avec :

N : nombre de digues

L : longueur de ravin (m)

P : pente moyenne (m/m)

H : hauteur moyenne des digues (1m à 2m)

I : pente de compensation (pente-inter digue) (m\m)

10.4.3.2 Barrage écrêteur

Le barrage écrêteur a pour but l'écrêtement des crues, et parfois à vacations multiples, son principe de fonctionnement est de stocker temporairement un certain volume dans le lit du cours d'eau de façon à diminuer le débit de crue en aval selon le schéma suivant (Figure I.15) (Duglas 2004).

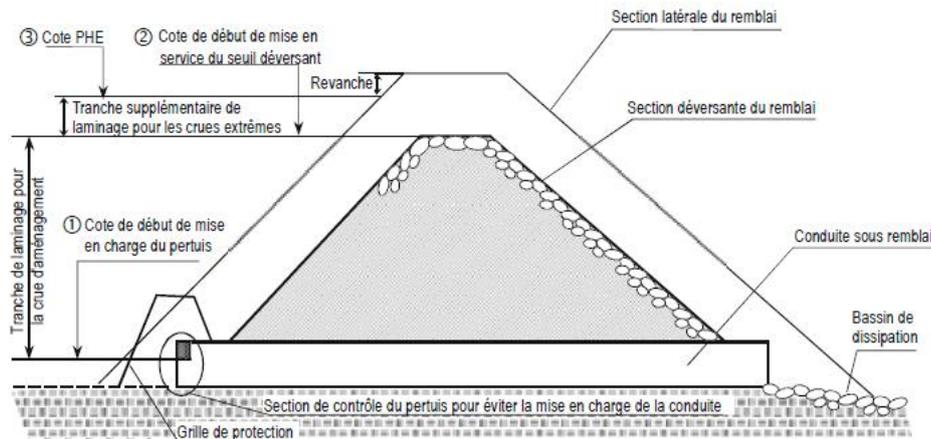


Figure I.15: Schéma de fonctionnement d'un barrage écrêteur de crues (Duglas 2004)

Par un pertuis de fond dimensionné de façon qu'il permette l'écoulement ordinaire et de crues fréquentes et limiter le débit en aval selon les enjeux à protéger contre l'inondation. En cas de crue qui dépasse la capacité de pertuis, le barrage se remplit progressivement et se vide lentement par le pertuis en fin de crue. En cas où la crue est très forte et le volume d'eau dépasse la capacité de stockage du barrage, le débit excédent s'évacue par le déversoir de sécurité.

Il reste à noter le risque de rupture de barrage sur la partie aval du barrage ce qui nécessite le contrôle et nettoyage permanent des végétations qui peuvent pousser sur les pertuis (Chachoua 2010).

10.4.3.3 Création des zones d'expansion de crue

Le principe est proche à celui de barrage écrêteur. Il consiste à aménager un rétrécissement d'une section sur le cours d'eau afin d'augmenter la ligne d'eau en amont et si nécessaire de construire des remblais barrant le lit majeur. Le fonctionnement de tel aménagement est plus proche du fonctionnement naturel (Chachoua 2010).

Les champs d'expansion doivent prendre en considération la nature juridique des espaces aménagés afin d'indemniser les propriétaires ou les expropriés.

Ce type d'aménagement n'a que peu d'impact sur la vie aquatique de la rivière et sur son fonctionnement (Duglas 2004).

10.4.3.4 Ouvrages de stockage en dérivation

Contrairement au fonctionnement naturel des champs d'expansion, ce type d'ouvrages est alimenté par dérivation de cours d'eau par un ouvrage de prise et un canal d'amené.

Les bassins de stockage sont creusés dans le terrain naturel ou par construction de digue.

Selon la topographie, ils peuvent être aménagés en plusieurs bassins en cascade qui se remplissent successivement de l'amont vers l'aval par diversement (Chachoua 2010).

Le schéma de fonctionnement de ces ouvrages est montré dans la figure I.16.

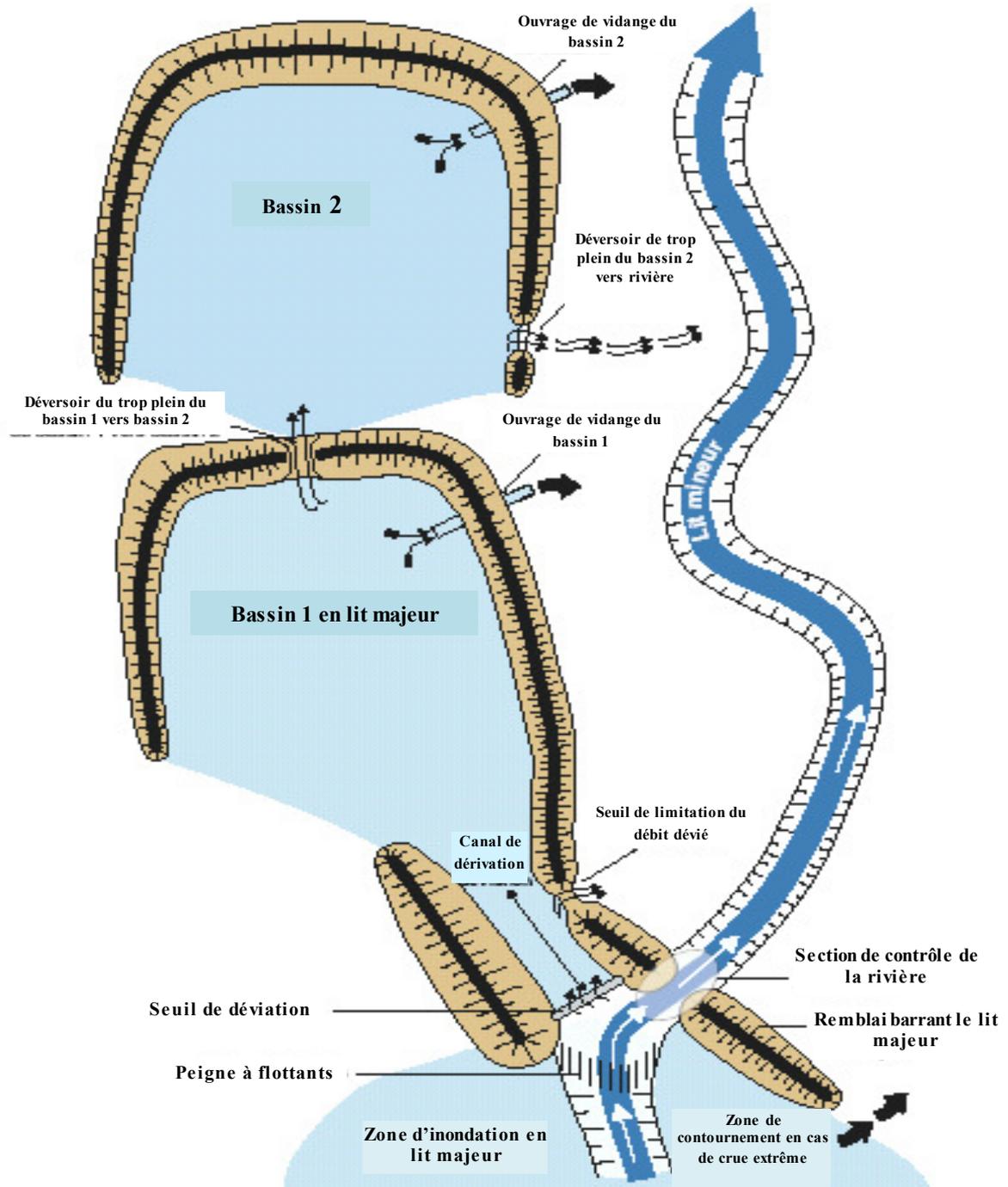


Figure I.16: Fonctionnement hydraulique d'ouvrages de stockage en dérivation (Duglas 2004)

L'ouvrage n'entre en jeu que lorsque la crue dépasse une certaine hauteur. En cas de crue exceptionnelle un dispositif de sécurité limite les débits déversés pour protéger les bassins de surverse (Chachoua 2010).

10.4.3.5 Dignes de protection contre les inondations

Il s'agit d'aménagement longitudinal le long des berges qui sert à protéger de l'inondation des zones où sont présents des enjeux importants (habitations, zones commerciales, industrielles.....etc.).

Les digues sont des ouvrages dont au moins une partie est construite au dessus de niveau de terrain naturel destinés à contenir le flux d'eau dans les périodes de crue afin de protéger les zones des inondations (Figure I.17) (Meriaux 2001).

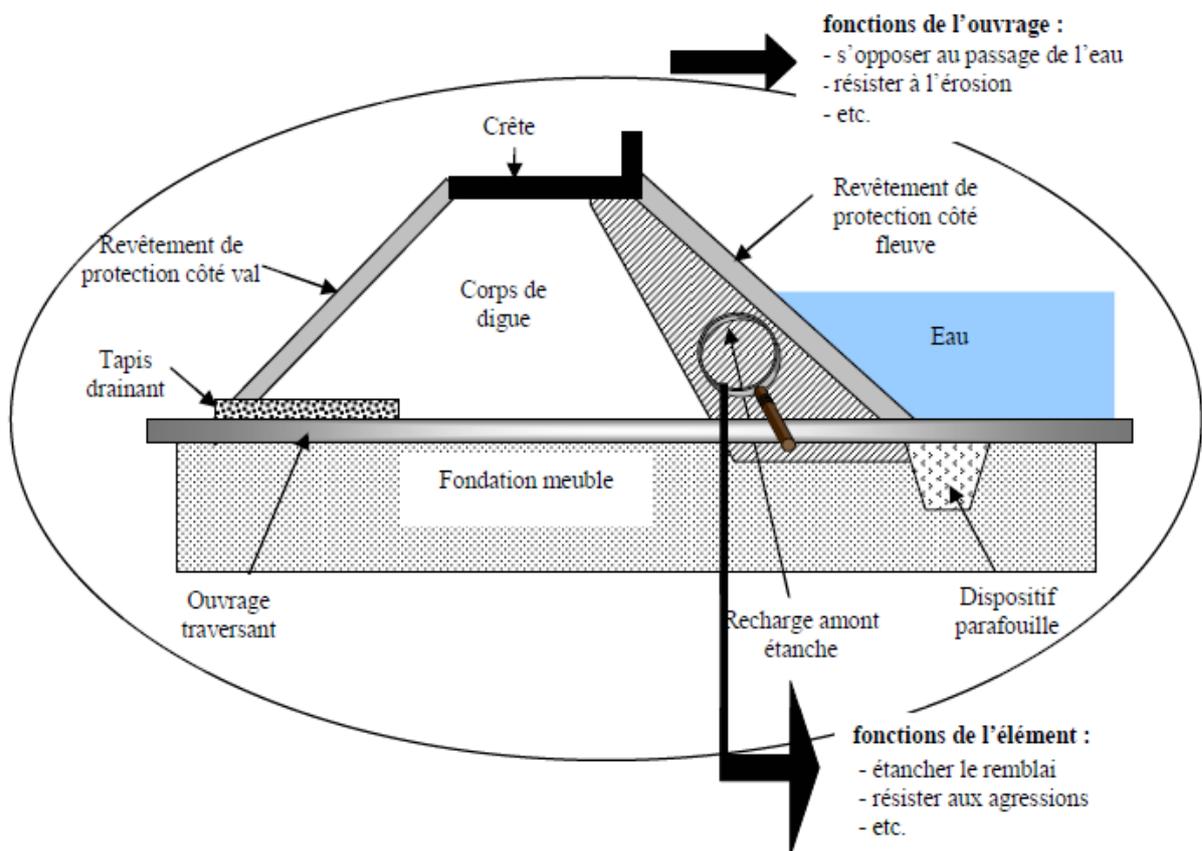


Figure I.17: Schéma de digue (Serre 2005)

Le fonctionnement hydraulique d'une vallée endiguée peut être décrit comme suit (Figure I.18):

- A la montée de crue, la rivière déborde de son lit.
- La digue limite les crues relativement fortes mais elle surélève la ligne d'eau là où la présence des digues conduit à rétrécir sensiblement la largeur du lit naturel.
- Dans le cas des fortes crues, le rôle des digues est limité, et la vallée sera complètement inondée.

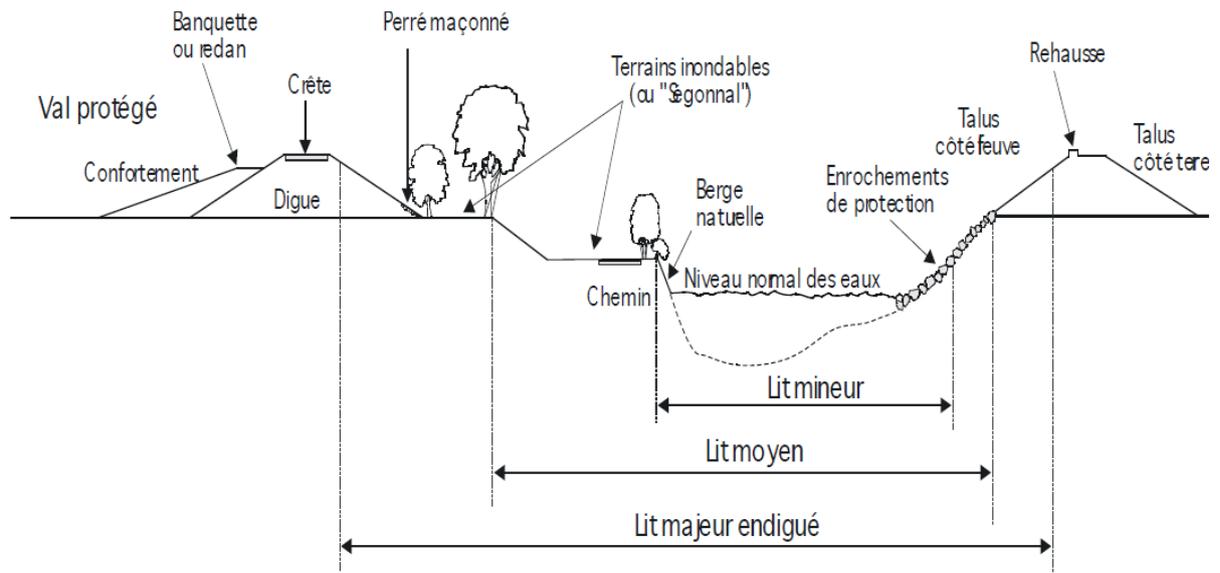


Figure I.18: Coupe type de vallée endiguée (Mériaux 2001)

Les digues peuvent être de différents types (génie civil, enrochée, enherbée) (Figure I.19).



Digue en enrochement



Digue en béton

Figure I.19: Quelques types des digues

10.5 Mesures pour réduire la vulnérabilité

Les mesures de réduction de la vulnérabilité ont pour but de réduire les conséquences néfastes de l'inondation. Ces mesures sont multiples, elles doivent être précédées par la délimitation des zones à risque et la détermination des enjeux (Chachoua 2010).

10.5.1 Délimitation des zones à risque

La délimitation des zones à risque est liée à la capacité hydrologique du bassin versant et à la capacité hydraulique à transporter le débit de crue, ainsi qu'à la distribution des enjeux dans le lit majeur. On distingue généralement plusieurs zones de crues selon les périodes de retour (Chachoua 2010).

10.4.2 Détermination des enjeux

Toutes les personnes ou les biens peuvent être classés comme des enjeux. Ils sont définis par leurs importances socioéconomiques. On cite les suivants :

- Habitation.
- Locaux à évacuation difficile (les hôpitaux, les garderies d'enfants, les écoles primaires, les foyers de personnes âgées ou de déficience intellectuelle).
- Locaux de stockage de matières toxiques.

Les mesures à entreprendre pour réduire la vulnérabilité sont de trois rangs :

a) Mesures à long terme : il faut établir des plans d'occupation de sol, des espaces à urbaniser en prenant en compte les zones à risque d'inondation.

b) Mesures à moyen terme : ce sont des mesures constructives qui consistent à délocaliser certaines instructions, modifier leurs usages ou les interdire carrément.

c) Mesures d'urgence : les mesures d'urgence sont à entreprendre dans le cas de dépassement des côtes d'alerte ou pré alerte, ils consistent à évacuer les localités en risque et préparer les plans de secours (Chachoua 2010).

Conclusion

La plus part des villes désertiques Algériennes sont situées sur les rives des oueds, Dans ce chapitre Nous essayons de donné une synthèse bibliographique sur le phénomène inondations et la genèse des crues dans la ville de Béchar et de connaître son historique.

Le développement de la formation des crues est très compliqué et en fonction des plusieurs factures, chaque facture est liée à autres inconnus morphologiquement et climatiquement qui formant un système interdépendant.

CHAPITRE II

METHODES ET MATERIELS

METHODES ET MATERIELS**1. Introduction**

Le présent chapitre est consacré pour une présentation de la méthodologie et la caractérisation générale de la zone d'étude et du bassin versant de l'Oued Béchar, on expose la situation géographique de la zone d'étude ; on donne aussi des informations simples sur le côté géologique et hydrogéologique afin de mettre en évidence la structure générale de Béchar.

La connaissance d'un bassin versant est fondamentale dans toute étude hydrologique et ou de risque naturel ou de vulnérabilité de la ressource en eau. Le bassin versant est le cadre général et l'unité fondamentale des études hydrologiques du système. On peut suivre, l'écoulement, de la qualité des eaux, quantifier la lame d'eau ; dont le but de proposer des mesures de prévention des risques d'inondation et l'élaboration des cartes de vulnérabilités.

2. Méthodologie

La méthodologie adoptée pour l'étude du risque liée à l'inondation d'une façon plus détaillé et précise peut être citée en suite, qui permet de représenter les éléments qui entrent à la conception et la description de la méthodologie d'étude du risque d'inondation à partir de l'acquisition des données nécessaires jusqu'à l'élaboration des cartes des risques, à travers ces derniers nous identifions les principaux axes:

- Hydrologique ;
- Hydraulique ;
- Occupation du sol ;
- Cartographie, intégrant la topographie.

Mais cette méthodologie n'intervient pas de manière strictement séquentielle puisqu'elle participe aussi bien à l'analyse de l'aléa que de la vulnérabilité.

Hydrologiquement les séries pluviométriques étant plus nombreuses et moins lacunaires, la modélisation de la relation pluie-débit est une des solutions pour pallier à ce manque de données. Les chroniques de débit du bassin versant de l'Oued Béchar est souvent lacunaires, discontinues, de courte durée, et donc difficilement exploitables pour une analyse hydrologique fiable. Nous avons procédé de simuler puis d'étendre, dans la mesure du possible, les séries hydrologiques en utilisant le modèle pluie-débit, au pas de temps annuel, GR1A. Dans un premier temps, après avoir les pluies de bassin selon les données météorologiques et le calcul de l'ETP moyenne selon la méthode de Turc comme des données d'entrée, nous avons effectué une analyse de sensibilité du modèle. Ceci a permis de choisir les meilleures combinaisons de données d'entrée en fonction du critère de Nash-Sutcliffe. Nous avons ensuite procédé au calage et à la validation croisée du

modèle avec les données d'entrée choisies afin de déterminer les jeux de paramètres du modèle qui traduisent le mieux la transformation de la pluie en débit. Une fois le jeu de paramètres choisi pour chaque bassin, nous avons appliqué cette version du modèle sur l'ensemble de la série pluviométrique disponible pour simuler les débits. Cette méthodologie a permis de compléter et d'étendre les séries de débits mensuels des bassins versants.

En suite, nous avons fait une étude statistique qui consiste à avoir les débits prévus correspondant aux à des différentes périodes de retour de 25 ans, 50 ans et 100 ans dans le chapitre III.

Les résultats de l'étude statistique ont été combinés avec la géométrie, la pente et la longueur d'onde de l'Oued Béchar devaient être utilisées comme données d'entrée du modèle hydraulique HEC-RAS afin d'avoir à la sortie les hauteurs d'eau.

Hydrauliquement et comme une nouvelle approche qui est caractérisé par ce travail, la création de la MNT a été fait en fonction d'un levé topographique réalisé manuellement de longueur de 17000 m et d'extension de 300 m non en fonction d'un fichier DEM afin d'assurer la précision et la qualité.

Il consiste à numériser manuellement la ligne centrale de l'Oued Bechar, au format shapefile, à l'aide des outils de préprocesseur de géométrie de HEC-GeoRAS et les images aériennes de fond et de l'MNT pour identifier l'emplacement de l'Oued Béchar, le reste des shapefiles requis par HEC-GeoRAS; berges de la rivière, les conduites d'écoulement et les coupes ont été créés également, bien que le seul importé dans le modèle HEC-RAS a été la ligne médiane de la rivière.

Ensuite, certaines sections ont été modifiées pour éviter le croisement avec les autres sections.

Puis nous avons couru le modèle et exporté à l'altitude de l'eau de surface calculée dans le SIG au format Xml et traité les résultats avec les outils de mappage HEC-GeoRAS, la première étape dans le processus de mappage du HEC-GeoRAS est de transformer les résultats de HEC-RAS dans le format SIG.

Ensuite, le polygone de délimitation a été déterminé, suivi par le calcul de la profondeur de l'eau et enfin la délimitation de l'étendue de l'inondation pour chaque élévation de surface de l'eau.

Les résultats de modélisation hydraulique (profondeur de l'eau pour chaque débit) à l'aide d'un outil de cartographie (ArcGis), sont présentés sous forme de cartes d'aléa.

Enfin, la simulation par HEC-RAS, permet d'obtenir dans le cas extrême pour les différentes périodes de retour 25 ans, 50 ans et 100 ans, la côte de l'eau en toute section, ainsi que les vitesses moyennes dans les sections de calcul, nous avons adopté la crue exceptionnelle comme référence pour les aménagements de cour d'eau et puis nous avons procédé une comparaison

dans la côte d'eau entre les sections de notre choix (profils) de l'Oued Béchar avant et après les aménagements, afin d'adopter l'aménagement adéquat, d'une manière qualitative et quantitative nous avons choisi la côte la plus basse.

3. Caractéristiques générales de la zone d'étude

3.1 Localisation et situation

3.1.1 Le cadre administratif de la wilaya de Béchar

La wilaya de Béchar est l'une des plus grandes wilayas du Sud (Figure II.1), elle s'étale sur une superficie approximative de 164.881 Km², soit 6,77% environ du territoire national, elle se situe dans le Sud-ouest du territoire national.

Elle est limitée :

- Au Nord et Nord-est par les Wilayas de Naâma et d'El Bayadh
- A l'Ouest par le royaume du Maroc
- A l'Est et Sud-est par la Wilaya d'Adrar
- Au Sud-ouest par la Wilaya de Tindouf.

La Wilaya de Béchar compte vingt et un (21) communes et douze (12) daïras, avec une population de 267.943 habitants.

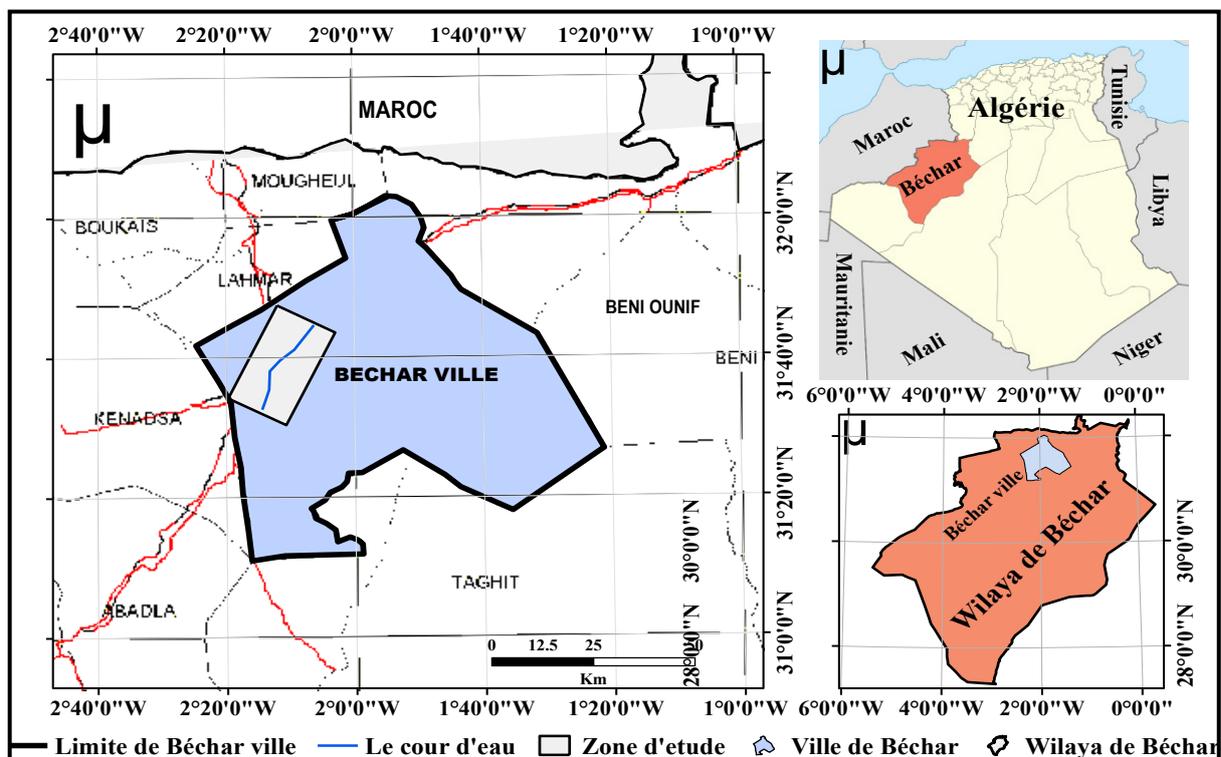


Figure II.1: Localisation de la wilaya de Béchar (Bekhira et al 2019b)

3.1.2 Le cadre administratif de la commune de Béchar

La commune de Béchar occupe la partie nord de la Wilaya, occupant une superficie de 5.050 Km², soit 3.129 % environ du territoire de la Wilaya.

Elle possède comme limites administratives, (Figure II.2):

- Au Nord-est et l'Est : la commune de Béni Ounif.
- Au Nord et Nord-Ouest : les communes de Moughel et de Lahmar.
- Au Sud : la commune de Taghit.
- A l'Ouest : la commune de Kenadsa.

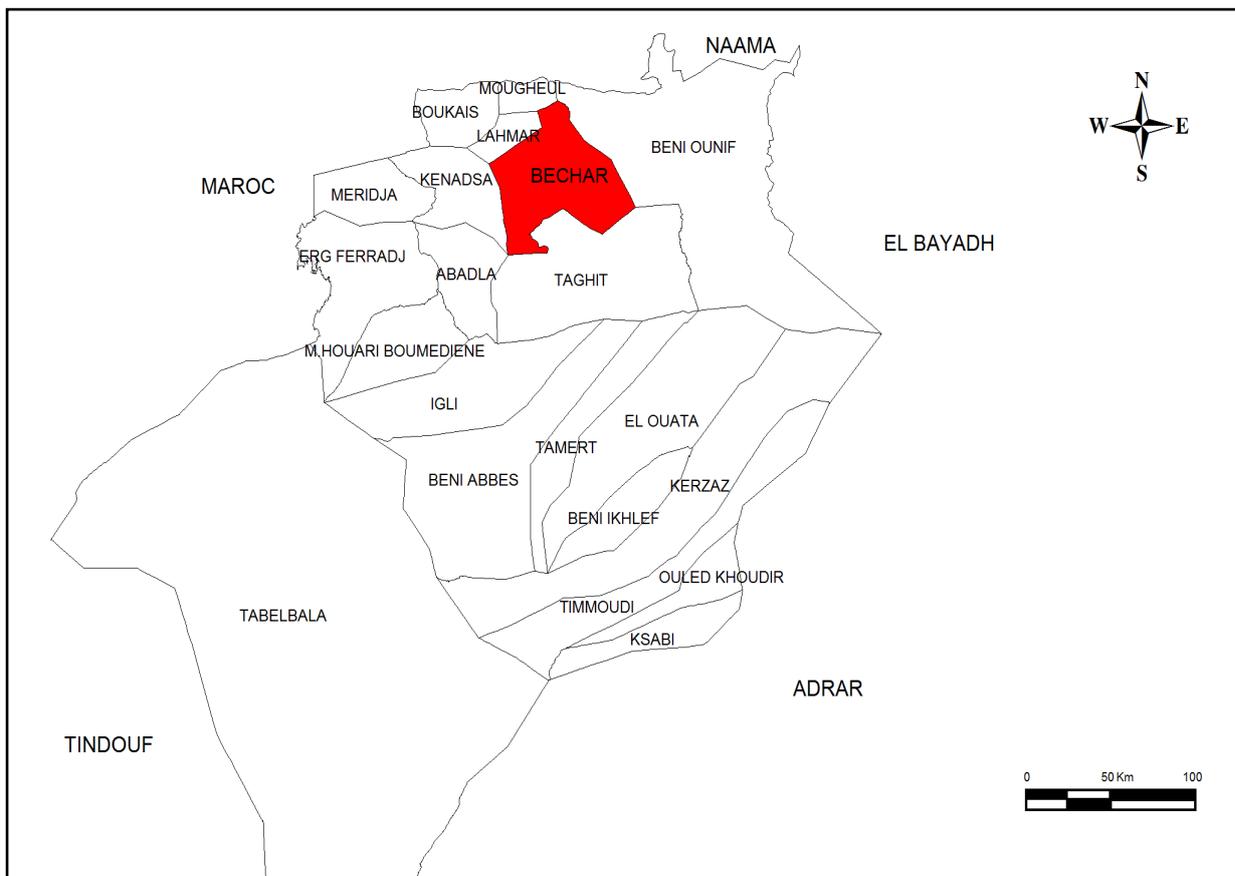


Figure II.2: Localisation de la région de Béchar

3.2 Situation démographique

3.2.1 Structure de la population

La wilaya de Béchar s'étend sur une superficie de l'ordre de 164 881 Km² pour une population totale de 279851 habitants (2009), soit une densité de 1,73 habitant par Km².

3.2.2 Evaluation de la population

La commune de Béchar présente presque 62% de la population totale de la wilaya. En 2007, elle compte environ 192909 habitants.

La population projetée est calculée à la base d'un taux d'accroissement annuel de 3,0%, elle

s'élèverait à 348415 habitants en 2027 (Figure II.3.a).

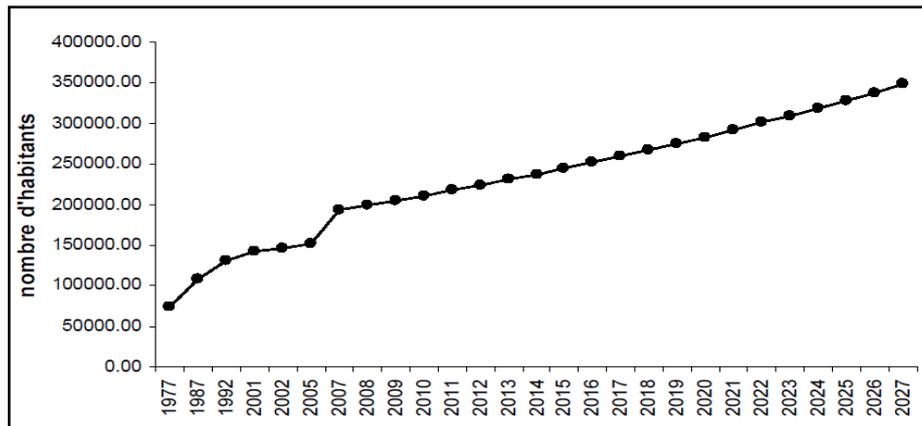


Figure II.3.a: Graphe de l'évolution de la population de la région de Béchar

3.2.3 La population résidente et sa répartition

Cette population est répartie sur plusieurs quartiers avec des proportions variables dans le temps et dans l'espace, liées au développement socioéconomique de la région, et l'extension par la construction de nouveaux pôles urbanisés vers le Sud (Zone Bleu...etc.) (Kabour 2011).

Toutefois, le centre région et le quartier de Debdaba demeurent encore peuplés (Figure II.3.b).

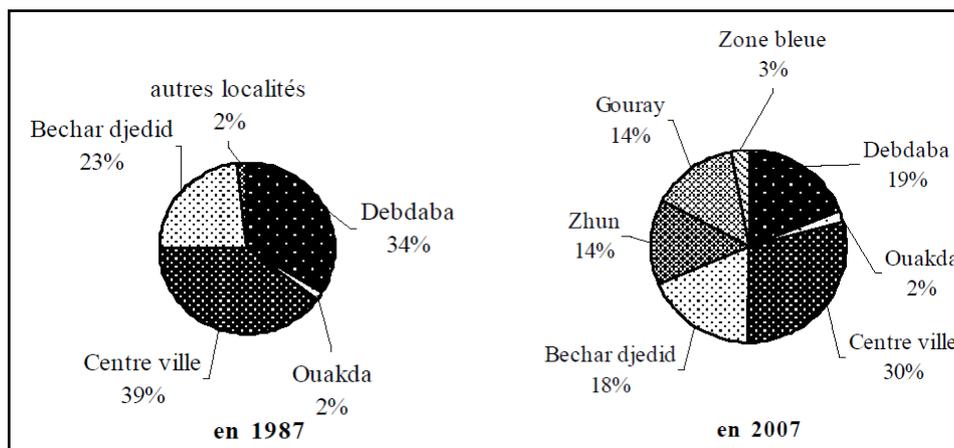


Figure II.3.b: Graphe de l'évolution de la population de la région de Béchar (Kabour 2011)

3.4. Contexte géologique

La région de Béchar se situe dans la partie Nord Ouest du Sahara algérienne, sa géologie est représentée par des terrains allant du Carbonifère au Quaternaire.

Le terrain est constitué de plusieurs ensembles de niveaux et de formations différentes.

- Djebel Grouz, Chebket Charef et Chebket Féndi, sont du Jurassique inférieur, moyen et continental.
- Djebel Antar, Djebel Béchar et Djebel Mezzarif constitués en grande partie du Viséen et dont les rebords et chicots sont constitués de Namurien et Westphalien.

- Reg et Hamada en contrebas des hauteurs, constitués dans leur majeure partie de Quaternaire récent et de dépôts de dunes reposant sur le Quaternaire.

- Vallée de la Zousfana constituée surtout d'alluvions.

C'est sur le Quaternaire récent et l'Albien continental que repose surtout l'agglomération de Béni-Ounif.

Le substratum de la ville de Béchar, représenté par des terrains d'âge Westphalien supérieur, est constitué essentiellement par des bancs de Grès plus au moins quartzeux, d'argiles et de schistes à couches charbonneuses (Figure II.4) (Menchikoff 1936; Pareyn 1961; Deleau 1952).

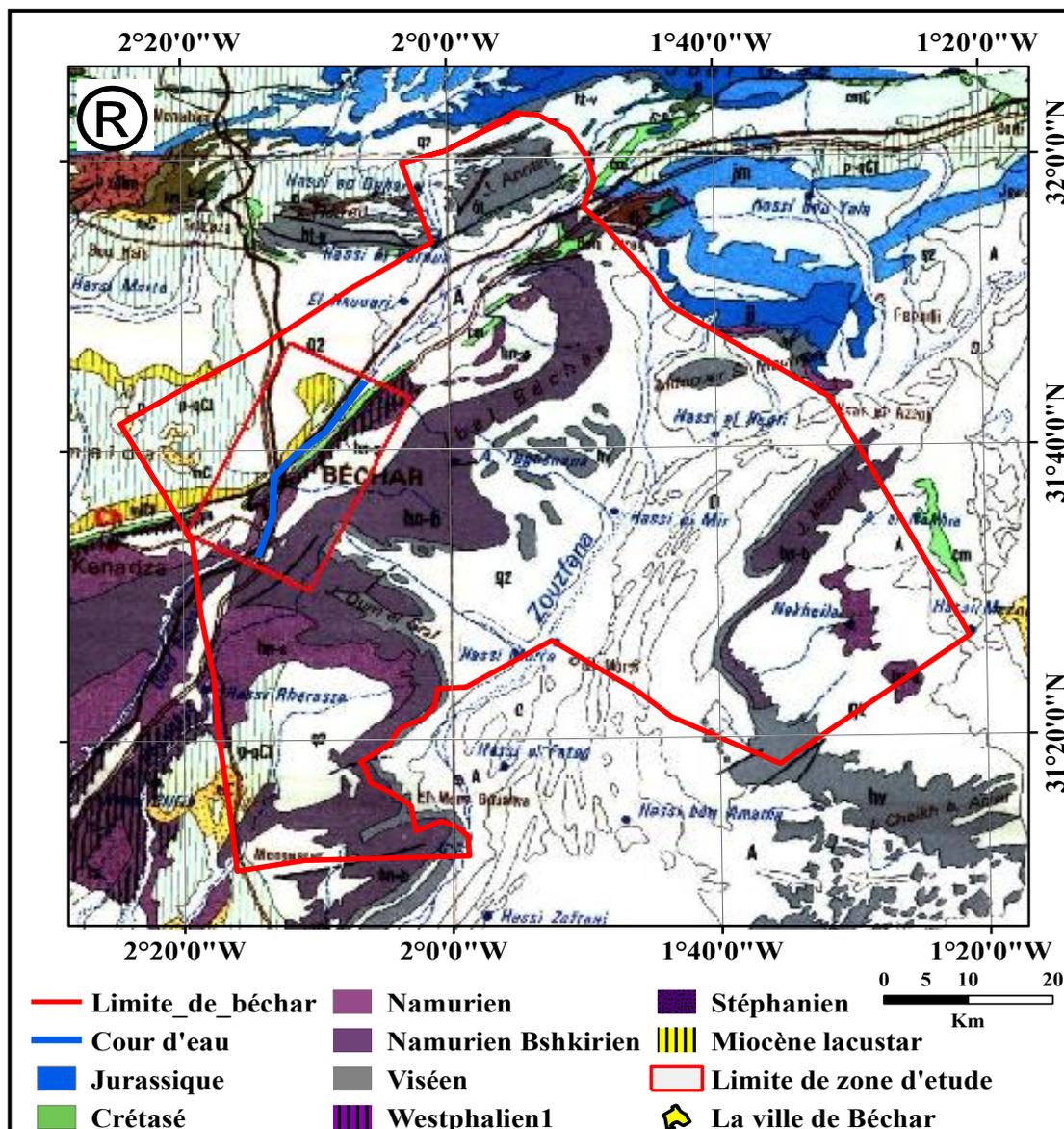


Figure II.4: La carte géologique de la ville de Béchar (Bekhira et al. 2019b)

3.5. Contexte morphologique

L'Atlas Saharien est constituée d'une chaîne montagneuse. Elles sont dénudées et parfois élevées en citant Djebel Antar (1953m), Djebel Grouz (1835m) et Djebel Béchar (1206 m), dont les caractéristiques sont fondamentalement semblables sur toute l'étendue du massif, du Maroc aux Aurès (Figure II.5) (Benaradj et al 2012).

Les éléments du relief sont représentés par un ensemble de formes structurales plissées plus ou moins parallèles entre elles.

Les altitudes supérieures à 2000 m à l'intérieur de la chaîne s'abaissent rapidement vers le Sud (Benaradj et al 2012).

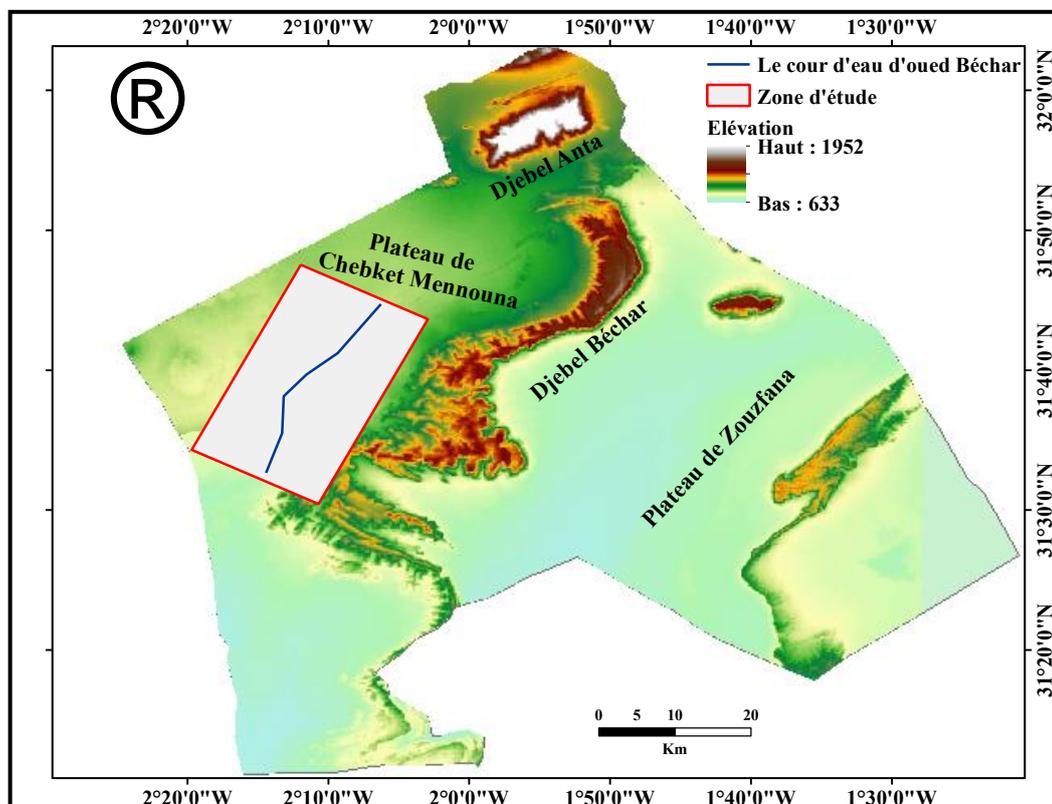


Figure II.5: La carte morphologique de la ville de Béchar (Bekhira et al 2019b)

3.6. Condition climatique et hydrologique

Le but d'étudier les aspects climatiques est de montrer l'impact du climat sur la région d'étude et de déterminer les différents facteurs climatiques qui ont relation avec le sujet de recherche (l'inondation).

C'est pour cela nous avons effectué une étude de climat particulière du bassin versant de l'Oued Béchar et plus spécialement aux précipitations, qui sont de loin les plus importantes agissant directement sur les inondations.

Les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle très important dans le comportement

hydrologique des cours d'eau, telle que les précipitations, surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel.

4. Définition du bassin versant

Le bassin-versant, c'est l'ensemble du territoire qui recueille l'eau pour la concentrer dans une rivière et ses affluents. Un bassin-versant a des limites; ce sont des frontières naturelles qu'on appelle « lignes de partage des eaux ».

Elles suivent la crête des collines (Figure II.6).

Les précipitations qui tombent sur un versant de la colline se concentrent dans les ruisseaux pour finalement rejoindre la rivière.

Celles qui tombent sur l'autre versant vont alimenter une rivière voisine, un bassin-versant voisin. Ces précipitations peuvent aussi s'infiltrer dans la roche et former des réservoirs ou nappes souterraines.

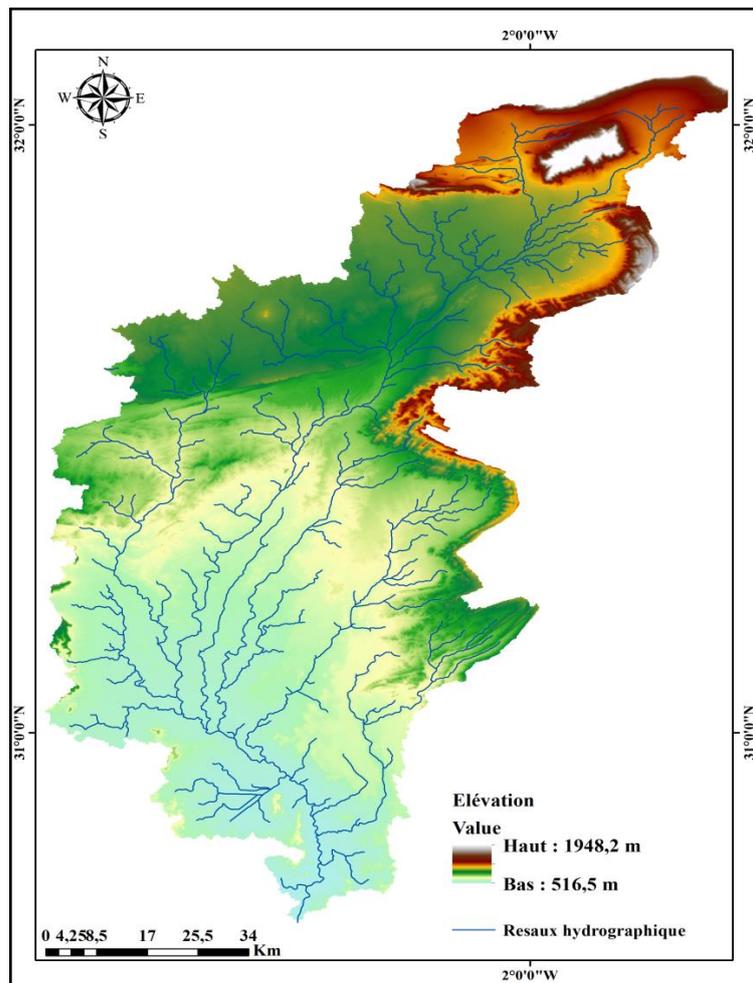


Figure II.6: Le bassin versant de l'Oued Béchar (Bekhira et al 2019b)

5. Situation géographique de bassin versant de l'Oued Béchar

L'Oued Béchar a de longueur 215km draine un vaste bassin de 6570 km² environ, il est situé au pied du versant Sud de l'Atlas Saharien, limité au Nord par la chaîne montagneuse Djebel Grouz, au Sud Ouest par les montagnes d'Ougarta, et Sud Est par le grand Erg occidental, à l'Ouest par la Hamada de Guir et à l'Est par la Hamada de Oued Namous.

Il prend sa naissance du Djebel Grouz, à une altitude de 1590m il parcourt du Nord-Est au Sud-Ouest des centaines de kilomètres.

L'Oued Béchar est un affluent du Guir (Figure II.7).

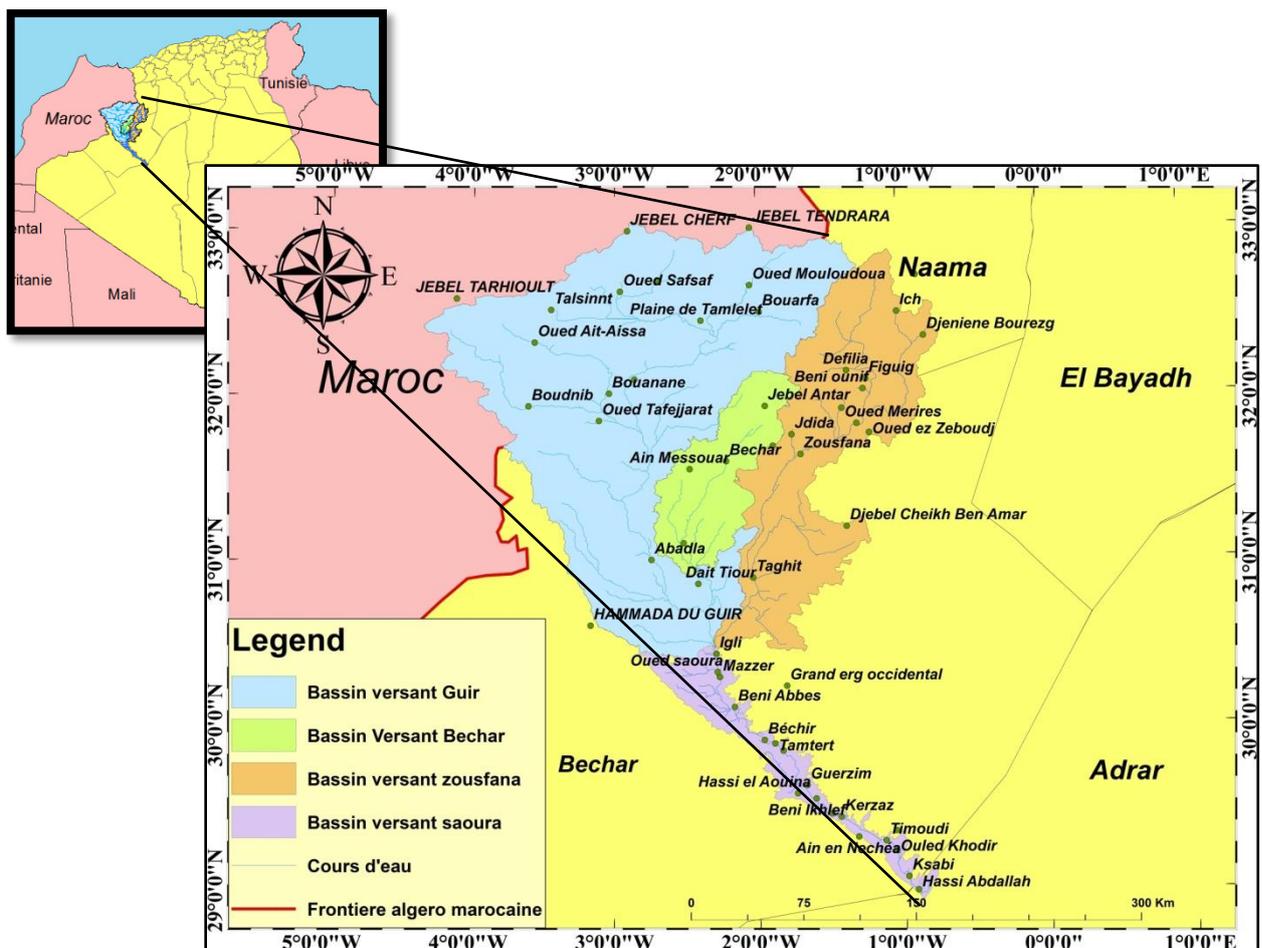


Figure II.7: La situation géographique de bassin versant de l'Oued Béchar

6. Géomorphologie

L'Atlas Saharien constitue une chaîne montagneuse dont les caractéristiques sont fondamentalement semblables sur toute l'étendue du massif, du Maroc aux Aurès. Les éléments du relief sont représentés par un ensemble de formes structurales plissées plus au moins parallèles entre elles.

Les altitudes supérieures à 2000 m à l'intérieur de la chaîne s'abaissent rapidement vers le Sud.

Elles ne sont que de 1000 m à Béni-Ounif dans la zone de piedmont, et de 300 m à Béni-Abbès, soit une pente de 3 %.

Au Nord du Sahara Occidental un ensemble de terrains horizontaux forment de vastes plateaux tabulaires ce sont les hamadas, dont l'épaisseur qui atteint 100 m au Nord, décroît ensuite au fur et à mesure qu'on s'éloigne des chaînes atlasiques.

7. Impact de la géologie sur l'hydrologie

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels.

En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale faible aura en général une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles (Houbib 2013).

Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et qui ne résiste pas à l'érosion, comme des marnes et des argiles, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration.

Les sous bassins sont formés essentiellement par des formations perméables à semi perméables qui occupent la presque totalité de la superficie du bassin, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface (Houbib 2013).

Toutefois, l'abondance relative de formations calcaires, représentées par la Hamada de Guir et de la haute Saoura dans les bassins de Guir et Saoura permet sans doute de différencier le comportement hydrologique de ces bassins à celui du Zousfana dont plus de la moitié de la superficie est occupée par des alluvions.

L'Oued Guir peut aussi avoir des comportements différents qui seraient dûs à l'abondance relative des marnes et argiles qui occupent 30% de la surface du bassin.

Les marnes et argiles étant plus facilement favorisées par l'érosion et transportables en suspension (Yousfi1992).

8. Le Couvert Végétal

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. Donc, la présence de végétation va jouer le rôle de « Régulateur » dans le régime d'écoulement.

L'occupation végétale a une influence directe sur l'écoulement fluvial aussi bien que des facteurs orographiques et climatiques (Radia 2012).

La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense.

Le paysage végétal du bassin de la Saoura est largement faible (Radia 2012).

En dehors de quelques vestiges témoins d'une forêt relique de thuya difficilement conservés sur les plus hauts sommets, la végétation naturelle est composée d'une steppe aride à éléments xérophiiles et dégradés.

Cependant, ce paysage de climat habituellement sec (45 mm de précipitations moyennes annuelles) peut être trompeur par la forte irrégularité: il peut varier vers une verdure saisonnière exceptionnelle éclipsant la tendance générale vers une désertification accentuée.

9. Morphométrie

Nous, nous intéresserons dans cette partie particulièrement aux unités hydrologiques contrôlées par des stations de jaugeage.

Les formes des bassins correspondants étant donc plus au moins semblables.

9.1 Superficie du bassin versant

Sur une carte à l'échelle topographique (1/500.000) et par planimétrage, on détermine la superficie du bassin de l'Oued Béchar qui est de l'ordre de $S=6570 \text{ km}^2$.

9.2 Périmètre du bassin versant

Le curvimétrage du bassin de l'Oued Béchar donne un périmètre normal P (Tableau II.1), l'intérêt essentiel du périmètre est de pouvoir déterminer l'indice de gravéllius (K_c) et le rectangle équivalent.

Tableau II.1: Caractéristiques de forme des unités hydrologiques du bassin versant de l'Oued Béchar (Boulnouar 2007)

Bassin Versant	Superficie (km^2)	Périmètre (Km)	K_c	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
Oued Béchar	6570	590	2.03	269	24

9.3 Indice de compacité de Gravéllius

On l'appelle aussi indice de forme du bassin.

La forme d'un bassin versant influence fortement sur l'écoulement global, ainsi un bassin très allongé ne réagira pas de la même façon qu'un bassin de forme ramassée, si les autres conditions ne sont pas ailleurs égales (Houbib 2013).

Cet indice est défini comme le rapport entre le périmètre stylisé du bassin versant au périmètre d'un cercle ayant la même surface. Plus cet indice se rapproche de l'unité plus le bassin aura une forme ramassée et plus le temps de concentration des eaux sera court (Houbib 2013).

Nous avons :

$$K_c = \frac{P}{E} \quad (\text{II.1})$$

Avec

P: périmètre du bassin versant.

E: périmètre du cercle.

$$E = \pi \times D \text{ Où } D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \tag{II.2}$$

$$E = \pi \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = 2\sqrt{S\pi} \tag{II.3}$$

$$E = P / \sqrt{S\pi} = 0.28P / \sqrt{S} \tag{II.4}$$

Les résultats du calcul de K_c sont reportés sur le Tableau II.1.

9.4 Rectangle équivalent

On assimile le bassin rectangulaire qui lui est équivalent pour pouvoir le comparer par rapport à d'autres bassins du point de vue influence de la forme sur l'écoulement (Figure II.8).

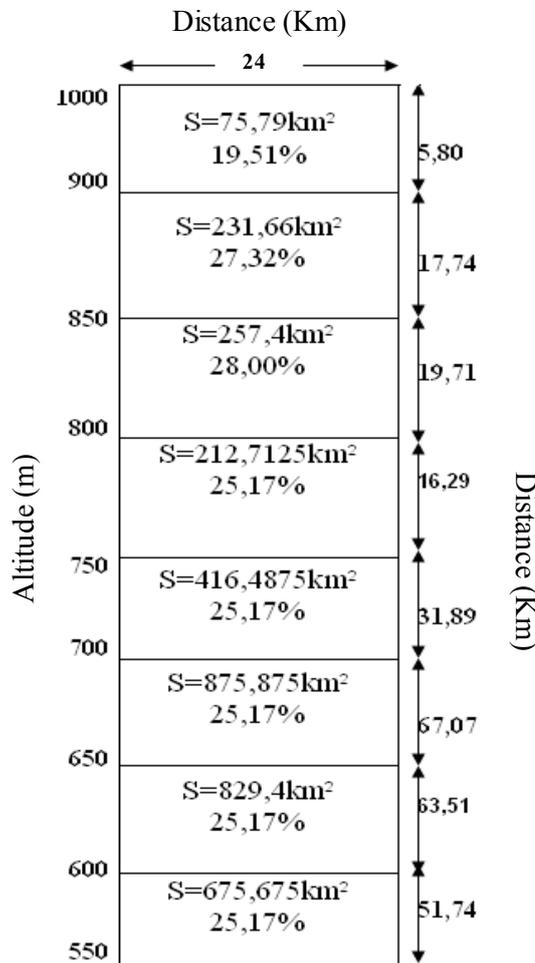


Figure II.8: Les rectangles équivalents du bassin versant de l'Oued Béchar (Boulouar 2007)

10. Etude de relief

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation, C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin (Houbib 2013).

10.1 Courbe hypsométrique

Le relief est caractérisé par sa courbe hypsométrique (Figure II.9), celle-ci nous renseigne sur la répartition de la surface en fonction de tranche d'altitude en portant en ordonnée les tranches données et en abscisse la surface de bassin pour laquelle chaque point est une côte au moins égale à cette altitude, les surfaces en abscisses sont exprimées en pourcentage de la surface totale du bassin la répartition altimétrique du bassin versant d'Oued Saoura est représentée sur le tableau II.2 et par la figure II.9.

Tableau II.2: Répartition hypsométrique du bassin versant de l'Oued Béchar (Boulouar 2007)

l'altitude	la surface	surface en %	Surface cumulée en %
1950	0	0	0
1900	0,55726688	0,008485544	0,008485544
1800	14,6402244	0,222927776	0,23141332
1700	32,0763583	0,488429073	0,719842393
1600	56,5309908	0,860801565	1,580643959
1500	73,153247	1,113909886	2,694553845
1400	70,8456642	1,078772153	3,773325998
1300	106,340309	1,619251726	5,392577724
1200	147,005471	2,238463147	7,631040871
1100	206,820698	3,149274019	10,78031489
1000	369,308997	5,623495329	16,40381022
900	504,125452	7,67635543	24,08016565
800	1319,1522	20,08682782	44,16699347
700	1007,815594	15,34608236	59,51307583
600	1423,795633	21,68024109	81,19331692
520	1024,831887	15,60519071	96,79850763

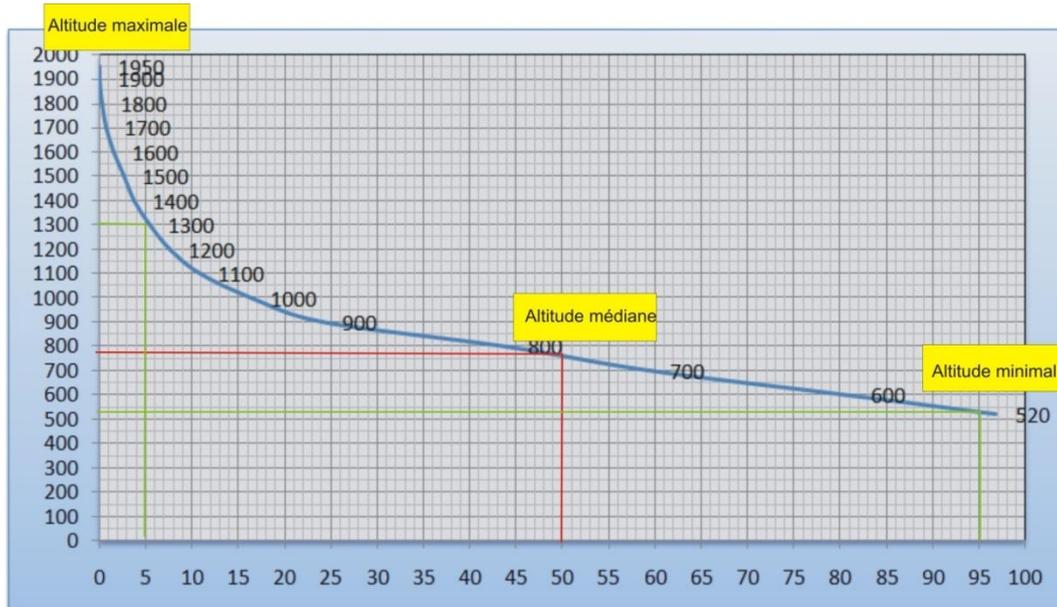


Figure II.9: Schéma explicatif de la Courbe hypsométrique

La méthode permet d'obtenir cette courbe.

On planimètre entre les courbes de niveau.

A partir de cette courbe il est possible de définir la dénivelée D par:

$$D = h_{5\%} - h_{95\%} \quad (\text{II.5})$$

10.2 Les altitudes caractéristiques

Les altitudes caractéristiques nécessaires pour les calculs hydrologiques sont:

10.2.1 Les altitudes maximales et minimales

Elles sont obtenues directement à partir des cartes topographiques.

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire.

Ces deux données deviennent importantes surtout lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux.

Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente (Boulhouar 2007).

10.2.2 L'altitude moyenne

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique (Boulhouar 2007).

On peut la définir comme suit :

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A} \quad (\text{II.6})$$

Avec:

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

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du bassin versant [km²].

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité.

Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques (Boulhouar 2007).

10.2.3 L'altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière (Boulhouar 2007).

Ces altitudes caractéristiques sont regroupées dans le tableau II.3:

Tableau II.3: Altitude caractéristique de bassin de l'Oued Béchar

Bassin	Altitudes caractéristiques en (m)						
	Hmax	Hmin	D=H5%-H95%	Hmoy	H5%	H75%	H95%
Oued Béchar	1950	520	775	745.28	1300	625	525

10.3 Les indices de pentes

10.3.1 Indice de pente de Roche

M. Roche a proposé un indice de pente qui rend bien compte de l'influence du facteur pente sur le régime hydrologique (Figure II.10), cet indice est déterminé à partir de l'expression suivante:

$$I_p = \frac{\sqrt{D}}{L} \cdot \sum \sqrt{B_j} \tag{II.7}$$

En posant B_j le pourcentage de la surface totale se trouve entre h_{j+1} et h_j:

$$B_j = \frac{X_{j+1} - X_j}{L} = \frac{X_j}{L} \tag{II.8}$$

L'estimation de I_p est plus simple que celle de la pente I puisque on travaille sur le rectangle équivalent.

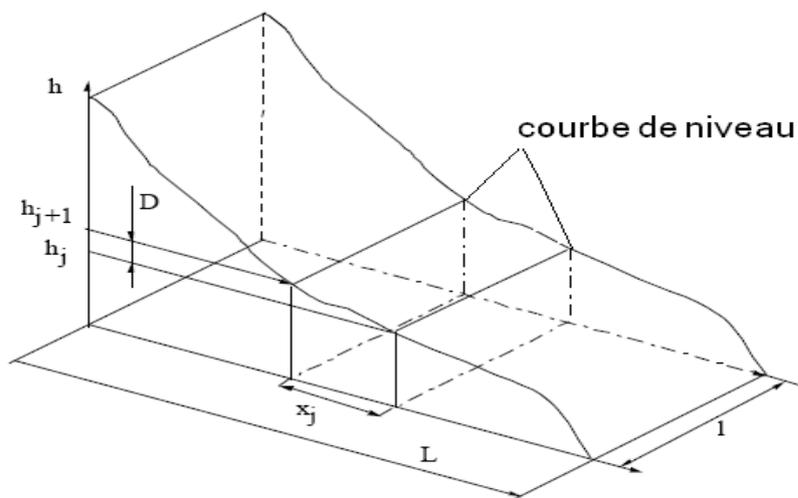


Figure II.10: Indice de pente de Roche

10.3.2 Indice de pente globale (I_g)

L'indice de Roche étant trop long à évaluer pour des études rapides, nous avons proposé un indice encore plus simple: la pente globale (Tableau II.4):

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (\text{m/km}) \quad (\text{II.9})$$

D étant la dénivelée :

$D=h_{5\%}-h_{95\%}$ définie sur la courbe hypsométrique ou même directement à l'œil sur la carte topographique.

L: étant la longueur du rectangle équivalent (km) (Boulouar 2007).

Tableau II.4: Classification du relief selon I_g (O.R.S.T.O.M) (Boulouar 2007)

Classe	Type de relief	I_g
R1	Relief très faible	$I_g < 0.002 \text{m/km}$
R2	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
R3	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
R4	Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
R5	Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
R6	Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
R7	Relief très fort	$I_g > 0.5 \text{m/km}$

10.3.3 Dénivelée spécifique (D_s)

La valeur de I_g diminue quant à L augmente, donc en général quand la surface du bassin versant augmente il sera donc difficile à de comparer deux bassins versants de taille différente, on définit donc une grandeur qui ne présente pas cet inconvénient (Radia 2012):

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

D_s est proportionnelle à la longueur

$$D_s = \frac{D}{L} \sqrt{L.1} = D \cdot \sqrt{\frac{1}{L}} \quad (\text{II.11})$$

D_s dépend de l'hypsométrie D et de la forme du bassin d'après la classification de l'O.R.S.T.O.M, ci-dessous appliquée à tout bassin quelle que soit sa superficie (Tableau II.5).

Tableau II.5: Classement O.R.S.T.O.M du relief à partir de la dénivelée spécifique (Boulanouar 2007)

Classe	Type de relief	D _s
R1	Relief très faible	D _s <10m
R2	Relief faible	10m<D _s <25m
R3	Relief assez faible	25m< D _s <50m
R4	Relief modéré	50m< D _s <100m
R5	Relief assez fort	100m< D _s <250m
R6	Relief fort	250m< D _s <500m
R7	Relief très fort	D _s >500m

Généralement, on utilise la classification de ORSTOM selon l'indice de pente globale I_g pour les bassins versants de S <25km² (Tableau II.6).

Tableau II.6: Indices des pentes pour le bassin de l'Oued Béchar

Bassin	Superficie (km ²)	I _p	I _g (m/km)	D _s (m)	Classe de relief selon I _g	Classe de relief Selon D _s
B.V. Oued Béchar	6570	3.60	2.87	47.25	Relief très fort	Relief modéré

10.3.4 Profil en long

Nous avons l'habitude de représenter graphiquement (Figure II.11) la variation altimétrique du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'émissaire (Tableau II.7).

Tableau II.7: Les paramètres du profil en long de bassin versant de l'Oued Béchar

Altitudes (m)	Pentes (m/km)	Distance partielle (km)	Distance cumulée (km)
1000	0,00	0,00	0
900	12,99	7,70	7,7
850	3,90	12,83	20,53
800	4,87	10,26	30,79
750	5,85	8,55	39,34
700	3,65	13,68	53,02
650	2,09	23,95	76,7
600	1,95	25,66	102,36
550	1,62	30,79	140

Cette représentation devient intéressante lorsqu'on reporte les cours d'eau secondaires d'un bassin versant, car il est facile de comparer entre les cours d'eaux secondaires et le cour d'eau principale (Boulnouar 2007).

Notons qu'il est d'usage d'utiliser un graphisme différent lorsque les affluents sont en rive gauche ou à droite de la rivière dont ils sont tributaires.

Le profil en long des cours d'eau permet de définir sa pente moyenne (Boulnouar 2007).

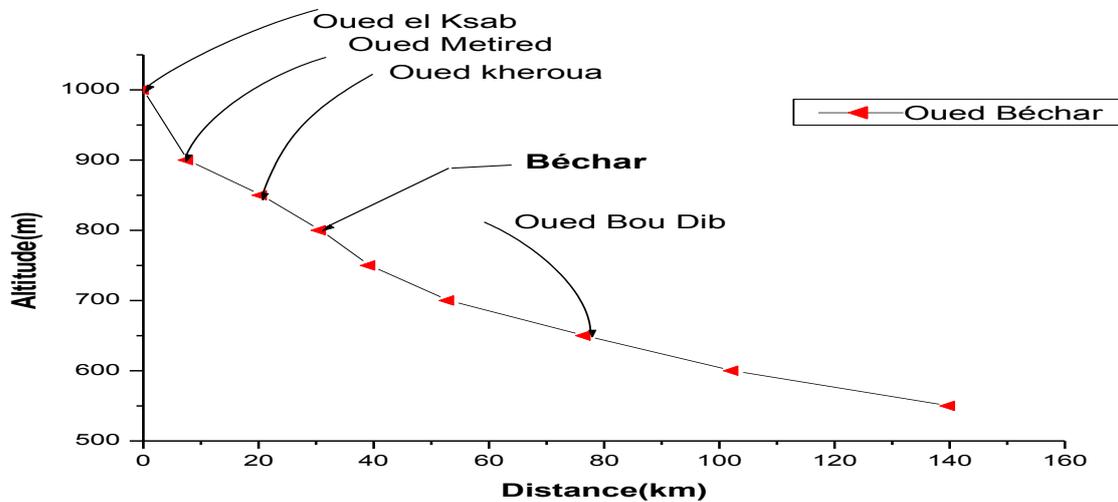


Figure II.11: Profil en long de bassin versant de l'Oued Béchar

10.3.5 La pente moyenne d'un cours d'eau

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin c'est le temps de concentration, cette variable influence donc sur le débit maximal observé. Une pente abrupte, favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol (Boulnouar 2007).

Le calcul des pentes moyennes et partielles de cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents (Boulnouar 2007).

La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L} \quad (II.12)$$

Où :

P_{moy} : pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;

ΔH_{max} : Dénivellation maximale de la rivière [m] (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire) ;

L : longueur du cours d'eau principal [km]. Dans le cas étudié les valeurs des pentes moyennes sont I=4 pour mille (Boulnouar 2007).

11. Etude de réseau hydrographique

Les réseaux hydrographiques du bassin versant de l'Oued Béchar ont été réalisés à la base des cartes au 1/250000 (Figure II.12) (Houbib 2013).

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage (D_d), le rapport de confluence (R_c) et le rapport des longueurs (R_L).

11.1 La topologie : structure du réseau et ordre des cours d'eau

La topologie s'avère utile dans la description du réseau hydrographique notamment en proposant une classification qui permet de décrire sans ambiguïté le développement du réseau de drainage d'un bassin de l'amont vers l'aval. Elle se base sur les règles suivantes:

(Figure II.12 et Tableau II.8) (Boulhouar 2007).

- Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté de un.

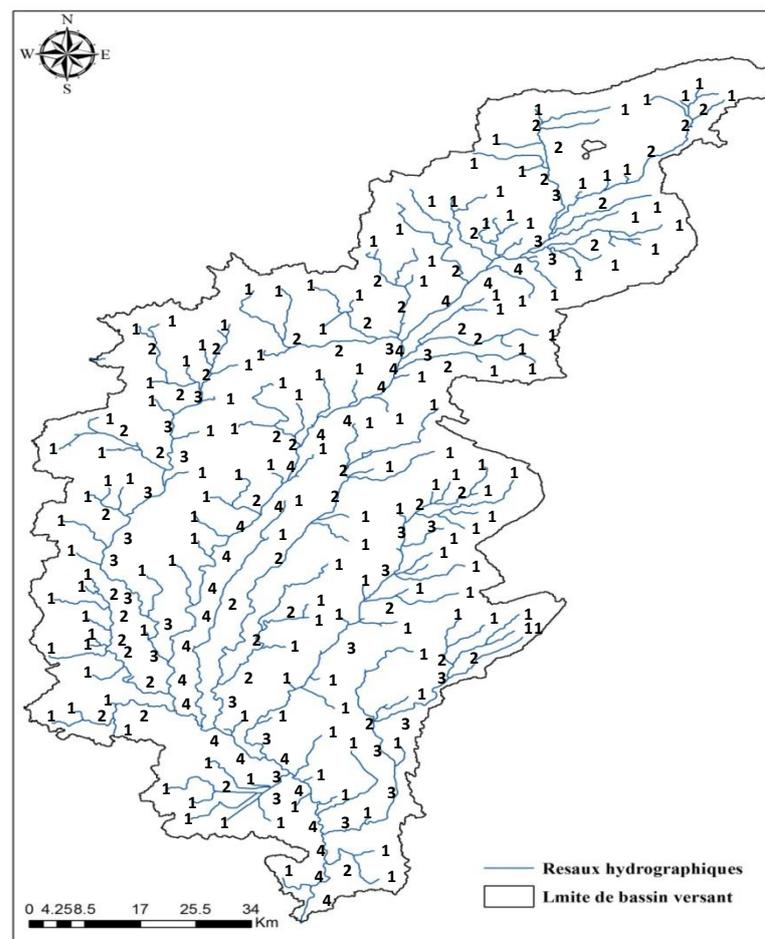


Figure II.12: Répartition du réseau hydrographique de l'Oued Béchar et ordre des cours d'eaux

Tableau II.8: Classification, longueur, et nombre des cours d'eau du bassin versant de l'Oued Béchar (Boulouar 2007)

Bassin versant d l'Oued Béchar		
x	L _x (km)	N _x
1	692	116
2	300	50
3	143	26
4	60	08
	1195	200

11.2 Densité de drainage (D_d)

La densité de drainage est étroitement dépendante de deux facteurs principaux:

La lithologie et l'abondance des précipitations, elle nous permet d'apprécier le réseau hydrographique dans le bassin versant (Boulouar 2007).

Les morphologies s'appellent densité de thalweg, (Tableau II.9).

La densité de drainage est définie par :

$$D_d = \sum \frac{L_i}{S} \quad (\text{II.13})$$

Où :

D_d : densité de drainage en km/km² ;

L_i : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km ;

S : Superficie du bassin en km² (Houbib 2013).

Les valeurs de la densité de drainage (Tableau II.9) sont faibles dans les sous bassin étudié : en raison d'une part à des pentes faibles auxquelles s'ajoute la faible abondance des précipitations, une évapotranspiration élevée et d'autre part, de la perméabilité non négligeable des formations lithologiques.

11.3 Coefficient de torrentialité (C_t)

Qui tient compte à la fois de la densité des talwegs élémentaire (ordre1) par la densité de drainage, met en évidence le caractère torrentiel d'un chevelu hydrographique (Boulouar 2007).

$$C_t = f_1 \cdot D_d \quad (\text{II.14})$$

Où:

D_d : densité de drainage ;

f₁: fréquence de chevelu hydrographique d'ordre1 dans le bassin versant avec:

$$f_1 = \frac{N_1}{S} \quad (\text{II.15})$$

N_1 : nombre de talweg d'ordre 1 ;

S : superficie du bassin versant (km^2).

Les basses valeurs du coefficient de torrentialité des bassins ne dépassent pas 0.016 (Tableau II.9), elles sont liées soit à la faiblesse des précipitations, ou encore à la forte perméabilité des formations lithologiques.

11.4 Rapport de confluence (R_c)

C'est le quotient du nombre de talwegs d'ordre n par celui de thalweg d'ordre immédiatement supérieur $n+1$.

Il est défini par :

$$R_c = \frac{N_n}{N(N+1)} \quad (\text{II.16})$$

Où :

R_c : rapport de confluence ;

N_n : nombre de cours d'eau d'ordre n .

Si l'on admet que, pour un bassin parfaitement organisé $R_c = 2$; les sous bassins de la Saoura sont bien hiérarchisés (Tableau II.9) (Boulhouar 2007).

11.5 Rapport des longueurs (R_L)

C'est le quotient de longueur des cours d'eau d'ordre $(n+1)$ par celle des cours d'eau d'ordre (n) .

Il est défini par :

$$R_L = \frac{L_{(n+1)}}{L_n} \quad (\text{II.17})$$

Où :

L_n : longueur de cours d'eau d'ordre n ;

$L_{(n+1)}$: longueur de cours d'eau d'ordre $(n+1)$;

R_L : Rapport de longueur (Boulhouar 2007). .

11.6 Temps de concentration (T_c)

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire. Bien que ce paramètre intervienne pour l'étude des crues. Pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Giandotti:

$$T_c = \frac{4\sqrt{S+1.5L}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (\text{II.18})$$

Où:

T_c : temps de concentration (heures)

S : superficie du bassin (km²)

L : longueur du thalweg principal (km)

H_{moy} : altitude moyenne (m)

H_{min} : altitude minimale (m) (Boulnoar 2007).

Le tableau II.9 montre que le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la surface mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief.

Tableau II.9: Paramètres morphométriques des principales unités hydrologiques du bassin versant de l'Oued Béchar

Bassin versant	D_d	R_c	C_t	T_c
Oued Béchar	0.33	2.50	0.011	26.5

Conclusion

Le bassin versant de l'Oued Béchar trouve sa position au centre du bassin versant de la Saoura. L'étude morphométrique nous a permis de déterminer les modalités d'écoulements superficiels ainsi que le régime hydrologique. La pente est assez forte due à la différence d'altitude entre l'amont et l'aval du bassin versant (450 m).

L'étude hydrologique a montré que le régime hydrologique des crues est torrentiel en période pluviale.

Une dissymétrie existe dans la répartition altimétrique et hydrographique, ce qui entraîne des conséquences sur la stabilité du régime d'écoulement.

On distingue :

Les secteurs montagneux (Béchar) qui présentent des caractéristiques morphométriques favorables à la genèse et à la propagation des crues ; Les secteurs de piémonts ont un degré moindre; alors que les secteurs de plaines sont le siège d'une accumulation des dépôts détritiques où les conditions d'écoulement sont défavorables au stockage des eaux et de ruissellement.

CHAPITRE III

ANALYSE DES PARAMETRES

HYDROCLIMATOLOGIQUES

ANALYSE DES PARAMETRES HYDROCLIMATOLOGIQUES

1. Introduction

L'étude hydro-climatologique a pour but de trouver la relation et l'impact des éléments du climat sur le régime d'écoulement superficiel. Le présent chapitre va traiter les différents paramètres hydrologiques du bassin versant de l'Oued Béchar. Les paramètres climatiques étudiés sont les données mensuelles et annuelles de la station météorologique de Béchar (précipitations, températures, évaporations, évaporation potentielles etc.) et la station hydrométrique du bassin versant de l'Oued Béchar (lame d'eau, hauteurs et débits).

2. Climatologie

2.1 Les paramètres physiques

L'évaluation du paramètre physique, nous permet de connaître le bassin versant, et de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans les processus de l'écoulement superficiel; facteurs orographiques, morphologiques, lithologiques, climatiques et biogéographiques (Benzater 2020, Elouissi 2016, Houbib 2013).

Leur interaction est déterminante dans le comportement hydrologique des bassins.

2.2 Etude des précipitations

Les données disponibles pour l'étude de précipitation sont entre (1985/1986–2017/2018), on utilise les valeurs annuelles et mensuelles (Figure III.1, Figure III.2).

La moyenne interannuelle des précipitations calculée est de 109,02 mm.

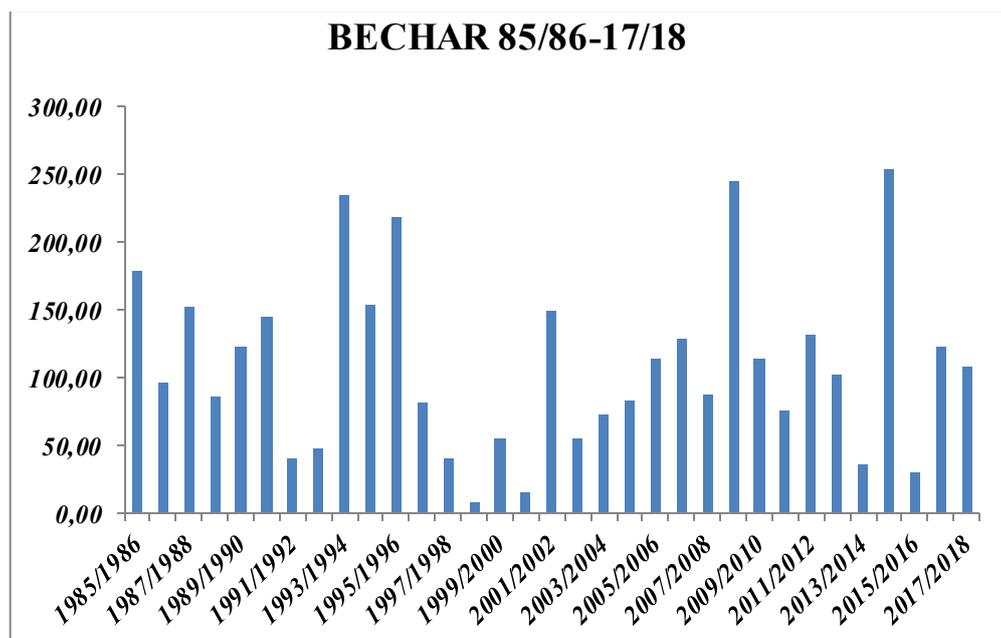


Figure III.1: Précipitations annuelles

D'après l'histogramme, le régime de précipitation est très irrégulier (Figure III.1), telle que dans les années (98-99-00-01) la précipitation est très faible ce qui implique que l'Oued Béchar est à l'état sec, par contre dans les années (86-93-94-95-96-02-08 à 2018) la précipitation est grande, le débit de l'Oued Béchar pendant ces années est très important car on note que l'année 2008 a enregistré un taux de précipitation important, et dans le reste des années la précipitation est parfaitement moyenne.

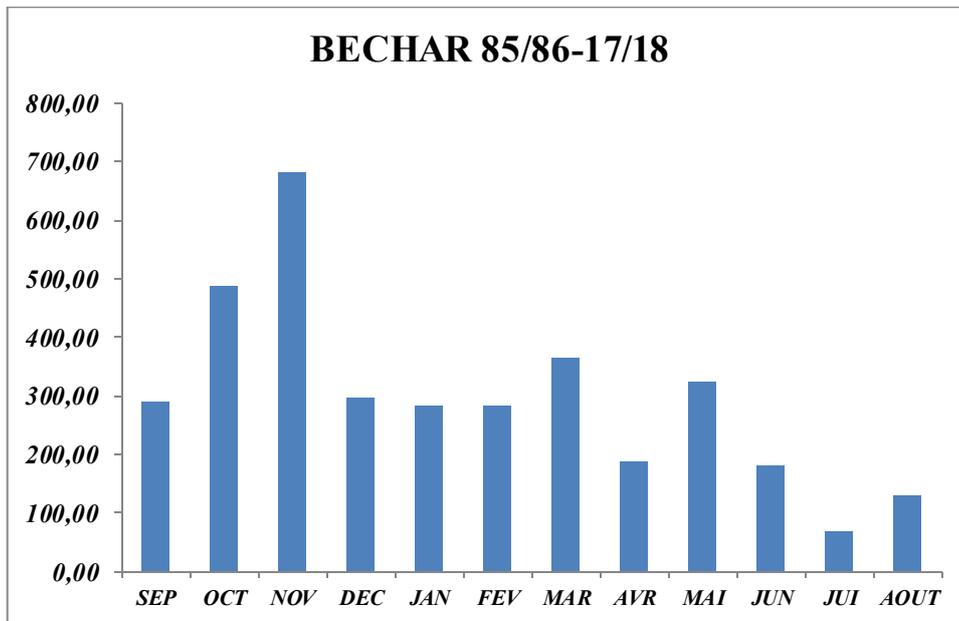


Figure III.2: Précipitations mensuelles

Les variations des précipitations mensuelles des différentes périodes pour le bassin montrent que les mois les plus pluvieux sont octobre, mars et mai, le mois d'octobre 2008 enregistre un taux de précipitation exceptionnelle. Les mois de juin, juillet et août sont pratiquement secs (Figure III.2)

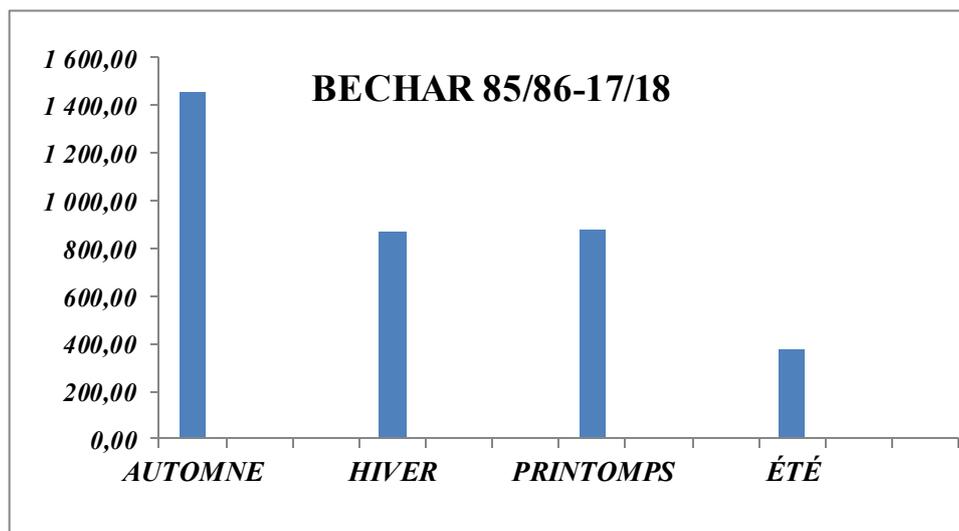


Figure III.3: Précipitations saisonnières

Les variations de précipitations saisonnières des différentes périodes pour le bassin montrent que les saisons les plus pluvieuses sont l'automne, l'hiver et le printemps.

L'été est pratiquement sec (Figure III.3)

2.3 Etude de l'évapotranspiration potentielle

2.3.1 Etude des températures

La température de l'air est un paramètre important qui régit les déperditions d'eau qui s'opèrent par le phénomène de l'évapotranspiration.

L'étude des températures moyennes mensuelles et annuelles est indispensable, c'est elles qui nous permettent d'évaluer le déficit d'écoulement des bassins versants.

La température constitue un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. La connaissance de leur variation est importante, nous avons utilisés les températures annuelles et mensuelles de la station de Béchar.

2.3.2 Températures annuelles

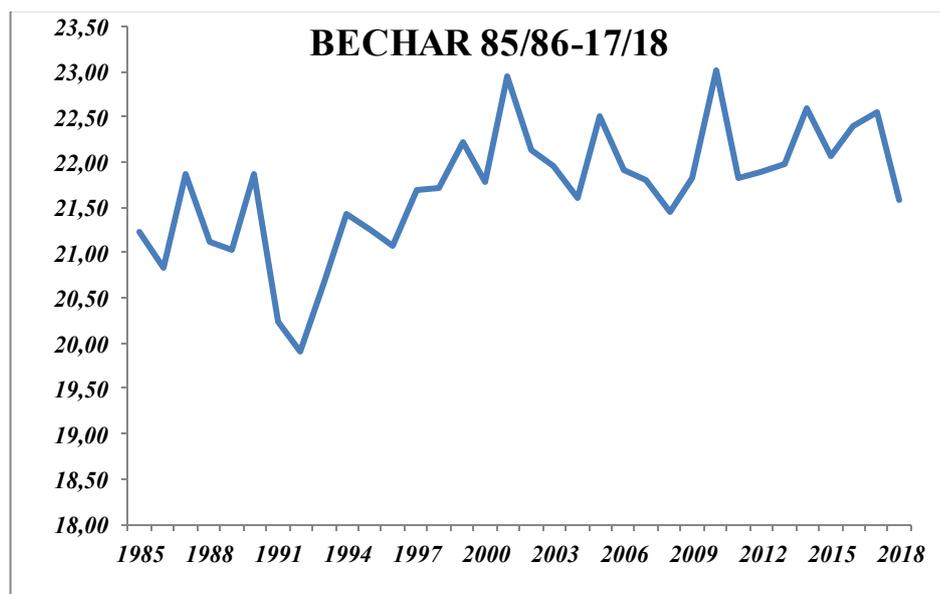


Figure III.4: Températures moyennes annuelles

Dans la courbe (Figure III.4) nous avons constaté que la température moyenne annuelle augmente à partir de l'année 2000 en raison du réchauffement climatique.

Les valeurs moyennes interannuelles de températures sont de l'ordre de 20,64 C°.

2.3.3 Températures mensuelles

La température la plus basse est enregistrée au mois de janvier, décembre et la plus élevée aux mois de Juillet et août (Figure III.5)

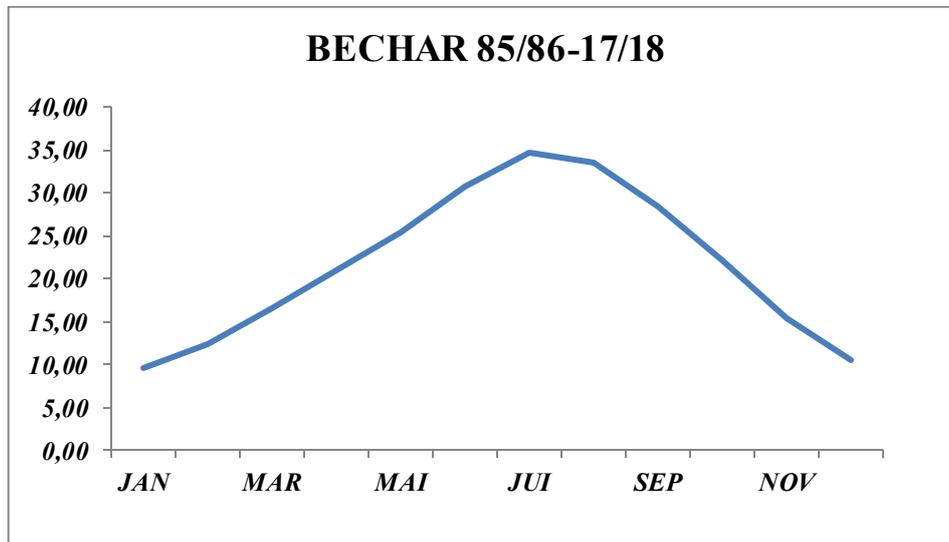


Figure III.5: Températures moyennes mensuelles

Des points essentiels, qu'il faut retenir de cette étude, est la division de l'année en deux saisons thermiques bien caractérisé.

La saison chaude allant de mai jusqu'à octobre, les températures moyennes sont supérieures à la moyenne annuelle qui est de 20 C°, avec un maximum en juillet ou août, qui atteint la valeur de 34C°, alors que la saison froide correspond à novembre-avril, avec un minimum en janvier (10C°).

La diminution du Nord vers le Sud des températures pour les bassins versants, est liée essentiellement à l'altitude, mais aussi à cause de l'effet de la continentalité dans la région aride.

L'amplitude thermique annuelle qui traduit la différence entre la température moyenne du mois le plus chaud et celle du mois le plus froid, est environ 24C°, ce qui confirme la continentalité marquée de ces bassins.

2.3.4 Notion d'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (notée par la suite ETP) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

2.3.4.1 Estimation de l'évapotranspiration

Plusieurs formules permettent d'évaluer l'ETP à partir de différentes mesures climatologiques. Pour notre cas nous avons utilisé les formules de Turc.

Sur la base des bilans hydrologiques observés sur 254 bassins versants situés sous différents climats, et sur la base d'expériences au lysimètre, Turc [1955] considère que les principaux éléments qui régissent l'ETP sont essentiellement : La température, la radiation solaire, les précipitations, et la réserve en eau du sol.

2.3.4.1.1 Formule de Turc

La formule de Turc, qui dérive en simplifiant de la formule de Penmann, ne nécessite que la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale ou de la durée d'insolation. Cette formule est la suivante (Bouanani 2010):

$$ETP = 0.40(Ig + 50) \frac{T}{T + 15} \quad (III.1)$$

Avec :

Etp : évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm d'eau);

T : température moyenne mensuelle de l'air (en °C);

Ig radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (en cal/cm²/jour);

K un coefficient égal à 1 si l'humidité relative hr est supérieure à 50 % (généralement le cas sous nos climats) (Bouanani 2010);

$$\text{Si non } K = 1 + \frac{50 - hr}{70} \quad (III.2)$$

Si la radiation globale Ig n'est pas mesurée, on pourra l'évaluer à partir de la durée d'insolation h par la formule

$$Ig = Iga \cdot \left(0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right) \quad (III.3)$$

Avec:

IgA: radiation globale théorique (en cal/cm²/jour).

H: durées théoriques des jours du mois.

h: dure astronomique du jour en heure, dépend de la latitude et s'obtient à partir des tables Le coefficient 0.4 est valable pour le mois de 30 à 31 jours

Pour le mois de février en remplacera 0.4 par 0.37.

Les valeurs d'ETP trouvées par cette formule devraient être corrigées selon un facteur de corrections K ETP corrigées = ETP.K.

Et l'estimation annuelle de l'ETP; Ce dernière donne une idée générale sur l'évapotranspiration pour de grandes surfaces.

Les résultats de calcul pour la station de Béchar sont représentés dans la Figure III.6.

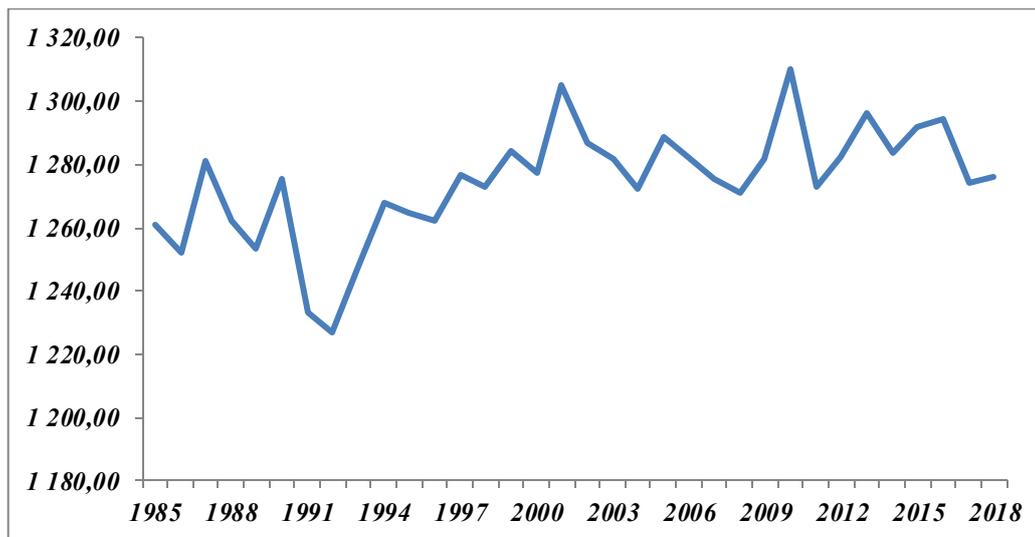


Figure III.6: Evaporation de Turc dans le bassin versant de l'Oued Béchar

Dans La courbe de la Figure III.6, nous avons constaté que les valeurs de le ETP annuelle sont approximativement stables dans toute la série des données, elle atteint ses valeurs plafonds pendant la saison chaude, avec un maximum de 206 mm en juillet ; l'évaporation moyenne annuelle pour la période (1985-2018) est de 1274.29 mm ; Ces valeurs concordent étroitement avec celles des autres facteurs météorologiques, notamment la température, la durée d'insolation, et la fréquence de Sirocco

Pour le grand bassin versant de l'Oued Béchar, les vents sont caractérisés par leurs directions, leurs vitesses et leurs intensités, ils exercent une action destructrice : augmente l'evatranspiration et les phénomènes érosifs, les vents dominants dans la partie sud du bassin en hiver sont de direction Nord-ouest venant de l'Atlantique du Nord chargé de l'humidité.

Ceux de l'été sont de direction Sud/ Est ; Nord/Ouest, Sont forme de Sirocco asséchant les vents des sables caractéristiques dans cette partie de la région, sont fréquents pendant les mois de mars, avril et mai. Cependant, on peut noter leur apparition pendant les autres saisons avec une faible fréquence

3. Hydrologie

3.1 Etude des débits (les lames d'eau écoulées)

Le débit maximal d'un Oued est le résultat des pluies d'hiver et de printemps, il s'établit entre mars, mai et présente près de la moitié du flux annuel de l'Oued, se manifeste souvent par d'importantes inondations qui affrontent les agglomérations situées aux pieds des versants notamment, les villes situées a l'embouchure des Oueds.

Les estimations des débits des crues maximales ont été toujours perçues comme une nécessité impérieuse, pour ce protège contre les séquences néfastes.

Il semble nécessaire de distinguer les crues de saison froide et les crues de saison chaude ces deux grands types de crues se différencient en effet, tant par leur genèse et leur mécanisme de propagation, que par leurs puissances, leurs durées, leurs fréquences ainsi que leurs extensions géographiques.

Pour cette étude, nous avons pris en considérations les valeurs annuelles et mensuelles des lames d'eau écoulées de la station de Béchar.

3.1.1 Débit annuel

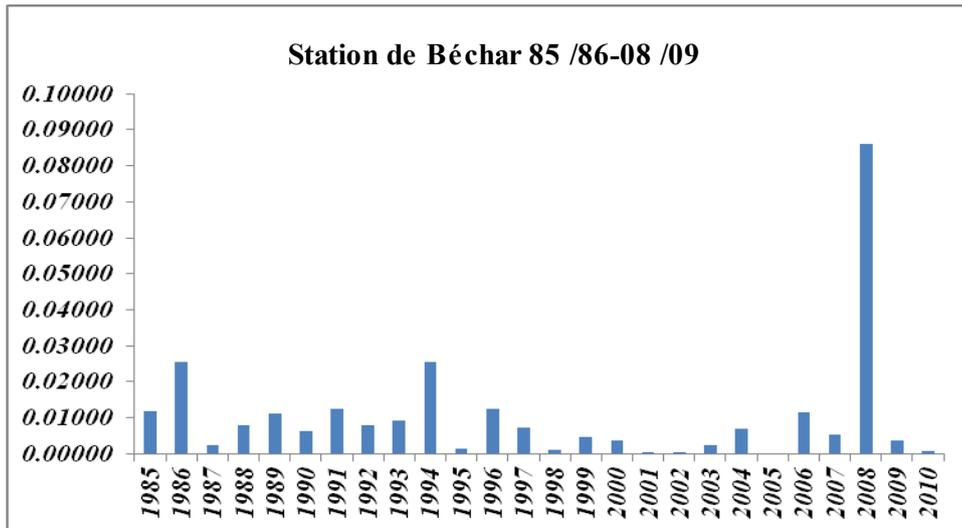


Figure III.7: Lames d'eau écoulées annuelles

La distribution annuelle des lames d'eau écoulées dans la Figure III.7, montre une diminution importante à partir de l'année 1997 jusqu'à 2007, nous avons remarqué une augmentation brute de la lame d'eau écoulée dans l'année 2008 avec un débit de 850m³/s, c'est l'effet de la précipitation exceptionnelle de le mois de octobre 2008.

3.1.2 Débits mensuels

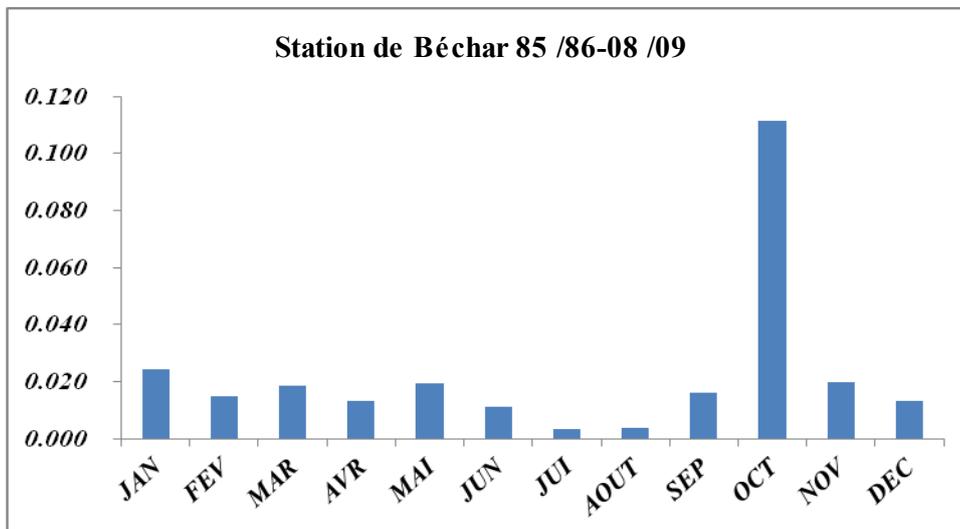


Figure III.8: Lames d'eau écoulées mensuelles

La variation mensuelle de lames d'eau écoulée soutient notre interprétation précédente, car elle montre qu'il y a une lame d'eau importante écoulée pendant le mois d'octobre (Figure III.8).

3.2 Etude statistique

3.2.1 Caractéristiques de l'échantillonnage

La première opération consiste à la caractérisation de l'échantillon qui permet de se familiariser avec les données à étudier. Les indicateurs qui décrivent les séries statistiques peuvent être classés en trois catégories.

Le premier indicateur informe sur la position des données telle que la moyenne arithmétique,

La deuxième catégorie des indicateurs, renseigne sur la dispersion des données et leur niveau de regroupement autour de la moyenne à savoir, la variance, l'écart type et les valeurs extrêmes minimale et maximale.

La dernière catégorie d'indicateurs, caractérisant la forme de l'échantillon de données et regroupant un ensemble de coefficients tels que les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement.

Ces indicateurs sont très utilisés en pratique et en particulier dans les études hydrologiques des cours d'eau.

Soit $(x_i, i = 1, \dots, n)$ un échantillon aléatoire de taille n issu d'une population de taille infinie, les caractéristiques empiriques de cette échantillon sont :

Moyenne arithmétique ou moment non centré d'ordre 1

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{III.4})$$

- Variance ou moment centré d'ordre 2

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{III.5})$$

- Moment centré d'ordre 3

$$m_3 = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \quad (\text{III.6})$$

- Moment centré d'ordre 4

$$m_4 = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 \quad (\text{III.7})$$

- Coefficient de variation

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \quad (\text{III.8})$$

- Coefficient d'asymétrie

$$C_s = \frac{m_3}{S^3} \quad (\text{III.9})$$

- Coefficient d'aplatissement

$$C_k = \frac{m_4}{S^4} \tag{III.10}$$

Les caractéristiques empiriques de la série des débits instantanés maxima annuels (QIX) sont résumées dans le tableau III.1 :

Tableau III.1 : Caractéristiques empiriques de la série QIX

Taille	25
Moyenne arithmétique	22.5
Médiane	20
Écart – type	20.7
Coefficient de variation	0.919
Coefficient d'aplatissement	6.73
Coefficient d'asymétrie	2.01
Minimum	1
Maximum	95

3.2.2 Ajustement à une distribution théorique

Soit $f(x) = P(X = x)$ une densité de probabilité caractérisée par un certains nombre de paramètres θ_1, θ_2 et θ_3 , cette fonction traduit un comportement d'ensemble de tous les éléments de la population D . Ajuster l'échantillon $(x_i, i = 1, \dots, n)$ à une distribution de probabilité théorique $f(x)$, revient à estimer les paramètres θ_1, θ_2 et θ_3 de cette distribution.

La fonction $f(x)$ définie et continue sur un domaine D , possède un certain nombre de caractéristiques essentielles à savoir :

La fonction de répartition :

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_D f(x) dx \tag{III.11}$$

L'espérance mathématique ou moyenne de la population :

$$\mu = E(X) = \int_D x f(x) dx \tag{III.12}$$

- Les moments centrés d'ordre k :

$$\mu_k = E[(X - \mu)^k] = \int_D (x - \mu)^k f(x) dx \tag{III.13}$$

Pour $k = 2$, μ_2 est appelée la variance de la population elle est notée σ^2 , sa racine carrée σ est son écart-type. Les moments sans dimensions sont définis par l'espérance mathématique suivante :

$$\gamma_{k-2} = E\left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma}\right)^k\right] \equiv \frac{\mu_k}{\mu_2^{k/2}} \quad k > 2 \tag{III.14}$$

γ_1 est le coefficient d'asymétrie de la population,

γ_2 est le coefficient d'aplatissement de la population.

- Moment pondéré d'ordre r :

$$\beta_r = E[X(F(X))^r] = \int_D x(F(x))^r f(x) dx \tag{III.15}$$

- L-moment d'ordre $r+1$ (Greenwood et al 1979) :

$$\lambda_{r+1} = \sum_{k=0}^r (-1)^{r-k} C_r^k C_{r+k}^k \beta_k \tag{III.16}$$

Dans l'hypothèse où cette loi régit effectivement la population, d'où on tire l'échantillon, ces paramètres ont une valeur donnée, mais inconnue, qu'il s'agit d'estimer à partir des observations de l'échantillon. Les estimations donnent des résultats différents d'un échantillon à l'autre issu d'une même population.

Les résultats des estimations constituent une variable aléatoire qui possède une moyenne et une variance et ... Les résultats varient aussi avec les méthodes d'estimation. Selon les méthodes, les estimateurs n'auront pas la même moyenne, pas la même variance...

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour évaluer les paramètres d'une loi de probabilité par rapport à un échantillon, la fiabilité de la méthode d'estimation réside dans le biais :

$$E(\hat{\theta}_i) - \theta_i, \quad \forall i = 1, \dots, 3 \text{ ou } \hat{\theta}_i \text{ est l'estimateur de non biaisé de } \theta_i \text{ si } E(\hat{\theta}_i) = \theta_i.$$

La précision d'un estimateur se mesure par son moment d'ordre 2 par rapport à la vraie valeur, c'est-à-dire par la quantité : $E\left[(\hat{\theta}_i - \theta_i)^2\right], \forall i = 1, \dots, 3$ qui est la variance de l'estimateur si celle-ci est non biaisée. On démontre que cette précision ne peut être inférieure à une valeur minimale suivant l'inégalité de Cramer – Rao qu'un estimateur non biaisé de variance minimale est un estimateur efficace.

L'efficacité d'un estimateur non biaisé est le rapport de la variance minimale à sa propre variance. Pour tout paramètre, il existe au moins un estimateur asymptotiquement efficace dont l'efficacité tend vers 1 quand la taille de l'échantillon tend vers l'infini).

Trois types de méthodes sont généralement utilisés pour estimer les paramètres d'une distribution de probabilité :

3.2.2.1 Méthode des Moments (MM)

Existe sous plusieurs formes, elle consiste à égaliser les premiers moments de la population à celle de l'échantillon et déterminer les estimateurs $\hat{\theta}_1$, $\hat{\theta}_2$ et $\hat{\theta}_3$ solutions du système d'équations:

$$\begin{cases} \mu = \bar{X}, \\ \sigma^2 = S^2, \\ \mu_3 = m_3. \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Le choix des ordres à prendre en considération dans la méthode des moments, n'est pas anodin. La théorie des statistiques exhaustives peut suggérer des ordres plus appropriés que d'autres pour une loi donnée. Ainsi Ashkar et Bobée [1991] proposent une méthode généralisée des moments (Generalized Method of Moments : GMM) ou par exemple la moyenne et la variance peuvent être remplacées par les moments d'ordre 0 (moyenne géométrique) et 1, et par les moments d'ordre -1 et 0 (moyenne harmonique et géométrique). Le choix de l'ordre des moments utilisés dans la méthode GMM donne plus au moins de poids aux valeurs fortes ou faibles de l'échantillon, le choix des ordres utilisés peut faire varier de façon importante la variance des quantiles estimés. La méthode SAM (Sundry Averages Method) de Bobée et Ashkar [1991] ou méthode des trois moyennes (ordres -1, 0 et 1) et la méthode des moments mixtes (ordres 0, 1 et 2) font intervenir des moments d'ordre petit, donc de plus faible variance, ce qui a une influence sur la variance asymptotique des quantiles (Bobée 1999).

3.2.2.2 Méthode du Maximum de Vraisemblance (MVS)

Soit $f(x_1)$, $f(x_2)$, ..., $f(x_n)$ les probabilités respectives d'obtenir les n valeurs x_1 , x_2 , ..., x_n . La fonction de vraisemblance notée $L(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta_1, \theta_2, \theta_3)$ est une fonction de probabilité conditionnelles qui décrit les paramètres θ_1 , θ_2 et θ_3 d'une loi statistique en fonction des valeurs x_1 , x_2 , ..., x_n supposées connues. Elle s'exprime par :

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta_1, \theta_2, \theta_3) = f(x_1) \cdot f(x_2) \cdot \dots \cdot f(x_n) \quad (\text{III.18})$$

Un estimateur du maximum de vraisemblance est la valeur de $\hat{\theta}_1$, $\hat{\theta}_2$ et $\hat{\theta}_3$ qui maximise $L(x_1, x_2, \dots, x_n)$, c'est-à-dire :

$$\left\{ \frac{\partial L(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta_1, \theta_2, \theta_3)}{\partial \theta_i} \right\}_{i=1, \dots, 3} = 0 \quad (\text{III.19})$$

Ou,

$$\left\{ \frac{\partial \ln[L(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta_1, \theta_2, \theta_3)]}{\partial \theta_i} \right\}_{i=1, \dots, 3} = 0 \quad (III.20)$$

Sachant que les conditions suivantes doivent être vérifiées :

$$\left\{ \frac{\partial^2 L(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta_1, \theta_2, \theta_3)}{\partial \theta \partial \theta_j} \right\}_{i,j=1, \dots, 3} < 0 \quad \text{ou} \quad \left\{ \frac{\partial^2 \ln[L(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta_1, \theta_2, \theta_3)]}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right\}_{i,j=1, \dots, 3} < 0$$

Le développement des dérivées fournit un système de trois équations à trois inconnues dont la solution donne les valeurs de $\hat{\theta}_1$, $\hat{\theta}_2$ et $\hat{\theta}_3$.

3.2.3 Adéquation d'une loi de probabilité

Après avoir estimé les paramètres de la distribution, un test d'adéquation s'avère nécessaire qui consiste à définir une règle de décision concernant la validité d'une hypothèse relative à l'accord global d'une distribution empirique avec une distribution théorique ajustée sur les observations.

Plusieurs tests ont été utilisés que ce soient des tests paramétriques ou non paramétriques.

3.2.3.1 Test de Chi – Carré

Le plus connu des tests d'adéquation, bien que peu puissant, il offre l'avantage de fournir une réponse interprétable en terme de probabilité. Il nécessite un découpage en classes ou en groupes et que selon la manière de faire ces classes les résultats peuvent se situer de part et d'autre d'un seuil de signification.

L'échantillon des observations étant découpé en k classes, n_i et e_i désigne pour chacune des k classes, les effectifs observés et théoriques pour la distribution de référence. La méthode suppose qu'aucun des effectifs e_i n'est inférieur à 5.

Sous l'hypothèse d'adéquation, la quantité :

$$\chi_{ob}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \quad (III.21)$$

Peut être considérée comme une valeur observée d'une variable aléatoire ayant une distribution à χ^2 à $\nu = k - c - 1$ degrés de liberté. r est le nombre de paramètres de la loi de référence qui ont été estimés à l'aide des observations.

Pour un niveau signification α %, l'adéquation de la loi est acceptée si :

$$\chi_{ob}^2 \leq \chi_{\nu, \alpha/2}^2$$

Les valeurs de $\chi_{\nu, \alpha/2}^2$ sont tabulées en fonction du ν et de la probabilité $p = \alpha/2$.

3.2.3.2 Test de Kolmogorov – Smirnov

La mise en oeuvre du test KS , nécessite le calcul de la statistique observée :

$$D_{ob} = \max |F_i - F(x_{(i)})|_{i=1, \dots, n} \quad (III.22)$$

Pour un niveau de signification α %, l'adéquation de la loi est acceptée si $D_{ob} \leq D_{n,\alpha}$, où $D_{n,\alpha}$ c'est la statistique de Kolmogorov – Smirnov.

Les valeurs de $D_{n,\alpha}$ pour les niveaux de signification 1 et 5 % sont données dans le tableau III.2 en fonction de la taille n de l'échantillon (Birbaum 1952).

Tableau III.2: Valeurs des quantiles de Kolmogorov – Smirnov

N	$D_{n,0.05}$	$D_{n,0.01}$	n	$D_{n,0.05}$	$D_{n,0.01}$
15	0.338	0.404	20	0.294	0.356
16	0.328	0.392	25	0.270	0.360
17	0.318	0.381	30	0.240	0.290
18	0.309	0.371	35	0.230	0.270
19	0.301	0.363	> 35	$1.36/n^{0.5}$	$1.63/n^{0.5}$

3.2.3.3 Test du coefficient de corrélation

Le test de coefficient de corrélation *PPC* (*Probability Plot Correlation*) consiste à mesurer la linéarité entre les individus de l'échantillon $(x_{(i)}, i = 1, \dots, n)$ et les individus estimés $(w_i, i = 1, \dots, n)$ par la distribution de probabilité expérimentale $(F_i, i = 1, \dots, n)$ (Filliben 1975; Vogel 1986, 1987). Le coefficient de corrélation entre les couples $(x_{(i)}, w_i)$ pour $i = 1, \dots, n$ est exprimé par :

$$PPC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(w_i - \bar{w})}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2 \right]^{1/2}} \tag{III.23}$$

La loi de probabilité est adéquate si le coefficient de corrélation est proche de l'unité ou $PPC^2 \geq 0.75$.

3.2.3.4 Test de la racine de la moyenne des quadratiques de la déviation

Le test de la racine de la moyenne des quadratiques de la déviation (*Root Mean Square Déviation*) consiste à calculer l'erreur relative entre les deux séries $(x_{(i)}, i = 1, \dots, n)$ et $(w_i, i = 1, \dots, n)$. Le test est exprimé par la relation (2.46) (Nerc 1975, Karim et al 1995) :

$$RMSD = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{(i)} - w_i}{x_{(i)}} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{III.24}$$

La loi est considérée adéquate si *RMSD* est proche de zéro.

3.2.4 Analyse fréquentielle des débits instantanés maximas

L'analyse fréquentielle est une approche statistique de prédiction basée sur des calculs probabilistes utilisant l'historique des événements pour prédire des fréquences d'apparitions futures. En se basant sur les notions et concepts traités, cette analyse devra d'estimer les quantiles correspondant aux différentes périodes de retour.

L'estimation des quantiles est effectuée en considérant la méthode d'analyse fréquentielle qui constitue les étapes suivantes :

- 1- Caractérisation des échantillons étudiés et détermination des indicateurs statistiques usuels tels que la moyenne, l'écart type, le coefficient de variation, le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement,
- 2- Vérification des hypothèses de base de la série de données à étudier,
- 3- Détermination des quantiles (ajustement de distributions statistiques ; estimation des paramètres des distributions ; choix de la loi qui ajuste le mieux les données observées et estimation des quantiles et les intervalles de confiances aux périodes de retour identifiées).

3.2.5 Distributions de probabilités

Elles sont très nombreuses, les plus fréquemment utilisées dans l'étude des crues et inondations sont généralement : Log-Normale, Exponentielle ou Gumbel, Pearson 3, Log – Pearson 3 et Weibull...

6. Résultats et discussion

Les lois d'ajustement sont nombreuses et ne peuvent être appliquées à un échantillon que si les conditions d'homogénéités et stationnarités sont réunies.

Les critères de choix d'une loi sont liés à un ajustement graphique d'abord et ensuite à un test de dispersion. L'allure des points sur du papier à probabilité permet d'accepter ou de rejeter la loi.

Selon Bekhira et al [2019b] la série des échantillons s'ajuste bien avec la loi de Gumbel (Gumbel 1942,1958).

Le tableau III.3 permis d'avoir les quantiles de chaque période de retour par la loi Gumbel.

Tableau III.3: Quantiles estimés par la loi Gumbel (Bekhira et al 2019b)

T (ans)	Q (m ³ /s)
100	567.3
50	478.3
25	388.6
10	268
5	172

-Test d'homogénéité :

Test d'adéquation du Khi carré.

-Hypothèses :

H0 : L'échantillon provient d'une loi de Gumbel;

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Gumbel.

-Résultats :

Résultat de la statistique : $X^2 = 95.15$

P-value : $P = 0.00006$

Degrés de liberté : 4

Nombre de classes : 7

Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%. La figure III.9 illustre l'ajustement de la série pluviométrique à la loi Gumbel.

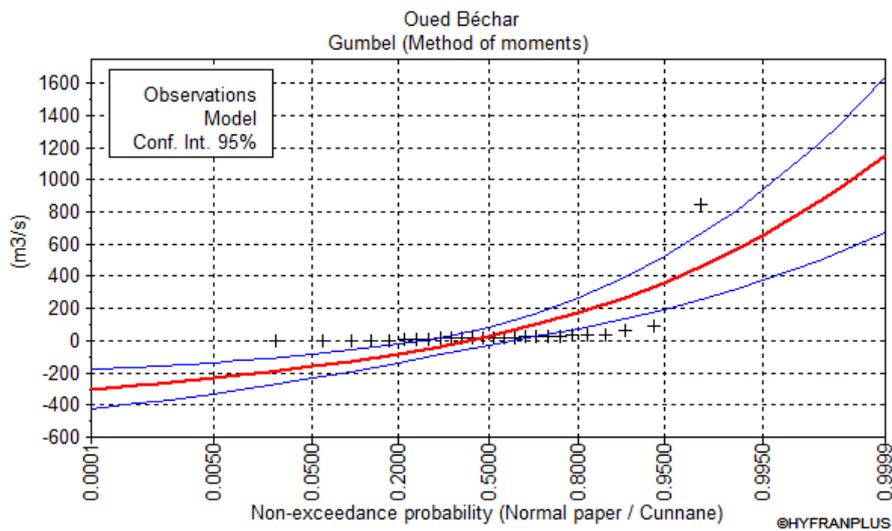


Figure III.9: Ajustement et intervalles de confiance à 95 % de la série QIX à la loi Gumbel (Bekhira et al 2019b)

Conclusion

Les caractéristiques climatiques des bassins versants sont étroitement liées à sa position géographique et son relief ; on relève de fortes variabilités spatiales et surtout temporelles des précipitations sous forme d'averses, des températures et l'influence élevée de l'évapotranspiration.

La combinaison de ces conditions physico-géographiques et climatiques est déterminante dans le comportement hydrologique des diverses unités des bassins.

Les analyse des différents paramètres climatiques du bassin versant de l'Oued Béchar (série 1985-2007), sur les stations météorologiques de Béchar, malgré la pauvreté de la couverture des stations climatiques dans le bassin versant nous permettent de conclure ce qui suite:

Les valeurs moyennes interannuelles, de températures, évaporations et précipitations sont de l'ordre de 26.64 C°, 1274.29 mm, 109,02 mm.

L'étude des indices du climat a confirmé l'hyperaridité de celui-ci.

L'étude hydrologique des débits de la station hydrométrique de l'Oued Béchar, montre des débits moyens annuels qui s'échelonnent de 172 à 567.3 m³/s, et dans le cas exceptionnelle 830 m³/s.

Vu la disponibilité des données hydrométriques (taille 25 ans), l'ajustement de la série des débits maxima à des lois statistiques qui ont des distributions couramment utiliser dans l'étude des crues.

CHAPITRE IV

MODELISATION HYDROLOGIQUE ET

HYDRAULIQUE

MODELISATION HYDROLOGIQUE
ET HYDRAULIQUE**1. Introduction**

En fait, dans de nombreuses études, les données sur les débits d'eaux sont insuffisantes, même si les données sur les précipitations sont généralement disponibles. Par conséquent, afin de développer une bonne stratégie de gestion des ressources en eau grâce à la disponibilité d'informations et de données suffisantes et précises sur les quantités de pluie disponibles, il est nécessaire de rechercher un moyen de convertir les données de pluie en données hydrométriques (Figure IV.1), car la modélisation qui simule la réalité est l'une des méthodes les plus utilisées dans l'hydrologiques et l'hydrauliques, et dans ce chapitre nous serons exposés deux modèles, le premier est la modélisation hydrologique, et le second est la modélisation hydraulique.

Les résultats obtenus de cette dernière, nous permettent d'élaborer un plan de gestion des risques d'inondation à l'aide d'un modèle hydraulique HEC-RAS

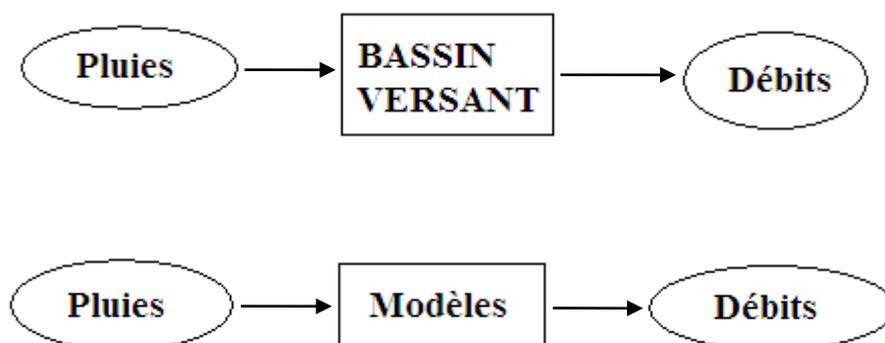


Figure IV .1: Modélisation hydrologique

2. Modélisation hydrologique**2.1 Le Modèle GR**

Les modèles de simulation du Génie Rural fonctionnent aux pas de temps annuel, mensuel et journalier (Radia 2012).

2.1.1 Objectifs de développement

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, tel que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc (Radia 2012), Les chroniques de débit du bassin versant de l'Oued Béchar sont souvent lacunaires, discontinues, de courte durée, et donc difficilement exploitables pour une

analyse hydrologique fiable. L'objectif de ce travail est de simuler puis d'étendre, dans la mesure du possible, les séries hydrologiques en utilisant le modèle pluie-débit (GR).

C'est pour répondre à ces questions que le *Cemagref* a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel 1983).

Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant (Radia 2012).

2.1.2 Mode de développement

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies) (Radia 2012).

Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet 2005):

- Représentation globale du bassin versant,
- Approche empirique de développement sans recours à priori à la physique des écoulements,
- Augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- Justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- Recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- Utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles,
- Évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle,

2.1.3 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A

2.1.3.1 Définition

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au *Cemagref* à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue de l'utiliser pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau. La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par (Mouelhi 2003, 2006a).

2.1.3.2 Description mathématique

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit Q_k de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E . Le modèle s'écrit (Radia 2012):

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad (\text{IV.1})$$

Où :

X est l'unique paramètre du modèle.

Cette formule dérive de la formule de Turc [1955], qui donne l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédente l'année en cours.

Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) :

Si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

2.1.3.3 Paramètre

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre X adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle.

Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de X vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13 ; 3.5] (Bouanani2010).

2.1.4 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

2.1.4.1 Définition

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres.

Son développement a été initié au *Cemagref* à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya [1990], Kabouya et al [1991], Makhlouf et al [1994], Mouelhi [2003] et Mouelhi et al [2006b], qui a permis d'améliorer progressivement les performances du modèle.

La version présentée ici est celle de Mouelhi et al [2006b] qui paraît la plus performante.

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente a des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle.

Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique.

Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin (Bouanani2010).

2.1.4.2 Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la Figure IV.2. P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

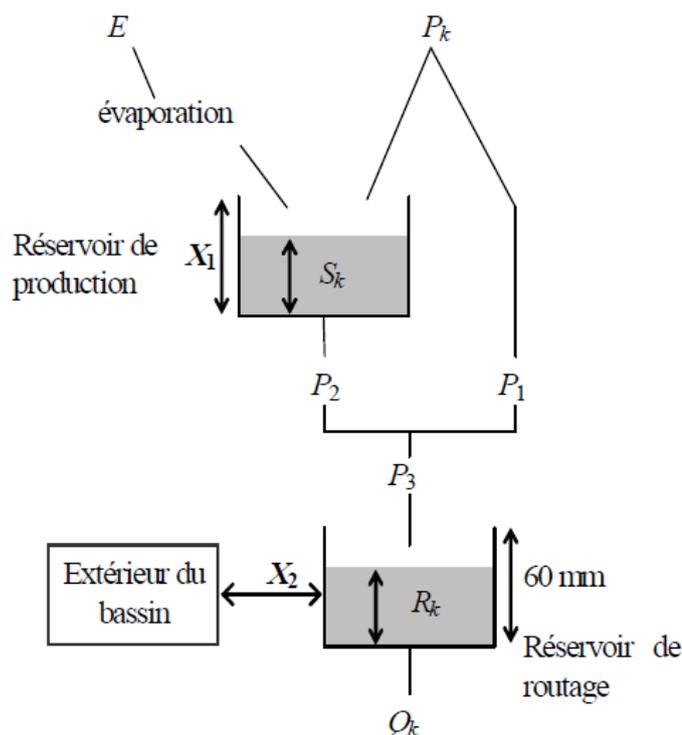


Figure IV.2: Schéma de la structure du modèle GR2M (Radia 2012)

Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes (Radia 2012):

Production

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol.

Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \cdot \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right) \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)} \quad (IV.2)$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm.

La pluie en excès, P_1 , est donnée par:

$$P_1 = P - P_s \quad (IV.3)$$

Et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \quad (IV.4)$$

Du fait de l'évapotranspiration, une quantité E_s est prélevée du réservoir :

$$E_s = \frac{S' \left(2 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)} \quad (IV.5)$$

E est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois calendaire considéré.

Le niveau S' devient S'' :

$$S'' = S' - E_s \quad (IV.6)$$

Percolation

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 :

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-2/3} \right\} \quad (IV.7)$$

Et son niveau S_{k+1} , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2 \quad (IV.8)$$

Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique

La quantité d'eau totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (IV.9)$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3 \tag{IV.10}$$

Un terme d'échange en eau souterraine F a été imposé par les données des nombreux bassins utilisés.

Ignorer cette ouverture sur l'extérieur non atmosphérique conduit à une baisse considérable de l'efficacité du modèle. F est alors calculé par :

$$F = (X_1 - 1) R' \tag{IV.11}$$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel.

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R'' = X_2 \cdot R' \tag{IV.12}$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60mm, se vidange pour donner le débit Q_k selon l'équation suivante:

$$Q_k = \frac{R''^2 y}{R'' + 60} \tag{IV.13}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k \tag{IV.14}$$

2.1.4.3 Paramètres

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X_1 : capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

Sur un large échantillon de bassins versants, (Perrin 2000; Michel 1983; Andrésian 2003) on obtient les valeurs données dans le Tableau IV.1 (Bekhira et al 2018).

Tableau IV.1: Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants de l'Oued Béchar (Radia 2012)

paramètre	médiane	Intervalle de confiance à 90%
X_1 (mm)	380	140-2640
X_2 (-)	0.92	0.21-1.31

2.2 Applications des modèles

Les modèles présentés précédemment peuvent être utilisés pour un certain nombre d'application d'ingénierie ou de gestion de l'eau. A titre d'exemples, on peut citer :

- la reconstitution ou l'extension de séries de débit: après calage, le modèle est appliqué en simulation sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées ;
- la prédétermination : les séries de débit observé étant souvent courte, il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle pluie-débit.

On peut pour cela soit utilisé des séries de pluie observée si elles sont suffisamment longues, soit utilisé un générateur stochastique de pluie qui permettra d'obtenir des séries probables de pluie sur le bassin (un tel générateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observée) ;

- la prévision à court terme (quelques heures à quelques jours) : elle est particulièrement utile pour les événements de crues Le modèle doit alors intégrer une procédure d'assimilation des débits observés, ce qui permet d'améliorer de façon substantielle les prévisions.

Les travaux de Tangara [2005] ont par exemple permis de mettre au point un modèle continu (GR3P) dérivant du modèle GR4J et spécifiquement adapté à l'exercice de prévision à court terme; voir également les travaux réalisés en mode événementiel avec le modèle GR3H (Fourmigué et al 2005);

- la prévision à moyen ou long terme (de quelques semaines à quelques mois): elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource.

Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures.

Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèle météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie;

- la détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant : l'utilisation d'un modèle hydrologique permet d'identifier dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements de caractéristiques du bassin versant (Andréassian 2002; Andréassian et al 2003);

- la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages: grâce au modèle, on peut dans une étude de dimensionnement simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien d'étiage, écrêtement de crue, etc.) en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports.

En conditions opérationnelles, la prévision des apports peut permettre en mieux gérer l'ouvrage (Yang et al 1991).

2.3 Modélisation pluie débit

2.3.1 Application de modèle GR

Les modèles du Génie Rural du fait de leur construction, ne peuvent être que parcimonieux (peu de paramètre à caler), Par suit ; ils ont des besoins en données limitées, dans un domaine ou les modèles tendent à devenir de plus en plus complexes pour intégrer des processus supposés exister à l'échelle ponctuelle.

Les modèles GR ont été testés sur des bassins et des contextes climatiques très variés, en France mais aussi dans d'autre pays (Etats-Unis, Australie, Brésil, Allemagne, Algérie, Côte d'Ivoire, etc.). Applicables à l'échelle du bassin versant, ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 Km² à plus de 100 000 Km².

Ils sont également utilisés pour une large gamme d'applications opérationnelles telles que la prédétermination des crues, la prévision des crues et d'étiage, la détection d'impact, la gestion et dimensionnement d'ouvrage.

2.3.1.1 Modèle annuel GR1A

Dans cette étude, pour prédire le débit à une année donné, on utilise à l'entrée du modèle des valeurs des pluies annuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc et des débits annuels (exprimés en lames d'eau écoulées) (Bekhira et al 2018).

2.3.1.1.1 Résultats du calage

Dans un premier temps, on fait tourner le modèle en calage seulement sur la totalité de la période définie dans le tableau ci dessous. Nous avons procédé à des changements sur le paramètre X du modèle en commençant par la valeur 0.13 (valeur minimale donnée par le concepteur du GR1A) et la faisant accroître successivement avec un intervalle de 0.01 jusqu'à la valeur supérieure limite donnée par le modèle 3.5. Nous avons obtenue le meilleur calage avec des valeurs du paramètre X égale à 2,2 présentées dans le Tableau IV.2 (Bekhira et al 2018).

2.3.1.1.2 Résultats du calage du modèle annuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc

La validation du calage est effectuée en appliquant le test de performance du modèle de coefficient de détermination R² (Tableau IV.2) (Bekhira et al 2018).

Tableau IV.2: Valeurs des paramètres après calibration et performances du bassin versant de l'Oued Béchar (Bekhira et al 2018)

Données annuelles	ETP(Turc)			
	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation (R ²)
Oued Béchar	2.2	77.9 %	89.1 %	0.798

X : Coefficient de correction de l'ETP (mm) (évapotranspiration potentiel)

La valeur de Nash (Tableau IV.2) après calage est plutôt bonne (77.9 %), avec un coefficient de corrélation R2 égale 0,79, on considère généralement que cette valeur absolue est supérieure à 0,70, donc il y a une liaison forte entre les deux séries (Figure IV.3).

La courbe de la lame d'eau écoulee calculée et celle mesurée indiquent des superpositions presque parfaites pour le bassin de l'Oued Béchar (Figure IV.4). Le bilan est assez équilibré, il est égal à 89.1% (Tableau IV.2), ce bilan traduit la répartition de la pluie brute observée en pluie "nette", en quantité d'eau évapotranspirée et en quantité d'eau stockée par le bassin versant.

Le paramètre X, qui désigner l'influence d'un passage des eaux du bassin versant sur l'extérieur, montre, que pour la valeur de $2.2 > 1$, le bassin de l'Oued Béchar perd de l'eau soit en s'évaporant vers l'atmosphère soit en s'infiltrant en profondeur vers les nappes ou vers d'autres bassins versants adjacents de l'Oued Zousfana et de l'Oued Guir. Selon les valeurs des coefficients de détermination, le calage par le modèle GR1A est presque correct pour le bassin versant de l'Oued Béchar.

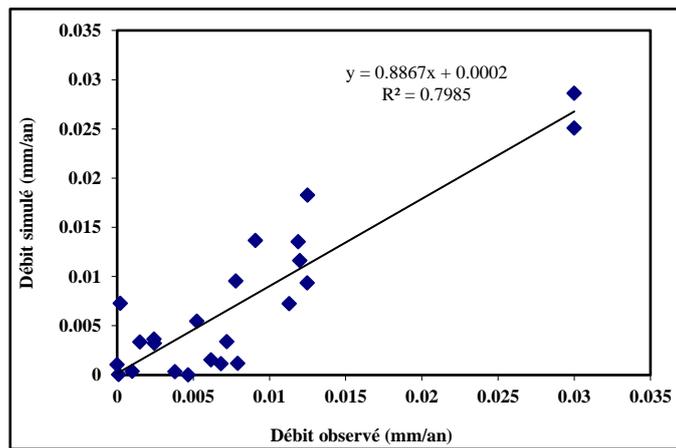


Figure IV.3: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés (Bekhira et al 2018)

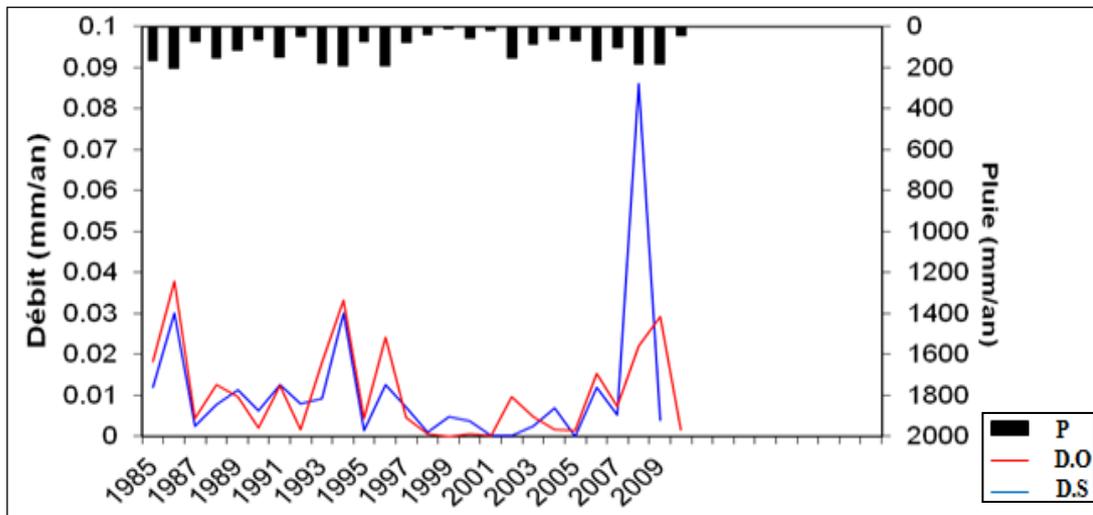


Figure IV.4: Résultat du calage (Bekhira et al 2018)

Dans le même régime climacique, nous avons observé que Elhuossaoui et al [2015], et Elhuossaoui et al [2016] trouve $X=1$, $Nash=85\%$, $R^2=0.90$ dans l'étude du bassin versant de l'Oued Tamanrasset, ces valeurs illustre de similarité entre les deux études de bassin versant dans le même régime climatique.

2.3.1.2 Modèle mensuel GR2M

Dans cette étude, pour prédire le débit à un mois donné, nous avons utilisé à l'entrée du modèle des valeurs des pluies mensuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc (mm) et des débits mensuels observés exprimés en lames d'eau écoulées (mm) (Bouanani 2010).

2.3.1.2.1 Résultats du calage

Le calage des modèles a été réalisé après plusieurs passages sur ordinateur (une centaine de simulation). Nous avons procédé aux changements des valeurs des paramètres X_1 et X_2 du modèle entre les valeurs limites comprises entre 110 et 2640 (mm) jusqu'à l'obtention des valeurs optimums des coefficients de détermination, et le critère de Nash. Les résultats du calage, coefficient de détermination, et critère de Nash sont présentés dans le Tableau IV.3. Le calage du Modèle GR2M a été relativement plus difficile par rapport au GR1A (Bekhira et al 2018).

2.3.1.2.2 Résultats du calage du modèle mensuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc

Il s'agit de pouvoir choisir le jeu des paramètres X_1 et X_2 qui représente au mieux le fonctionnement du bassin versant (Tableau IV.3).

Tableau IV.3: Valeurs des paramètres après calibration et performance du bassin versant de l'Oued Béchar (Bekhira et al 2018)

Données annuelles	ETP(Turc)					
	X_1	X_2	Nash	Bilan	R_0	R^2
Oued Béchar	4.74	0.02	77.9%	98.6%	10	0.76

X_1 : Capacité réservoir de Production (mm), X_2 : Paramètre d'échange (mm)

R_0 : Niveau de remplissage initial (max =60 mm), R^2 : Coefficient de corrélation.

La valeur du critère de Nash en calage est, de façon générale, bonne pour le bassin versant de l'Oued Béchar, avec un coefficient de corrélation R^2 égale 0,76, on considère généralement que cette valeur absolue est supérieure à 0,70, donc il y a une liaison forte entre les deux séries (Figure IV.5).

On observe une bonne superposition des hydrogrammes des débits observés et calculés mais avec parfois des erreurs d'amplitude (Figure IV.6).

La valeur du critère de Nash en calage est de façon générale bonne pour le bassin versant de l'Oued Béchar, car il est supérieur à 77.9 (Tableau IV.3).

La courbe de la lame d'eau écoulée calculée et celle mesurée indique des superpositions presque parfaites pour le bassin de l'Oued Béchar. Le bilan est assez équilibré, il est égal à 98.6% (Tableau IV.3).

Ce bilan traduit la répartition de la pluie brute observée en pluie "nette", en quantité d'eau évapotranspirée et en quantité d'eau stockée par le bassin versant.

Suivant les valeurs des coefficients de détermination X1 et X2 (Tableau IV.3), le calage pour le modèle GR2M mensuel paraît correct.

Dans le même régime climatique, nous avons observé que Elhuossaoui et al [2015], et Elhuossaoui et al [2016] trouve $X1=76.73$, $X2=0.66$, $Nash=70.1$, $R^2=0.82$ dans l'étude du bassin versant de l'oued Tamanrasset, ces valeurs illustre de similarité entre les deux études de bassin versant dans le même régime climatique.

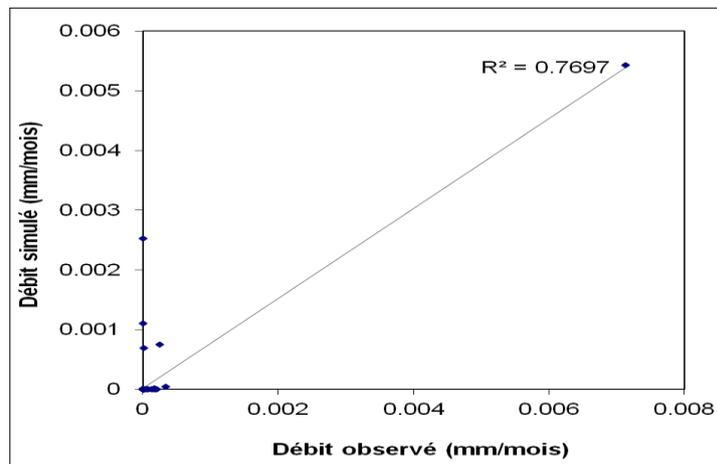


Figure IV.5: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

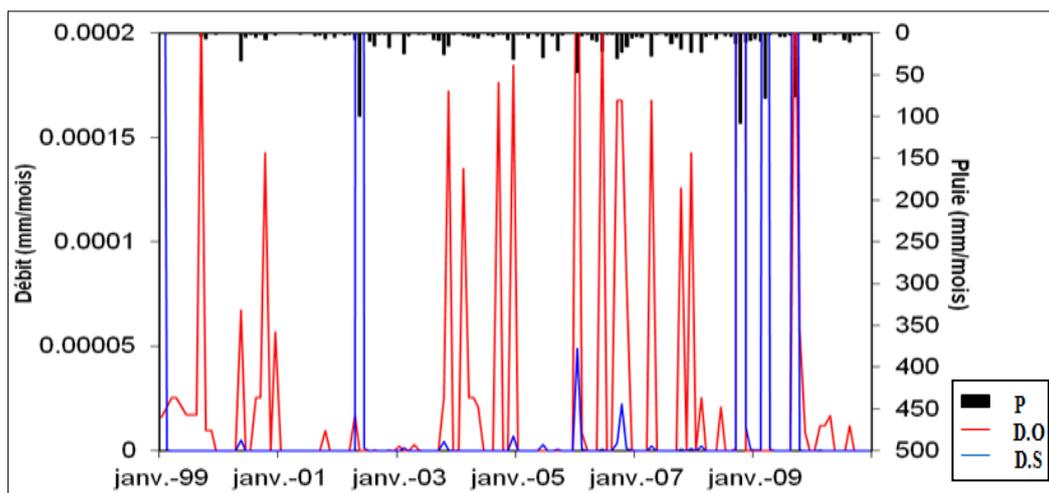


Figure IV.6: Résultat du calage

La valeur du paramètre de la capacité du réservoir de production estimée $X1$ est égale à 4.74mm qui traduit la fonction de production, ce qui indique la capacité de pluie transformée en lame d'eau disponible au ruissellement à l'échelle du bassin versant de l'Oued Béchar (Figure IV.7).

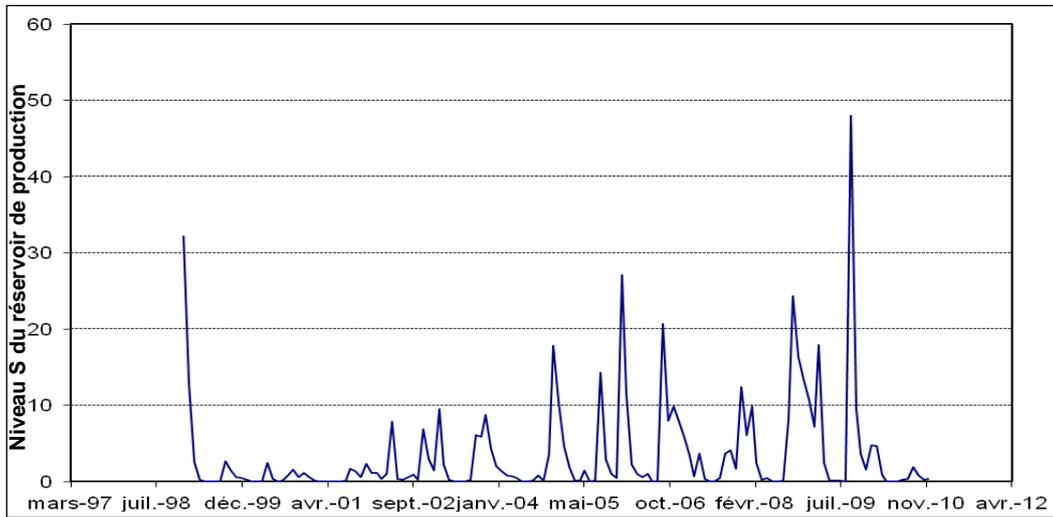


Figure IV.7: Courbe indique le niveau S du réservoir production (Bekhira et al 2018)

La valeur du paramètre de coefficient d'échanges souterrains estimée $X1$ est égale à 0.02, ce qui traduit la fonction transfert et qui indique le mouvement de cette lame accumulée au sol lors des précipitations, vers l'exutoire du bassin versant de l'Oued Béchar (Figure IV.8).

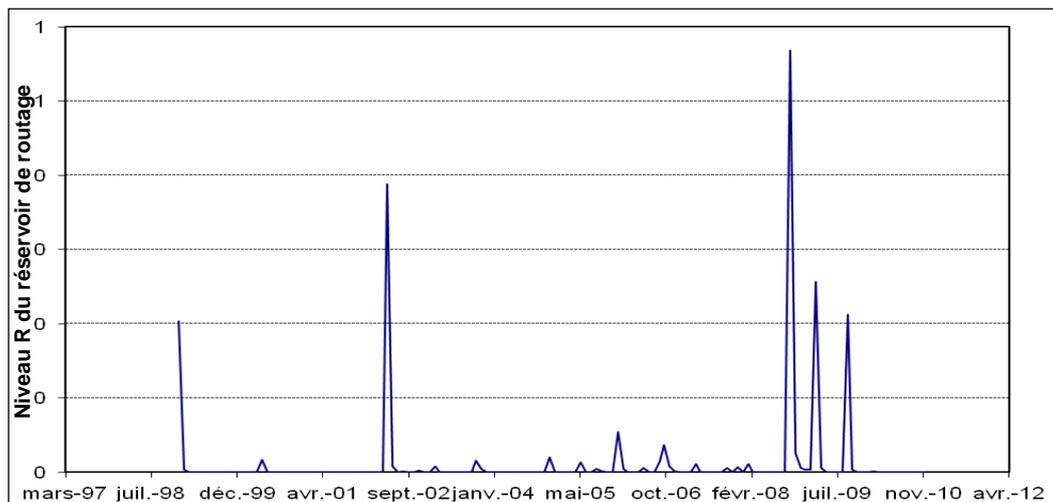


Figure IV.8: Courbe indique le niveau R du réservoir de routage (Bekhira et al 2018)

2.3.1.2.3 Bilan hydrologique estimatif de bassin versant de l'Oued Béchar

Les résultats de la modélisation hydrologique par le modèle GR, va nous permettre d'établir un bilan hydrologique estimatif du bassin versant de Béchar représenté sur la Figure IV.9.

On constate que les précipitations sont inférieures aux valeurs d'évaporations, d'où il est impossible d'établir un bilan hydrologique.

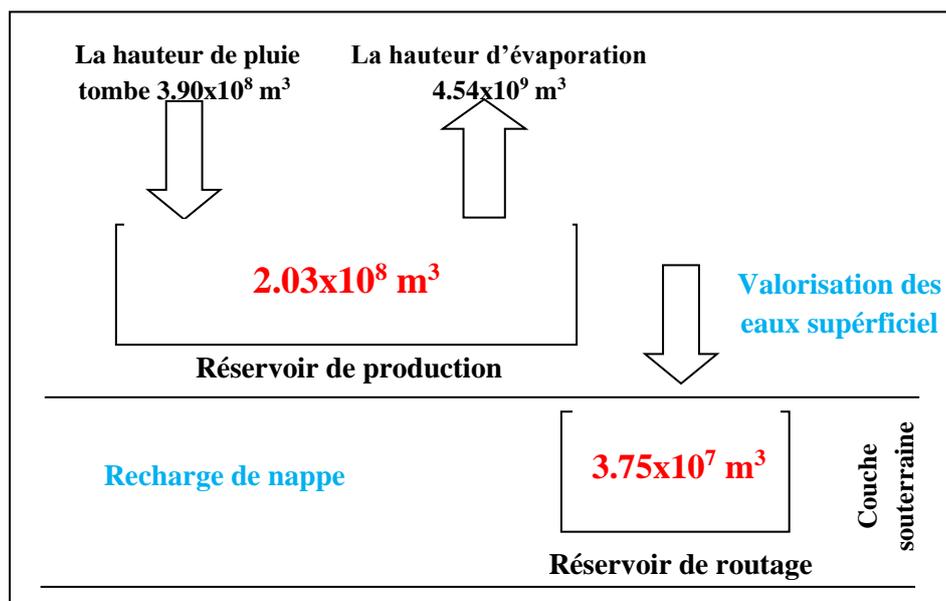


Figure IV.9: Le bilan hydrologique estimatif du bassin versant de l'Oued Béchar

3. Modélisation hydraulique

Afin de maîtriser un outil informatique pour modéliser l'écoulement, nous avons choisi le modèle (1D) HEC-RAS qui a une version disponible gratuite et plus simples à manipuler.

Ainsi les données nécessaires pour cette modélisation hydraulique sont les débits issus de l'étude hydrologique, la géométrie du cours d'eau dans sa traversée de la ville ainsi que la pente longitudinale et la rugosité de lit et des berges dans les différents points de calcul.

Cette modélisation représente une schématisation simplifiée d'un système réel de l'écoulement à surface libre. Notre objectif est d'avoir les lames d'eaux correspondantes aux différents débits issus de l'étude hydrologique pour être utilisées dans la section suivante afin de cartographier l'Aléa (Vidal 2005).

3.1 Modèle HEC-RAS

Le modèle HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) est un modèle unidimensionnel conçu par Hydrologic Engineering Centre de l'US Corp Engineers pour modéliser l'écoulement à surface libre permanent et non permanent et qui est conçue pour exécuter les tâches suivantes:

1. Calcul des hauteurs d'eau dans un régime permanent.
2. Simulation de l'écoulement non permanent.
3. Calcul de la capacité de transport solide.
4. Exécution d'une analyse de qualité de l'eau.

Les trois composants peuvent se présenter dans la même géométrie. En plus le système comporte plusieurs caractéristiques hydrauliques qui peuvent être appelés une fois les lignes d'eau sont calculées.

Le modèle est en développement continu.

La version actuel est HEC-RAS 4.0 caractérisé, en comparaison avec les versions précédentes, par l'amélioration de calcul de transport solides et d'autres fonctionnalités sur la qualité des eaux (Chachoua 2010).

3.1.1 Bases théoriques de logiciel HEC-RAS

Les bases théoriques d'HEC-RAS sont publiées dans les brochures d'aide du logiciel.

Malgré cela, on va citer les principales concernant le régime permanent.

L'HEC-RAS a la capacité de détermination unidimensionnelle des lames d'eaux à partir du calcul de la variation de la hauteur d'eau entre deux sections successives par la résolution (Figure IV.10), et d'une procédure itérative, de l'équation d'énergie suivante:

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_c \quad (\text{IV.15})$$

Tel que :

y_1 et y_2 : Tirant d'eau dans chaque section,

Z_1, Z_2 : Côte de fond,

V_1, V_2 : Vitesse moyenne dans chaque section,

α_1, α_2 : Coefficients relatives à la répartition des vitesses dans une section,

g : Accélération de la pesanteur,

h_c : Perte de charge totale.

La perte de charge est composée de perte de charge linéaire et singulière.

$$h_c = L \overline{S_f} + c \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (\text{IV.16})$$

Avec :

L : Distance entre deux sections,

C : Coefficient de perte par expansion ou contraction,

S_f : Pente représentative de frottement entre deux sections tel que

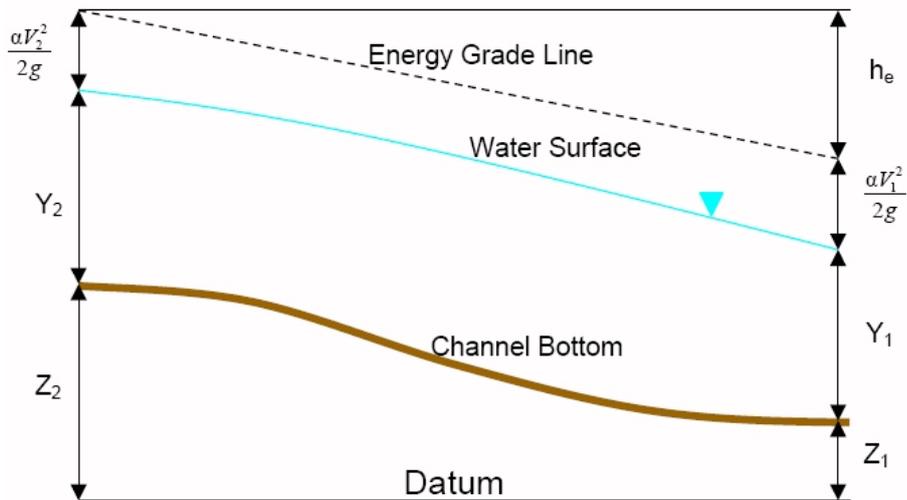


Figure IV.10: Représentation des termes de l'équation d'énergie (Chachoua 2010)

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \tag{IV.17}$$

Avec :

Q : est le débit d'eau ;

$$Q = V \times A \text{ (Equation de continuité) d'où } V = Q/A \tag{IV.18}$$

Et K : Coefficient de débit calculé comme suite :

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \tag{IV.19}$$

Avec :

K : coefficient de Strickler

n : Coefficient de rugosité de Manning,

A : Section mouillée

R : Rayon hydraulique.

Le coefficient de rugosité composé est calculé dans HEC-RAS par la relation suivant :

$$nc = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (p_i n_i^{1.5})}{p} \right]^{2/3} \tag{IV.20}$$

Avec :

nc : rugosité équivalente.

P : périmètre mouillé totale.

P_i : périmètre mouillé de la subdivision i.

n : coefficient de rugosité de la subdivision.

La ligne de charge moyenne est obtenue en reportant graphiquement V²/2g (énergie cinétique) au dessus de la ligne piézométrique.

Le terme V²/2g traduit l'énergie cinétique est obtenue dans HEC-RAS (Figure IV.11).

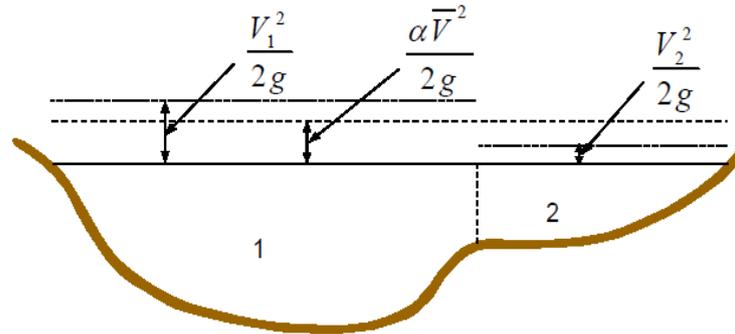


Figure IV.11: Exemple de la façon dont l'énergie moyenne obtenue (Manuel de HEC-RAS)

$$\frac{\alpha_2 \bar{V}^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \tag{IV.21}$$

$$\alpha = \frac{2g \cdot \left(Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g} \right)}{(Q_1 + Q_2) \bar{V}^2} \tag{IV.22}$$

$$\alpha = \frac{(Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2)}{(Q_1 + Q_2) \bar{V}^2} \tag{IV.23}$$

En général

$$\alpha = \frac{(Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_n V_n^2)}{(Q) \bar{V}^2} \tag{IV.24}$$

La procédure de calcul de la hauteur d'eau dans la section considérée est faite par action itérative et déroule comme suit:

1. Proposer une hauteur d'eau à la section en aval si l'écoulement est fluviale ou en amont s'il est torrentiel,
2. Sur la base de la hauteur d'eau proposée, déterminer le coefficient de débit K (IV.19) et la vitesse moyenne (IV.18),
3. Avec les valeurs obtenues du coefficient de débit et de la vitesse moyenne, calculer S_f (IV.17) et résoudre l'équation de h_c (IV.16),
4. Avec les valeurs obtenues dans les étapes 2 et 3 (la perte de charge et la vitesse moyenne), résoudre l'équation globale d'énergie (IV.15) ; c'est-à-dire, calculer la hauteur d'eau dans la deuxième section,
5. Comparer la valeur de la hauteur d'eau calculée avec celle proposée au début.
6. Répéter la procédure jusqu'à l'obtention de la précision (USACE 2010).

3.1.2 L'environnement HEC-RAS

L'environnement du logiciel HEC-RAS est présenté sous forme de projets, chaque projet contient plusieurs fichiers dont chacun, porte le nom de projet et possède son propre extension et présente son propre jeu de données, ces fichiers sont présentés comme suit (Chachoua 2010):

- **Le fichier de projet (*.prj):** c'est le fichier principale qui contient les informations descriptifs de projet et les configurations par défaut ou choisis par l'utilisateur.
- **Le fichier de géométrie (*.G--):** il comporte les informations relatives à la géométrie (schéma, sections en travers, rugosité, ouvrage...etc.).
- **Le fichier (flow) débit (*.F--):** il stocke les données de débits, il peut comporter plusieurs profils où chaque profil regroupe de conditions particulières de débit.
- **Le fichier Plan (*.P--):** chacun contient des données particulières et aide l'utilisateur à simuler plusieurs scénarios avec les mêmes données.
- **Le fichier exécution (*.R--):** il se crée automatiquement à l'exécution de chaque simulation et contient les données relatives à la simulation.
- **Le fichier (output) résultat (*.O--):** il regroupe les résultats de la simulation (USACE 2010)
- Tous les fichiers HEC-RAS prennent la numérotation de 0 à 99, leurs nom est ceux définis par l'utilisateur et ne doivent pas être modifiés.

Au premier démarrage de HEC-RAS la fenêtre de la figure IV.12 apparaît.

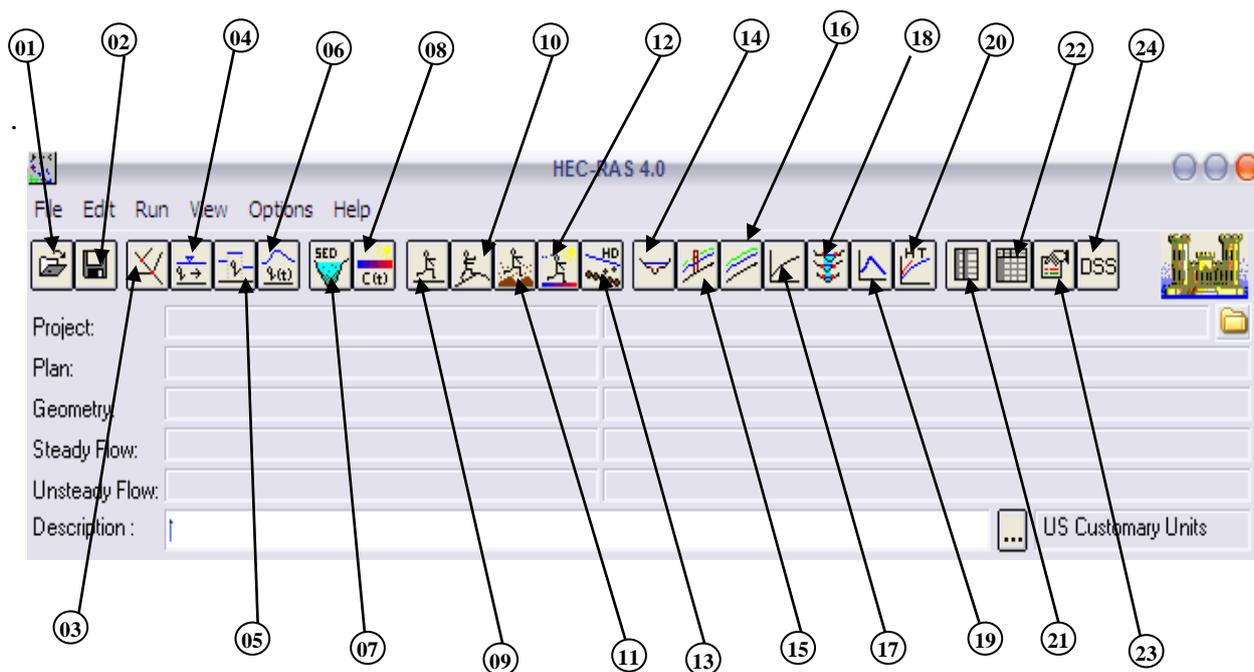


Figure IV.12: Fenêtre principale de HEC-RAS

1. ouvrir un projet existant ;
2. enregistrer un travail ;
3. fenêtre de géométrie ;
4. introduire les données régime stationnaire ;
5. introduire les données de régime quasi stationnaire ;
6. introduire les données de régime non stationnaire ;
7. introduire les données de transport solide ;
8. introduire les données de qualité d'eau ;
9. lancer la simulation du régime stationnaire ;
10. lancer la simulation du régime non stationnaire ;
11. lancer le calcul de transport solide ;
12. lancer la simulation de la qualité de l'eau
13. exécuter le calcul de la conception hydraulique ;
14. détails des sections en travers ;
15. affichage des caractéristiques de l'écoulement ;
16. affichage générale de profil ;
17. courbes d'estimation ;
18. vues 3D ;
19. hydrographe de crue ;
20. affichage de propriétés hydraulique ;

21. affichage globale des résultats détaillés ;
22. affichage globale des résultats ;
23. rapport d'erreurs ;
24. données DSS ;

3.1.3 Etapes de simulation par HEC-RAS

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

- * Création du projet HEC RAS,
- * Préparation des données topographiques (création de la géométrie de l'Oued),
- * Choix des paramètres hydrométriques et conditions aux limites,
- * Simulation hydraulique.

3.1.3.1 Création d'un nouveau projet

Choisir un nom et un titre de projet ainsi que l'emplacement des fichiers (Figure IV.13).

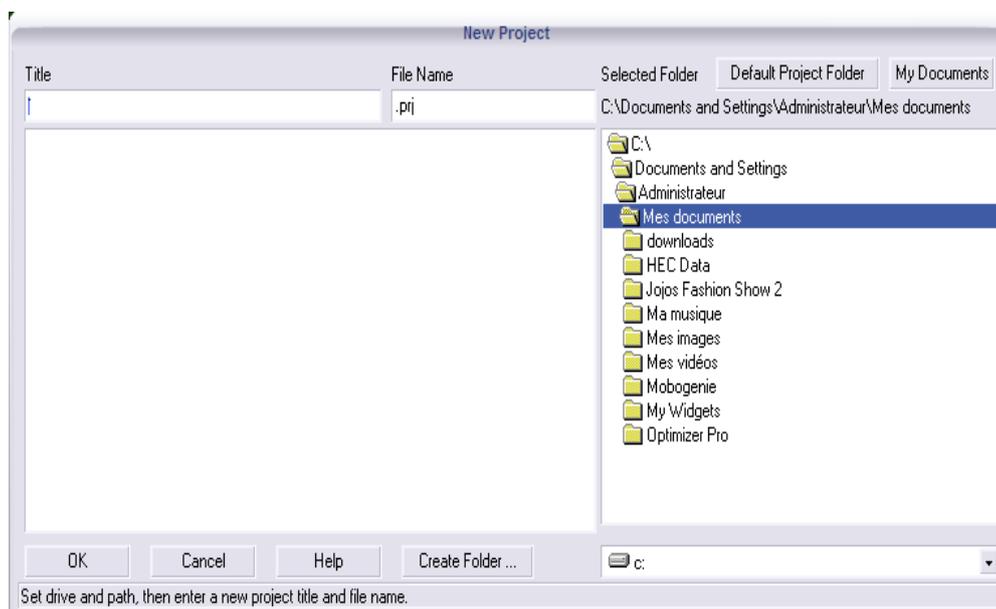


Figure IV.13: Création de nouveau projet

3.1.3.2 Création de la géométrie de cours d'eau

Dans le menu **Edit** la commande **Géométrie Data** fait apparaître la fenêtre de la Figure IV.14 sur laquelle on doit tracer le schéma du cours d'eau à étudier, avec la possibilité d'insérer une image de fond pour nous aider à tracer le tronçon de l'étude, les sections transversales sont représentées par des points avec les coordonnées (x,y) ou x est la distance par rapport à un point repère et y est l'élévation correspondante (Chachoua 2010).

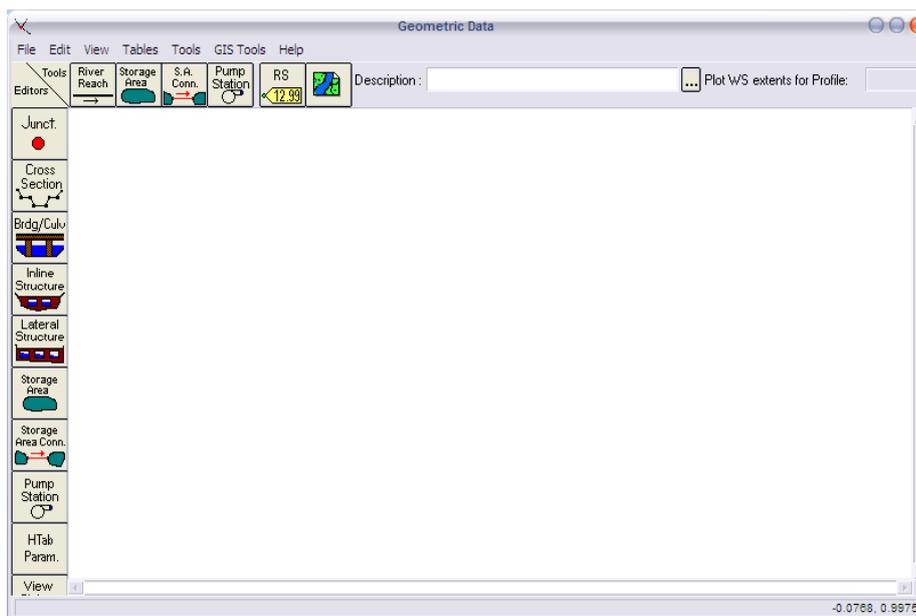


Figure IV.14: Fenêtre des données géométriques

3.1.3.3 Données hydrométriques

Selon le régime étudié, les données sont introduites à l'aide de menu **Edit\steady flow data** (pour le régime permanent) et **Edit\unsteady flow data** pour spécifier le régime non permanent. Pour un régime permanent les valeurs de débit entrée en amont sont valables pour tous les tronçons sauf le cas où un affluent important change le débit dans le tronçon, les valeurs des débits sont issues d'une analyse fréquentielle des débits. Ils sont généralement utilisés pour simuler l'impact des débits extrêmes (crues et étiages) (Chachoua 2010).

3.1.3.4 Les conditions aux limites

En cliquant sur le bouton **Reach boundary conditions**, on définit les conditions aux limites en aval si l'écoulement est fluvial (infracritique), et en amont si l'écoulement est torrentiel (supercritique).

Le HEC-RAS offre la possibilité d'entrer, comme conditions aux limites, une hauteur d'eau connue, une profondeur normale ou critique et une courbe d'estimation. Pour un régime non permanent sans apport.

Les conditions aux limites qui peuvent être utilisées dans HEC-RAS sont l'hydrogramme de crue, la courbe de tarage ou la combinaison des deux (Chachoua 2010).

3.1.3.5 Simulation

Après avoir défini la géométrie, les données hydrométriques et les conditions aux limites nécessaires aux simulations et après avoir enregistré les fichiers correspondants, on peut passer à la simulation hydraulique en utilisant le bouton **perform Unsteady flow simulation** pour le

régime non permanent, par exemple, dans le premier cas on obtient la fenêtre représenté sur la figure IV.15.

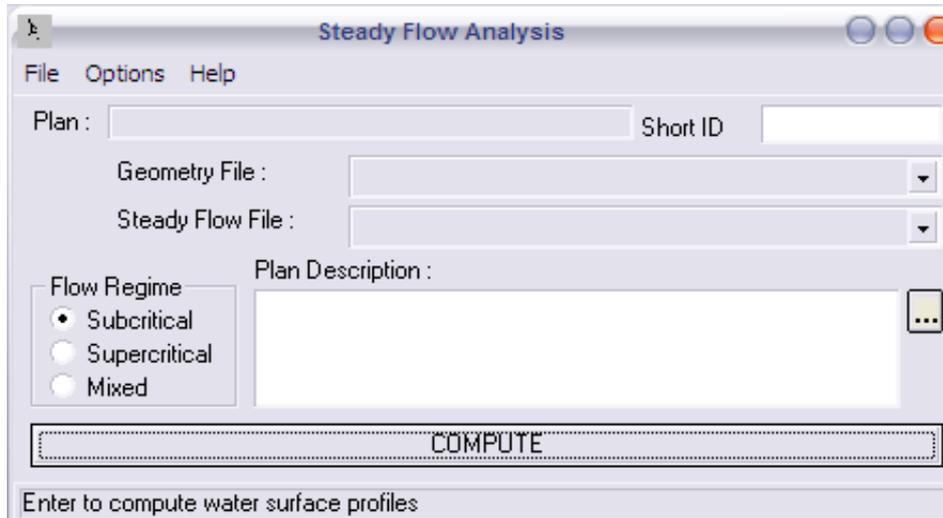


Figure IV.15: Fenêtre de simulation pour le régime permanent

Choisissez les données voulues pour la simulation (géométrie et débit) et cochez le régime adéquat. Puis cliquez sur la barre **compute** (calculez) si l’opération se déroulera normalement la simulation s’enregistrera automatiquement, dans le cas échéant vous aurez des erreurs relatives généralement aux mauvaises manipulations de format de l’heure ou la date ou un choix erroné des conditions aux limites, corrigez les erreurs et refaites le calcul.

Les résultats obtenus de la simulation sont affichés sous format graphique avec une large possibilité d’afficher le paramètre désiré ou sous forme de tableau détaillé (Figure IV.16). Les résultats peuvent être exportés vers un fichier ou un périphérique d’impression (Chachoua 2010).

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: Pine Creek Reach: Pine Creek Profile: PF 1													Reload Data
Reach	River Sta	Profile	Q Total (cfs)	Min Ch El (ft)	W.S. Elev (ft)	Crit W.S. (ft)	E.G. Elev (ft)	E.G. Slope (ft/ft)	Vel Chnl (ft/s)	Flow Area (sq ft)	Top Width (ft)	Froude # Chl	
Pine Creek	10.90	PF 1	30000.00	10.11	19.72	18.86	20.25	0.001861	7.09	6898.71	2282.99	0.48	
Pine Creek	10.71	PF 1	30000.00	8.11	18.07	16.86	18.48	0.001394	6.35	7705.07	2300.59	0.42	
Pine Creek	10.55	PF 1	30000.00	6.51	17.33	15.26	17.57	0.000743	5.01	9704.96	2343.65	0.31	
Pine Creek	10.48	PF 1	30000.00	5.75	17.09	14.50	17.27	0.000534	4.43	10912.73	2369.27	0.27	
Pine Creek	10.37	PF 1	30000.00	4.47	15.23	13.04	16.14	0.002001	8.10	4190.02	2340.28	0.51	
Pine Creek	10.36	Bridge											
Pine Creek	10.35	PF 1	30000.00	4.33	14.33	12.93	15.58	0.003011	9.38	3611.20	2302.69	0.62	
Pine Creek	10.23	PF 1	30000.00	3.05	12.65	11.79	13.31	0.002154	7.62	5886.98	2188.37	0.52	
Pine Creek	10.17	PF 1	30000.00	2.44	11.98	11.20	12.57	0.002044	7.38	6540.96	2185.67	0.51	
Pine Creek	10.00	PF 1	30000.00	0.64	10.21	9.45	10.79	0.002001	7.33	6594.84	2186.84	0.50	

Total flow in cross section.

Figure IV.16: Affichage des résultats de simulation

3.1.4 Programme auxiliaires de la famille HEC

Les logiciels de modélisation de la famille HEC ont une grande connexité entre eux. Les applications les plus utilisées avec HEC-RAS sont :

- **HEC HMS** : logiciel de modélisation hydrologiques des bassins versants.
- **HEC-DSS** : une petite application qui sert à importer les données à partir du tableur Excel, ce que facilite la manipulation des longues séries de données hydrométriques.
- **HEC-GEORAS** : cette application offre la compatibilité entre HEC-RAS et les logiciels du SIG. Elle permet l'importation des sections en travers à partir d'ArcView par exemple vers HEC-RAS, ce qui élimine la manipulation manuelle, parfois fastidieuse, des sections en travers.

Il suffit de tracer les profils en travers sur ArcView et les importer dans HEC-RAS. Au même temps, elle permet l'exportation des simulations pour les afficher dans l'ArcView reconnu par ses potentialités d'affichage 2D et 3D (Chachoua 2010).

3.1.5 Contraintes d'utilisation de modèle HEC-RAS

Malgré la performance prouvée de logiciel HEC RAS et sa convivialité (Keris 2004), (Roux 2004), il présente quelques contraintes qui doivent être prises en considération.

- Le non prise en compte des échanges de masse et des échanges turbulents entre le lit mineur et le lit majeur, ces phénomènes sont responsables de pertes de charge très importantes.
- En tant que modèle 1D il s'avère moins performant quand il s'agit de grandes plaines d'inondation présentant des diffluences et de confluences multiples (caractère 2D) (Chachoua 2010).

3.2 Données topographiques requises

La simulation hydraulique des crues des rivières s'appuie sur la connaissance de la géométrie du cours d'eau. Une rivière naturelle présente une structure en lits imbriqués, chaque lit correspondant à un régime d'écoulement particulier (Vidal 2005).

Pendant les périodes de basses eaux, la rivière s'écoule dans le lit mineur (main channel). Pendant les crues, elle déborde dans son lit majeur (floodplain).

Les crues d'occurrence exceptionnelle, comme la crue de période de retour 500 ans, ont profondément marqué le paysage. On peut identifier des terrasses qui délimitent l'extension des crues de très forte ampleur (Figure IV.17).

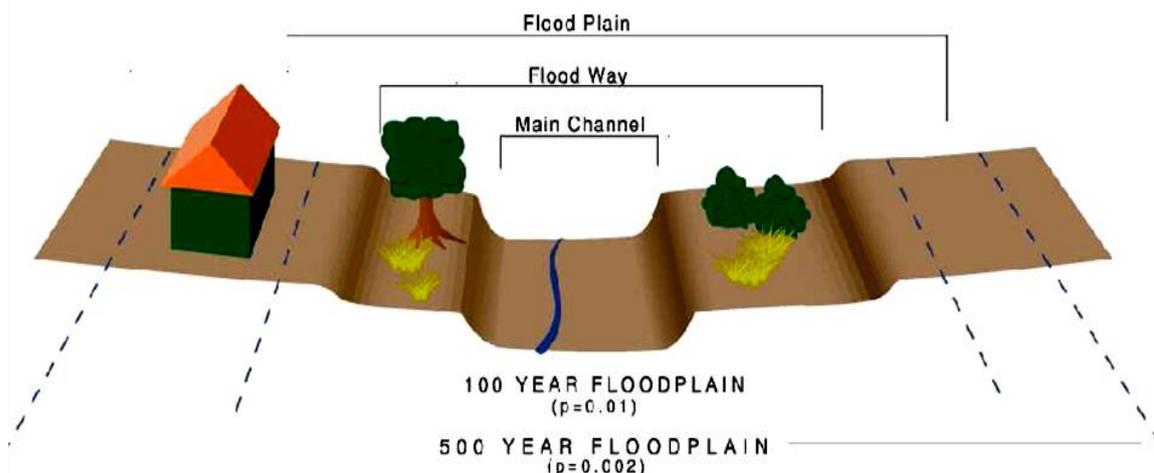


Figure IV.17: Schématisation d'une rivière naturelle (Kreis 2004)

La qualité de modélisation hydraulique dépend étroitement de la qualité des données topographiques, la précision et la résolution sont les deux facteurs qui régissent la qualité des données topographiques, plusieurs techniques d'acquisition plus au moins sophistiquées peuvent être utilisées selon l'objectif envisagé par l'étude et le budget alloué.

La résolution présente la finesse de maillage des levés sur le terrain, la précision et l'erreur absolue sur ces mesures, la qualité diffère entre le lit mineur et le lit majeur, on distingue deux types de levés, les semis de points et les profils en travers,

Lorsqu'on utilise un modèle monodimensionnel, on décrit la géométrie par un ensemble des profils en travers qui doivent être choisis judicieusement de façon qu'ils couvrent toutes les particularités de profil en long à savoir ; les contractions et les expansions de l'écoulement et les détails importants de la géométrie.

Pour une étude hydraulique à grand échelle on doit fournir des données topographiques très étendues, de résolution fine et de bonne précision.

Pour cela, il faut choisir la méthode de lever qui offre le meilleur rapport entre la qualité exigée par les buts de l'étude d'une part et le coût d'acquisition d'autre part (Chachoua 2010).

Cette étude hydraulique de crue de l'Oued Béchar s'appuie sur la combinaison de trois types de données topographiques :

Carte topographique de la région : la digitalisation des courbes de niveau et la superposition avec la carte d'occupation de sol (Figure IV 18), nous a servi à la création de la carte topographique (Figure IV.19) (Bekhira et al 2019b).

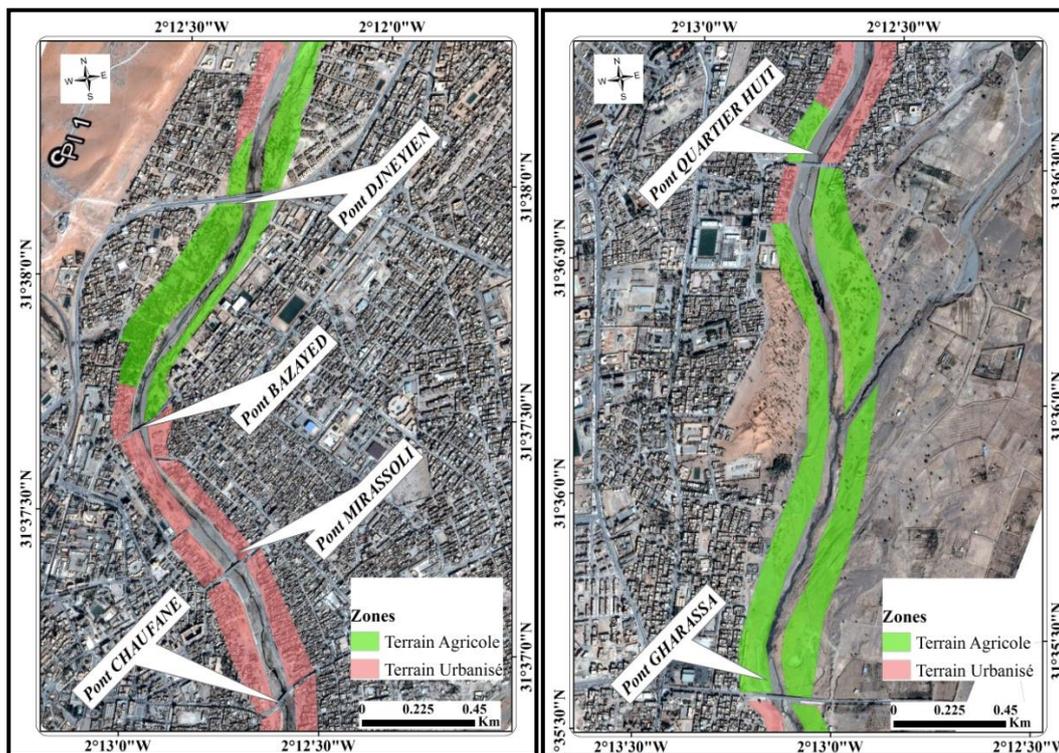


Figure IV.18: Carte d'occupation de sol de l'Oued Béchar

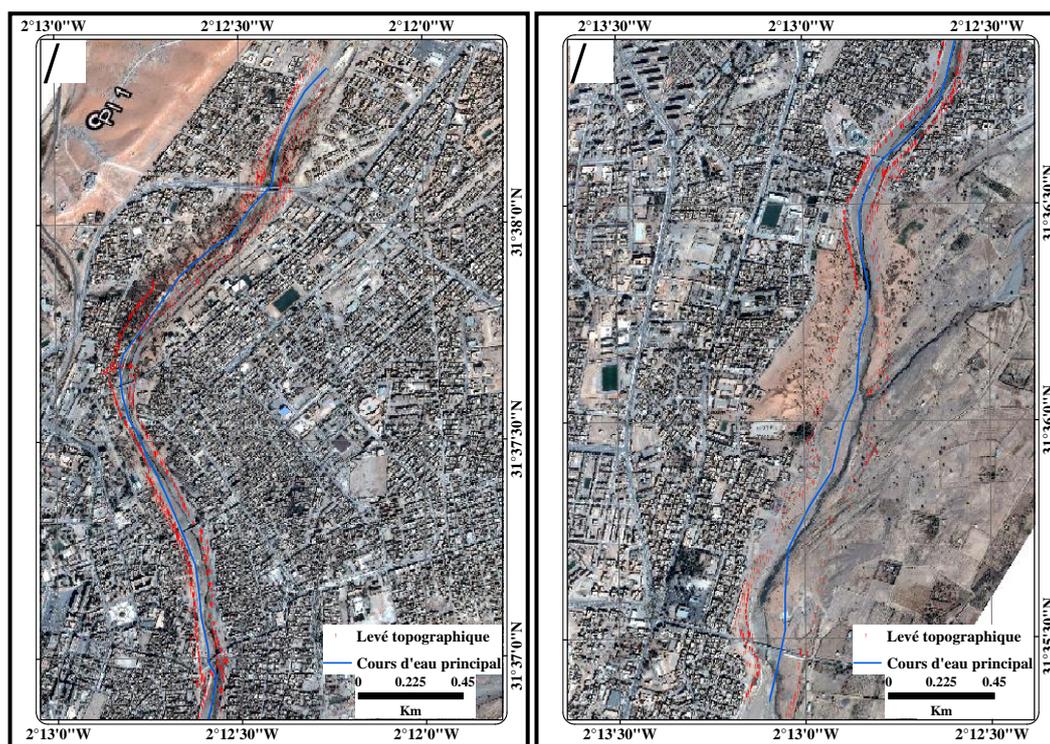


Figure IV.19: Carte de l'extension des levés topographique de l'Oued Béchar

(Bekhira et al 2019b)

Profil en long et section en travers : le lever des profils en travers est effectué par les géomètres de BET dans le cadre d'une étude hydraulique de l'Oued Béchar. Ces profils s'étendent sur une longueur de 17000m et de nombre de 174 sections en travers (Figure IV.20).

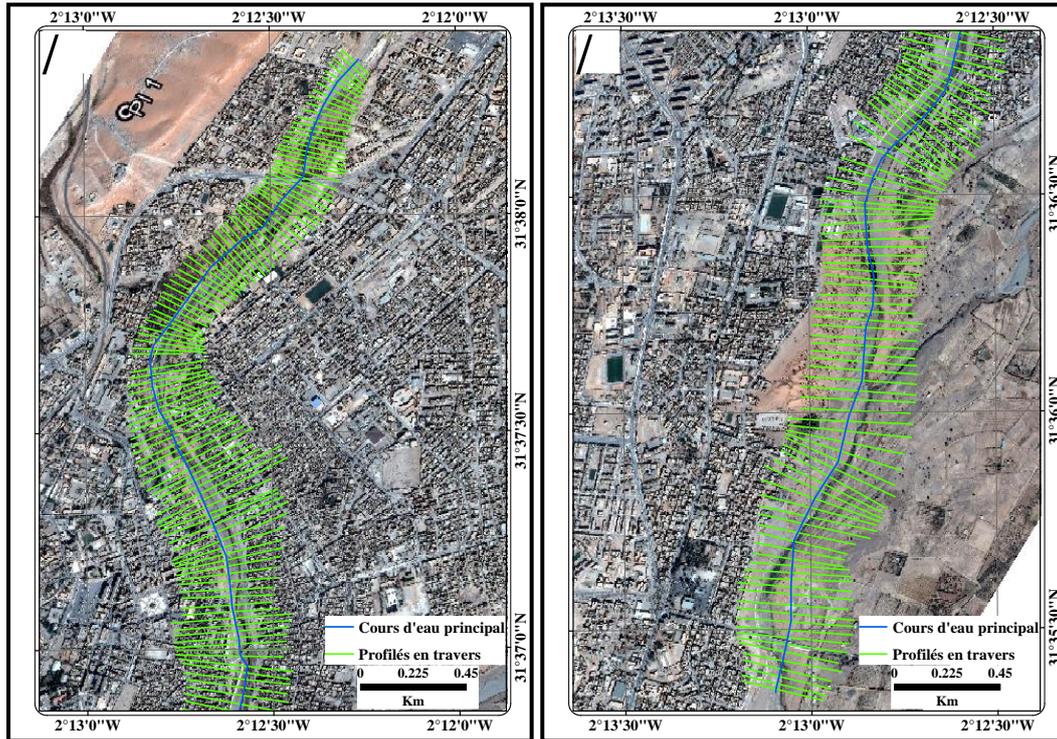


Figure IV.20: Carte de tracé des profils en travers et profil en long (Bekhira et al 2019b)

Modèle numérique de terrain : pour la modélisation numérique on utilise l'ArcGis après l'insertion de levé topographique de l'Oued Béchar (Figure IV.21) (Bekhira et al 2019b).

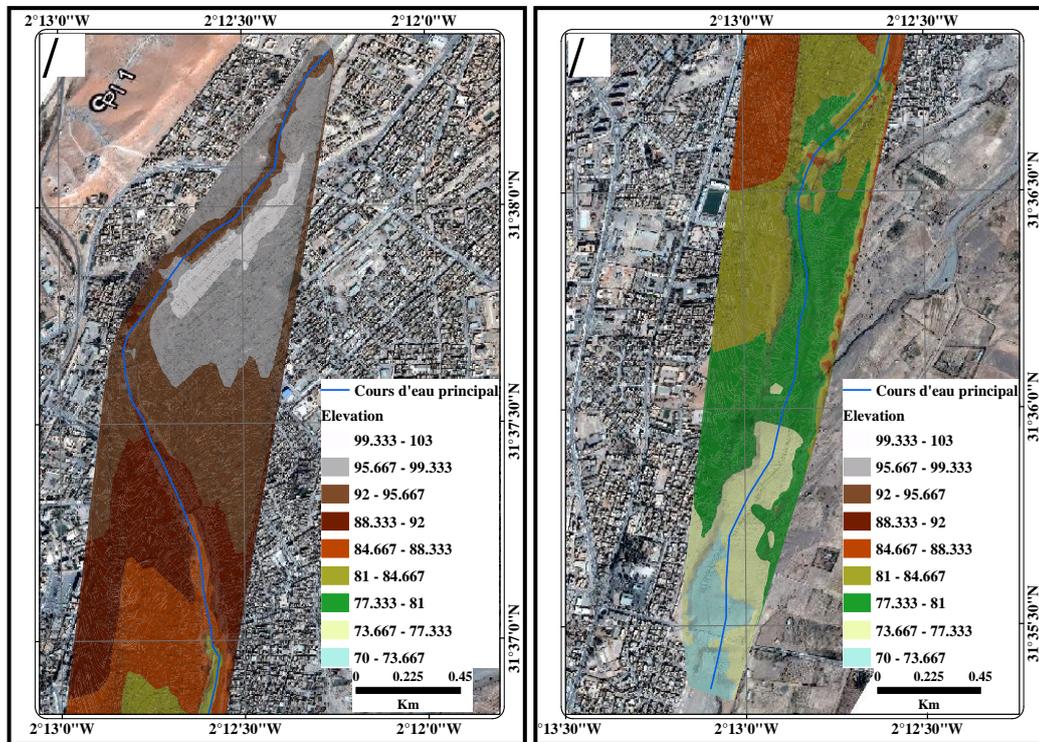


Figure IV.21: Représentation en 3D de l'Oued Béchar d'après le MNT (Bekhira et al 2019b)

3.3 Modélisation de l'Alea

Après avoir introduit la géométrie du cours d'eau, nous pouvons envisager la simulation hydraulique en régime graduellement varié avec trois évènements de référence issus précédemment dans le chapitre V, de la modélisation hydrologique, qui correspondent aux périodes de retours 2, 10, 25 et 100 ans.

3.3.1 Extraction des données topographiques pour l'HEC-RAS

La qualité de modélisation hydraulique dépend étroitement de la qualité des données topographiques, la résolution et la précision sont les deux facteurs qui régissent la qualité des données topographiques ; la résolution présente la finesse de maillage des levés sur le terrain tandis que la précision correspond à l'erreur absolue sur ces mesures. Plusieurs techniques d'acquisition peuvent être utilisées selon l'objectif envisagé par l'étude et le budget alloué (Chachoua 2010).

Lorsqu'on utilise un modèle monodimensionnel pour une étude hydraulique à grande échelle, on doit fournir des données topographiques très étendues, de résolution fine et de bonne précision.

Le modèle numérique de terrain MNT TIN (Terrain Irregular Network) est le meilleur fond topographique pour les modèles hydrauliques afin de bien représenter le terrain à grande échelle. Il exige un nombre beaucoup plus petit de points qu'une grille, représente le terrain extérieur avec exactitude et peut être aisément adaptée à la complexité variable du terrain. Néanmoins, Il a une taille beaucoup plus volumineuse que le fichier raster (Chachoua 2010).

Afin de créer un MNT TIN, nous avons le besoin d'un levé topographique de l'Oued Béchar dans sa traversé de la ville de Béchar; ce levé est en principe réalisé dans l'intérêt du maître d'ouvrage représenté dans ce cas par la Direction d'Hydraulique de la Wilaya de Béchar.

Néanmoins, on n'a pas pu avoir cette donnée ni auprès de la DHW de Béchar ni près de bureau d'étude URBAT responsable des études hydrauliques dans la wilaya.

Devant cette situation, nous avons contacté un bureau d'étude pour l'achat de ce levé topographique.

Une fois le MNT TIN est créé, on peut facilement former la géométrie pour l'HEC RAS.

C'est à partir de ce modèle (MNT TIN crée dans l'AutoCAD) que sont extraits les profils en travers.

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

* Les profils doivent être perpendiculaires à la direction de l'écoulement des eaux (ainsi les directions de flux dans le lit majeur ne sont pas toujours bien connues) ;

- * Ils ne doivent pas se croiser, recouper toute la plaine d'inondation et décrire le profil en long du cours d'eau (cela n'est pas toujours facile à réaliser dans le cas d'un cours méandrique avec une large plaine d'inondation) ;
- * Ils doivent encadrer les ouvrages structurants du cours d'eau (ponts, seuils...);
- * Ils doivent prendre en compte les modifications géomorphologiques des lits mineur et majeur tel que un élargissement, un méandre ou une contraction (en conséquence des problèmes se font lorsque les méandres sont très resserrés, il devient compliqué de tracer des profils sans que les tracés se recourent).

L'extraction des coordonnées des profils en travers (x,y) réalisée par l'AutoCAD a été faite manuellement selon l'impression des planches de ces profils en travers.

Ces coordonnées sont saisies sous format Excel afin de nous faciliter l'insertion de ces derniers sous HEC-RAS. Le même principe a été adopté sur les profils des sept (07) ponts installés sur le long de l'Oued Béchar.

La rugosité est prise homogène sur le soubassement le long du lit mineur de l'Oued Béchar la valeur de $n = 0.040$ qui correspond à un lit avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds propres, et il est variable sur les rives gauche et droite localisées entre 0.035 et 0.055 selon la nature de sol sur le long de l'Oued Béchar, et est égale 0.012 dans les parois de pont (d'après le tableau valeurs de manning) voir annexe 01.

Une fois l'insertion des coordonnées est faite, l'HEC RAS l'exporte grâce la commande **Geometric Data** et fait apparaître la fenêtre de la figure IV.22.

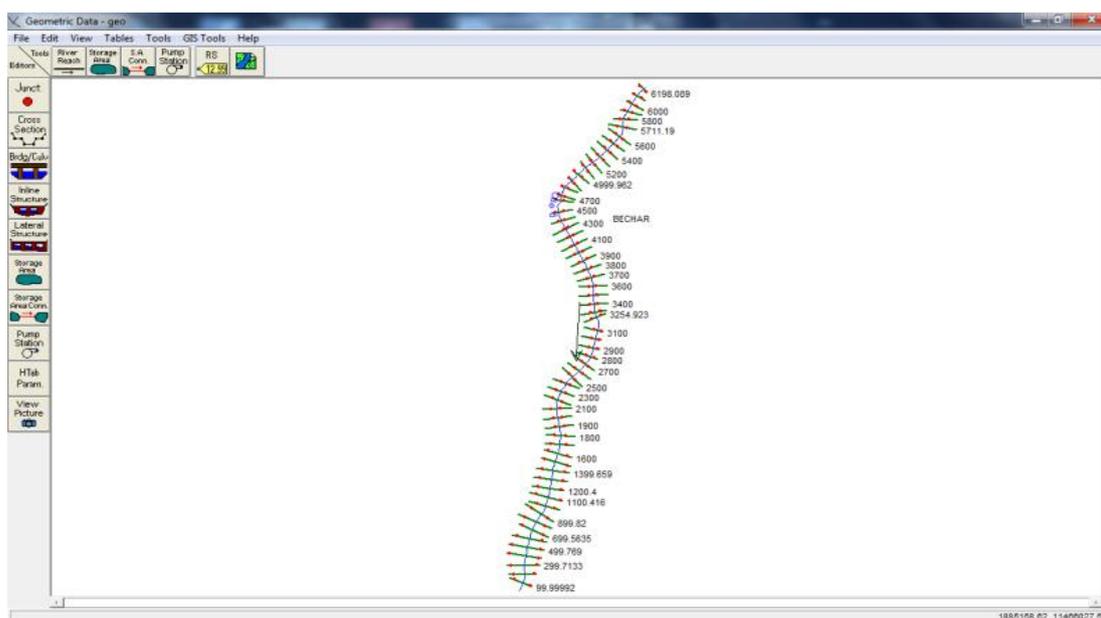


Figure IV.22: La géométrie de l'Oued Béchar dans le logiciel HEC RAS

(Bekhira et al 2019b)

3.3.2 Données hydrométriques et conditions aux limites

Après avoir introduit la géométrie du cours d'eau, l'étape suivante est de spécifier les débits utilisés pour calculer les profils d'écoulement.

Pour cela, nous avons engagé la simulation hydraulique en régime graduellement varié avec les quatre valeurs des débits qui sont obtenus par l'ajustement de la série des débits enregistrés à la station hydrométrique de l'ANRH suivant une loi Gumbel et qui correspond aux périodes de retours 2, 25, 50 et 100 ans.

De ce fait, dans la fenêtre principale, cliquez sur le bouton **Steady Flow Data** et utilisez les débits issus de l'étude hydrologique pour calculer les profils d'écoulement correspondants. Pour entrer ces valeurs de débits, indiquez d'abord **Number of Profiles**. Par la suite, dans le menu **Options**, allez à **Edit Profile Names** et indiquez les noms de profils appropriés (T2, T25, T50 et T100).

Les valeurs des débits qui sont entrées aux cases correspondantes sont représentatives de la section amont et sont considérés valides sur tout le tronçon de la rivière, la figure IV.23 montre l'édition de ces données.

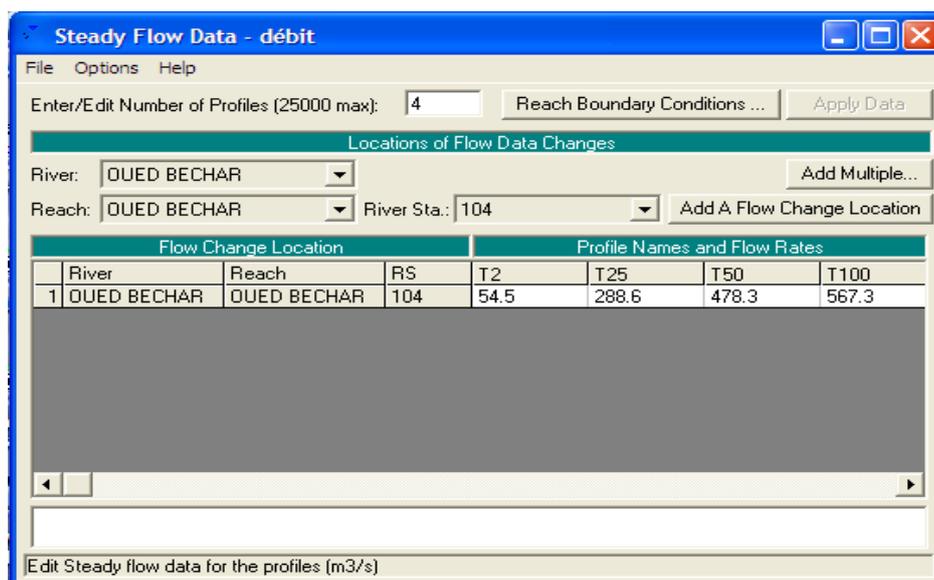


Figure IV.23: Fenêtres des données hydrométriques

En cliquant sur le bouton **Reach boundary conditions** et on définit les conditions aux limites en aval si l'écoulement est fluvial (infracritique), et en amont si l'écoulement est torrentiel (supercritique).

Le HEC-RAS offre la possibilité de faire entrer comme conditions aux limites, une hauteur d'eau connue, une profondeur critique, une pente normale du point en amont ou en aval selon le régime d'écoulement ou une courbe d'estimation (différentes hauteurs d'eau et les débits correspondants). Pour notre cas, nous avons introduit la valeur de 0.004 m/m comme une pente

normale évaluée à la tête de la ville de Béchar et obtenue auprès la DHW de Béchar. La figure IV.24 indique ces conditions aux limites.

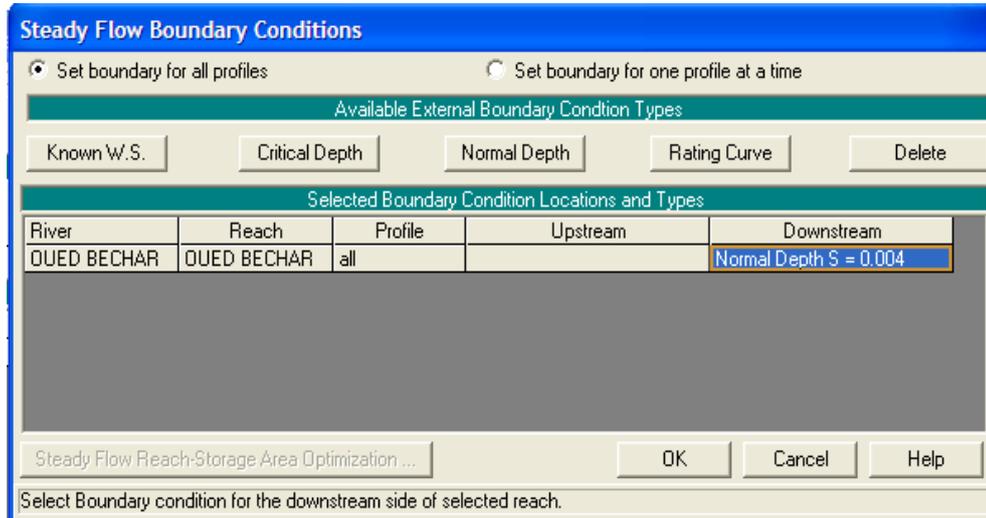


Figure IV.24: Fenêtres des conditions aux limites

3.3.3 Simulation hydraulique

Après avoir défini la géométrie, les données hydrométriques et les conditions aux limites nécessaires à la simulation et après avoir enregistré les fichiers correspondants, on peut passer à la simulation hydraulique en utilisant le bouton **Perform a steady flow simulation** pour le régime permanent, ou le bouton **Perform Unsteady flow simulation** pour le régime non permanent. Dans notre cas on obtient la fenêtre suivante (Figure IV.25):

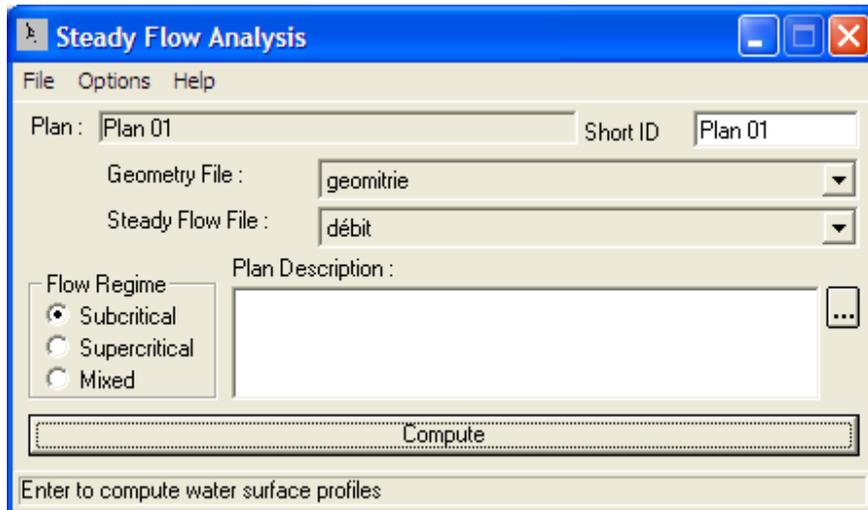


Figure IV.25: Fenêtres de simulation pour le régime permanent

Cocher le régime adéquat (fluviale pour notre cas). Puis cliquez sur la barre **compute** (calculez) ; si l'opération se déroulera normalement, la simulation s'enregistrera automatiquement, dans le cas échéant vous aurez des erreurs relatives généralement aux mauvaises manipulations ou un choix erroné des conditions aux limites, corrigez ces erreurs et refaites le calcul. Les résultats obtenus sont affichés sous forme texte ou sous forme de tableau détaillé, ils peuvent être exportés vers un fichier ou un périphérique d'impression (Chachoua 2010).

La figure IV.26 affiche les résultats de simulation sous forme d'un texte.

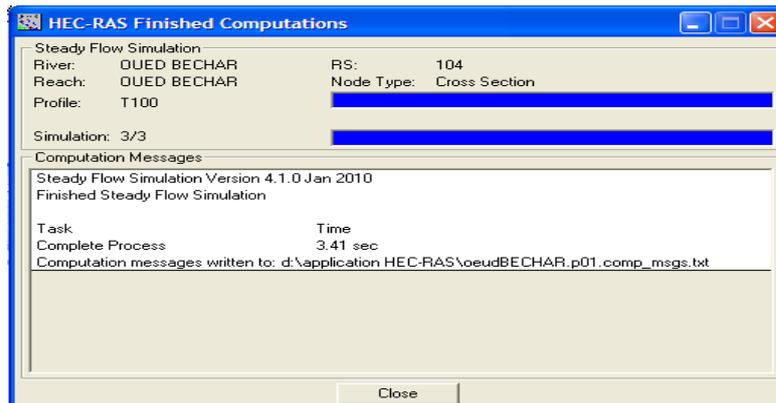


Figure IV.26: Affichage des résultats de simulation sous forme d'un tableau détaillé

Tandis que la figure IV.27 présente ces résultats sous la forme suivante :

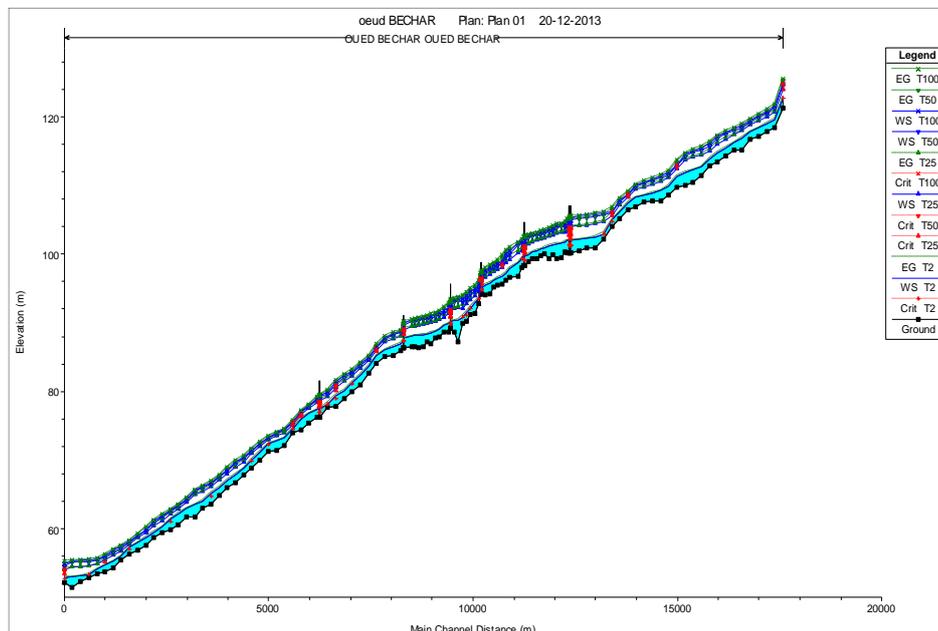


Figure IV.27: Affichage des résultats de simulation sous forme graphique

Une vue 3D de ces résultats de simulation est représentée dans la figure IV.28.

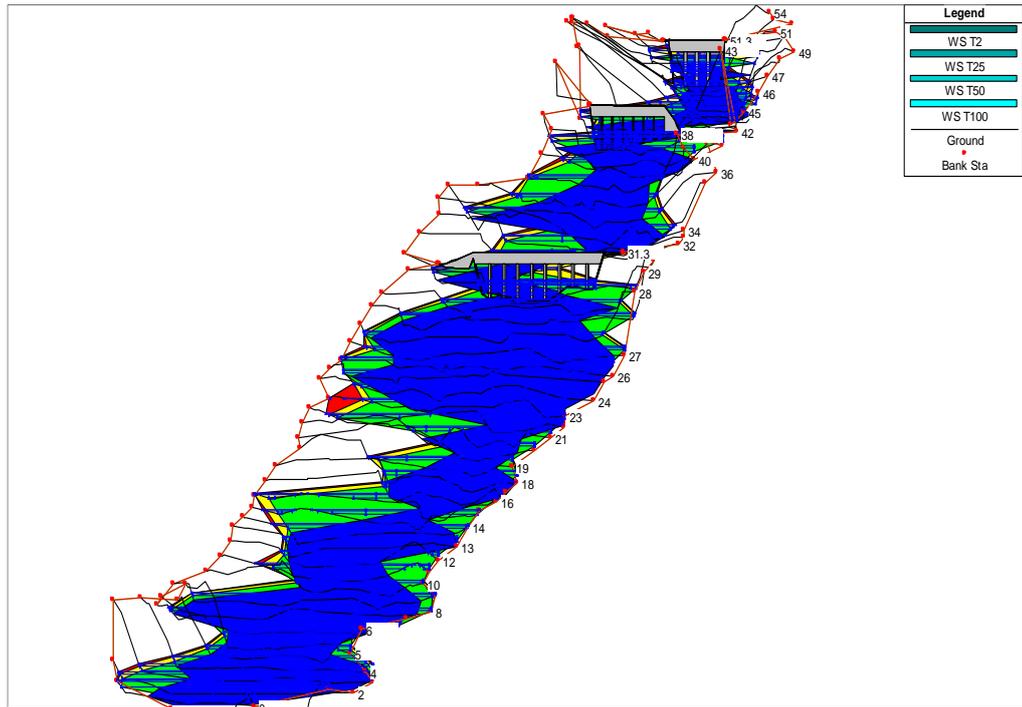


Figure IV.28: Vue en 3D des résultats de simulation (Bekhira et al 2019b)

Donc on peut faire apparaître les sections introduites dans l’HEC-RAS, pour consultation on clic sur le bouton Cross Section on obtient la figure IV.29.

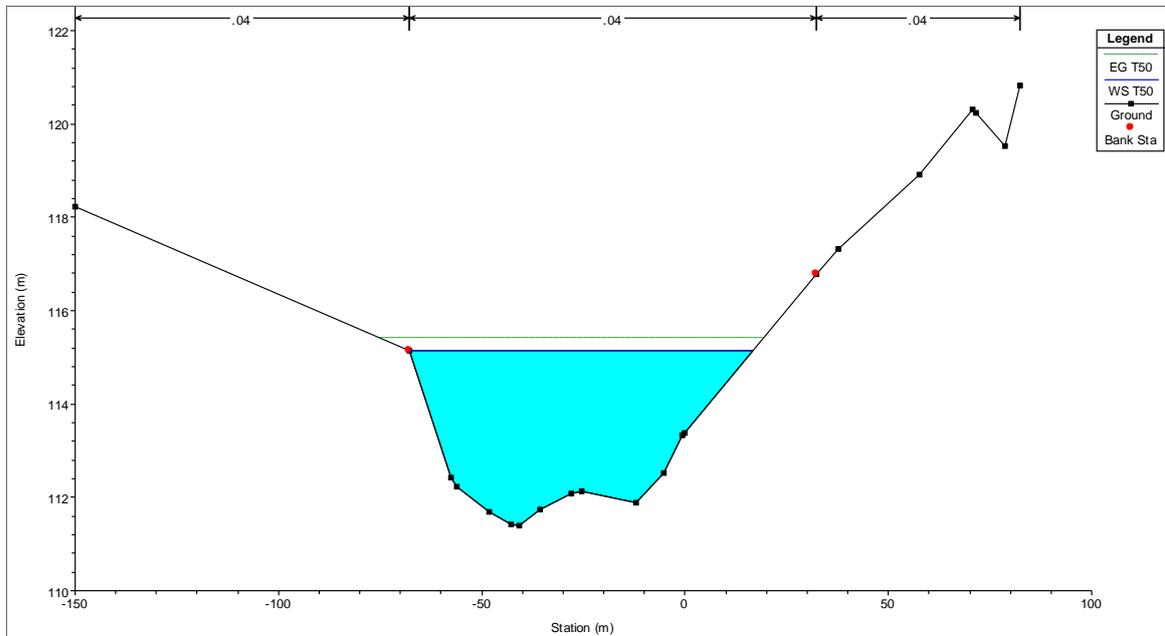


Figure IV.29: Profil en travers (N°94) de l’Oued Béchar après simulation

Les mêmes étapes utilisées pour les profils des ponts. Une fois on clic sur le bouton Bridge/Culvert la figure IV.30 apparaîtra.

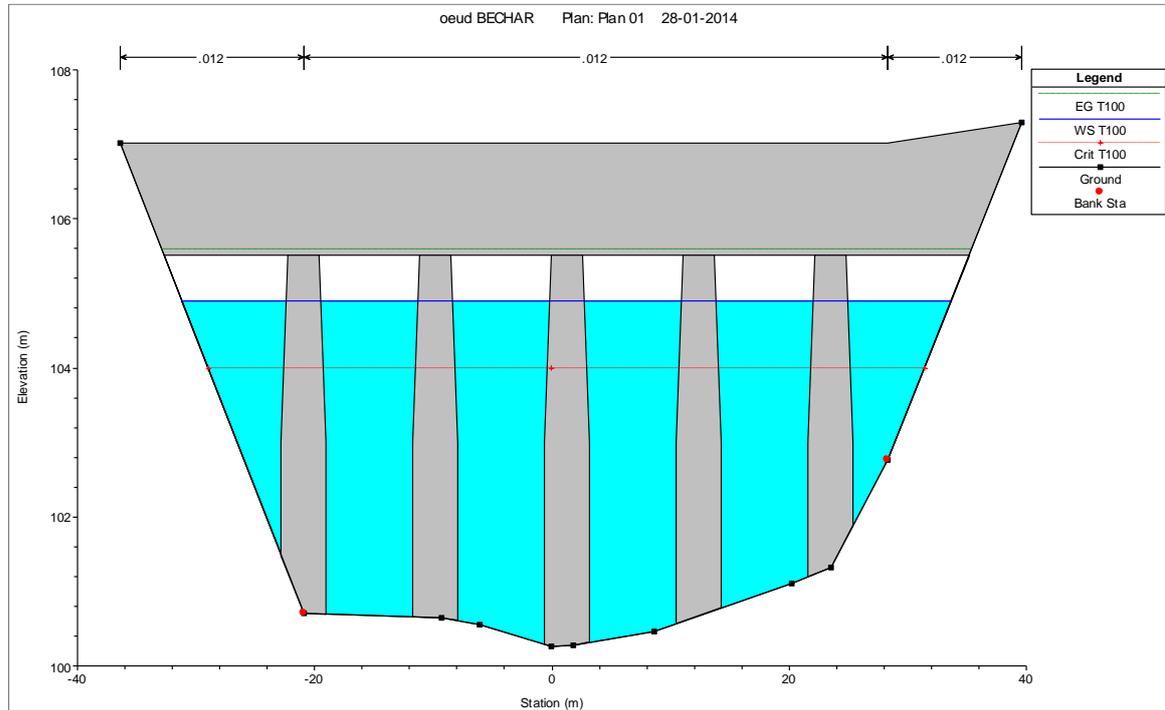


Figure IV.30: Profil en travers (N°78) du pont de Djeien après simulation

3.3.3.1. La simulation numérique des crues de l'Oued Béchar

Nous pouvons envisager la simulation hydraulique en régime graduellement varié avec trois évènements de référence issus précédemment de la modélisation hydrologique, qui correspondent aux périodes de retours, 25 ans ($Q_{25}=388.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{eau}}=3.5 \text{ m}$, $b=200\text{m}$, $S_{\text{tache}}=55.35\text{ha}$), 50ans ($Q_{50}=478.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{eau}}=5 \text{ m}$, $b=200\text{m}$, $S_{\text{tache}}=66.48\text{ha}$) et 100ans ($Q_{100}=567.3$, $h_{\text{eau}}=7 \text{ m}$, $b=200\text{m}$, $S_{\text{tache}}=133\text{ha}$), dans le même régime climatique Hafnaoui et al [2013] trouvent les débits des crues de 10 ans, 100 ans et 100 ans de l'ordre de $167,3 \text{ m}^3/\text{s}$; $367,4 \text{ m}^3/\text{s}$; $603,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bekhira et al 2019b).

La rugosité est prise homogène sur le soubassement le long du lit mineur de l'Oued Béchar la valeur de $n = 0.040$ qui correspond à un lit avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds propres, et il est variable sur les rives gauche et droite localisées entre 0.035 et 0.055 selon la nature du sol sur le long de l'Oued Béchar, et est égale 0.012 dans les parois de pont. Le résultat obtenu de la simulation numérique des crues de l'Oued Béchar pour les débits de différent pas de temps représenter sur la figure IV.31 (Bekhira et al 2019b).

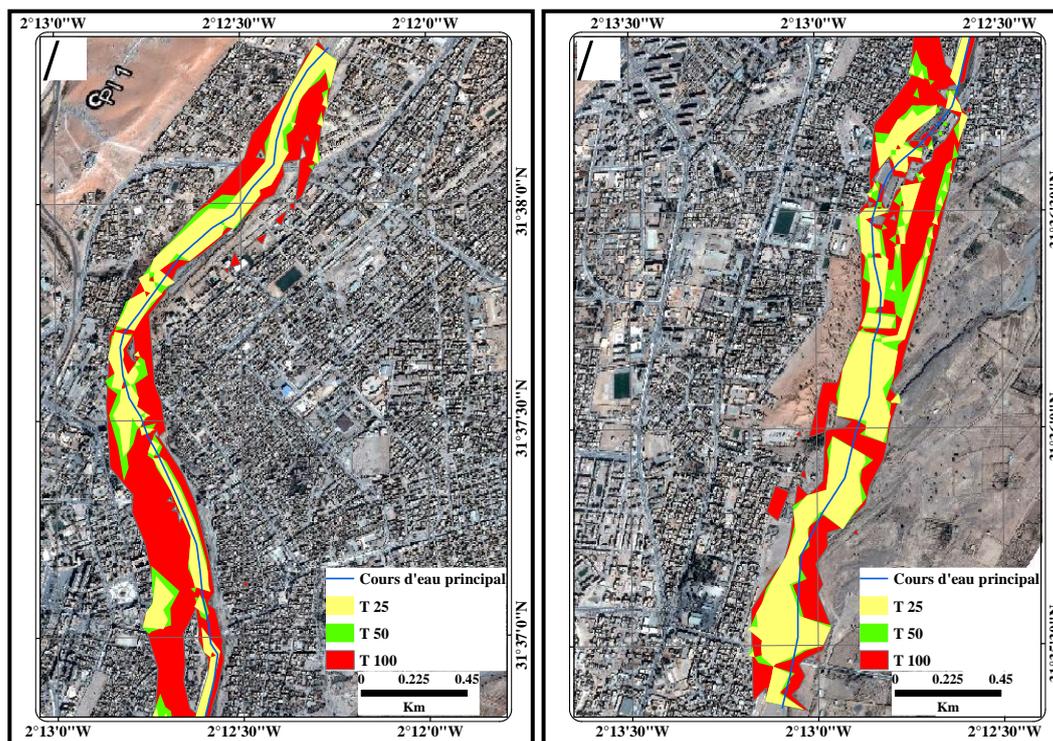


Figure IV.31: Le résultat de la simulation numérique des crues de l'Oued BECHAR (Bekhira et al 2019b)

3.3.3.2 La cartographie des les inondations

La carte réalisée (Figure IV.32) représente les hauteurs de l'inondation dans la ville de Béchar dans le cas d'une crue centennale portée par l'Oued Béchar, où nous avons la hauteur maximale est égale à 7.66 m et la tache d'inondation représente 133 ha de surface, dans le même climat dans un autre bassin versant Yamana et al [2016] trouve la hauteur d'eau égale 5 m, et 0.0368.75 ha de surface de tache d'inondation..

A partir de cette carte on remarque que l'inondation de l'Oued Béchar touche les habitats et des terres agricoles.

Figure IV.32 représente aussi une carte du risque à l'inondation qui contient des zones dont le risque varie de faible au très fort.

-Les zones à très fort risque sont représentées sur la figure IV.32 par la couleur bleu foncé se sont les régions où la hauteur des eaux atteint les 6 à 7.66 m, se sont les zones qui sont situées aux abords immédiats du lit d'Oued comme les habitats de pont BA Zayde, Hai El Nour, El Mzarif et El Guettara et qui ont subit une immersion à cause de la construction dans le lit d'Oued (voir figure. 1 dans l'introduction).

- les zones à fort risque portant la couleur bleu foncé plus clair a 40% sur la figure IV.32. Ce sont les régions proches du lit d'Oued, ces zones représentent un danger évident lors des crues où la hauteur des eaux varie entre 5 et 6 m, elles occupent principalement les régions d'engorgement

(les proche des ponts) comme celle du quartier El Safsaf, à coté du pont Ba Zaide, Debdaba Centre, le vieux Ksar et Hai Nour.

-les zones à risque modéré représentées par le bleu foncé plus clair a 60% sur la figure IV.32, où la hauteur varie du 3 à 2 m. Ces zones peuvent évoluer vers les zones à risque fort en cas de grandes pluies, elles se localisent proche du lit et sur le long de l'Oued et cela à cause de rétrécissement du lit d'Oued, soit par les berges artificielles soit par l'habitat.

-Les zones à risque faible représentées par bleu clair sur la figure IV.32, la hauteur des eaux ne dépasse pas 1 m. Ces zones correspondent à des régions loin du lit d'Oued qui sont à coté de leur affluents comme les quartiers Mkhelif, Salam, Gharassa et Béchar Djide. Ces régions peu touchées par le risque d'inondation (Bekhira et al 2019b).

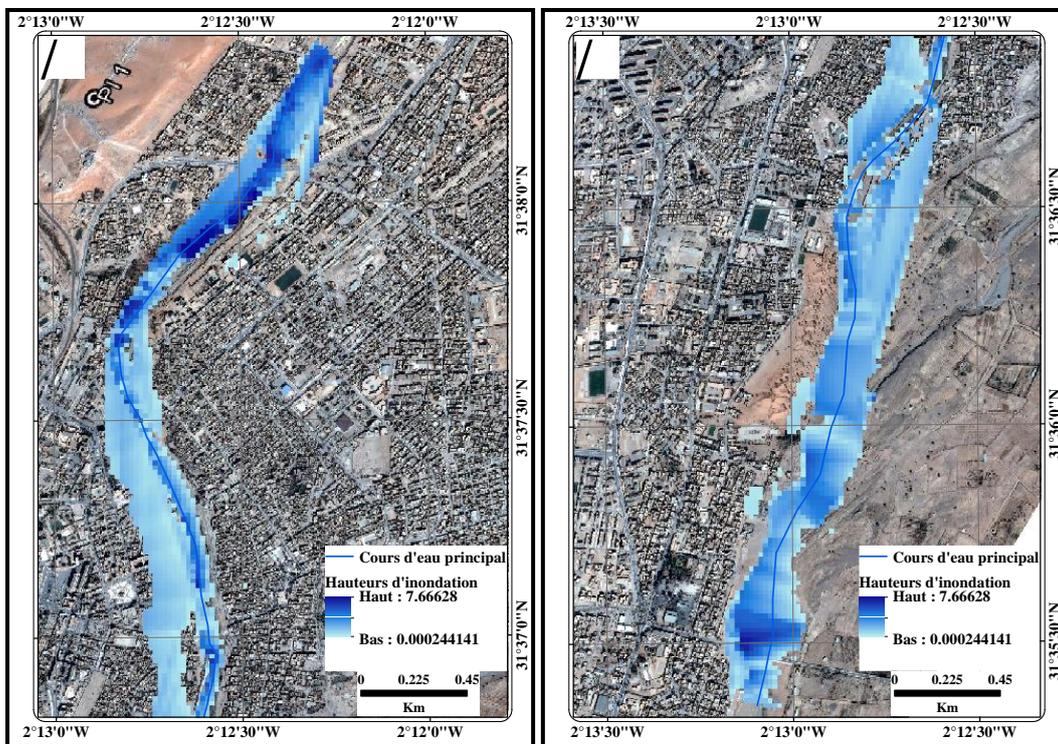


Figure IV.32: Carte de la hauteur d'inondations de l'Oued Béchar (Bekhira et al 2019b)

Après le diagnostic et l'analyse des sites prioritaires, notre travail a permis de déterminer les principales causes des inondations:

- La morphologie de bassin versant de l'Oued Béchar caractérisée par des pentes fortes ($p_{moy}=3.21m/Km$) selon Boulanouar [2007], une dégradation des sols et une perméabilité limitée favorisant la genèse des crues et l'amplification de leurs débits de pointe.
- Le rétrécissement des sections des cours d'eau par les dépôts de charriage solide et les décharges de tous genres ($530 T/Km^2/an$) selon Boulanouar [2007], qui font obstacle à l'écoulement des eaux ce qui ne favorise pas l'évacuation des crues dans des conditions hydrauliques normales et naturelles.

- L'occupation du domaine public hydraulique par des constructions anarchiques et de la concentration des activités économiques aux abords des lits des Oueds par exemple au niveau de Debdaba (la densité = 100 pers/ha) et Béchar centre (la densité = 76 pers/ha) selon Halilou [2011]
- La conception inappropriée de certains ponts et ouvrages de traversée des Oueds (réseaux d'assainissement) au niveau des quels les branchages apportés par les crues constituent un obstacle à l'écoulement normal des eaux.
- Le dimensionnement inapproprié des ouvrages de canalisation des cours d'eau à travers les centres urbains et les agglomérations (Bekhira et al 2019b).

Conclusion

Au terme de ce chapitre consacré à la modélisation hydrologique et hydraulique, on peut retenir que :

L'application de modèle GR, de deux différents pas de temps annuel et mensuel (GR1A et GR2M), nous a permis d'évaluer les paramètres de Nash et R^2 par l'utilisation comme données d'entrée les précipitations et l'évapotranspiration (ETP) calculées par la méthode de Turc et comme données de sorties les lames d'eau écoulée.

Ce travail nous a permis de répondre à nos questions, il apparait une validation que ce soit à l'échelle annuelle ou mensuelle dans les zones arides, ce qui nous a permis aussi de compléter et d'étendre nos séries des débits mensuels et annuels du bassin versant de l'Oued Béchar.

Vue la situation géographique du bassin étudié dans les zones à climat aride les précipitations sont assez faibles, ce qui donne des débits assez hétérogène dans le temps et dans l'espace (irrégularité).

Les crues sont assez rares mais aggravantes, l'analyse de la relation pluie-débit montre que la station de Bechar a une légère anomalie pour le modèle mensuelle GR2M qui due au temps de concentration, ou bien due a l'infiltration importante vu la formation géologique de la zone étudiée.

Il est probable donc que la hausse des températures dans les zones arides intensifiera le cycle hydrologique, conduisant à des écoulements à l'aval de notre bassin versant plus important.

D'après des études récentes les précipitations, le climatologue indique qu'il y a très peu d'éléments sur l'impact du changement climatique sur la durée des événements, qui est aussi un facteur d'influence sur l'écoulement (Benzater et al 2019, Elouissi et al 2017, Elouissi 2016).

D'une façon générale on note que la quantité de l'eau ruisselle sont très impotentes ainsi que la quantité de l'eau stockée dans les réservoirs sont aussi importantes.

La ville de Béchar appartient à un climat désertique aride où les précipitations sont rares, et en contrepartie a de fortes évaporations qui sont fréquentes pendant la période estivale ce qui entraîne une grande sécheresse.

L'Oued Béchar a rarement connu des crues et parfois sans risque, qui sont séparées par des longues périodes ce qui entraine la construction dans le bord de l'Oued Béchar.

Les débits calculés des crues de 25 ans, 50 ans et 100 ans sont respectivement de l'ordre de 388.6 m³/s ; 478.3 m³/s ; 567.3 m³/s dans le même régime climatique Hafnaoui et al [2013] trouve les débits des crues de 10 ans, 100 ans et 100 ans de l'ordre de 167,3 m³/s ; 367,4 m³/s ; 603,2 m³/s.

Ce chapitre nous a permis aussi de constater que les inondations sont devenues également un grand risque dans la ville de Béchar, qui doivent être traitées dans les programmes de planification, la détermination des zones à risque d'inondation va nous permettre de classer ces dernières en fonction de la hauteur des eaux de la crue, pour minimiser les dégâts des catastrophes naturelles et de réduire les impacts d'inondation dans la zone d'étude afin de protéger la ville de Béchar et les agglomérations exposées face à ce risque.

Ce travail nous a permis aussi de fournir des éléments d'aide à la décision, et d'aboutir à un schéma d'aménagement adéquat.

Des aménagements seront hautement recommander pour une gestion des risques d'inondation au niveau du cours d'eau de l'Oued Béchar et de proposer un schéma de prévention contre les inondations grâce à ce travaille.

CHAPITRE V

AMENAGEMENT DU COURS D'EAU D'OUED

BÉCHAR ET PROTECTION DE LA VILLE

CONTRE L'INONDATION

**AMENAGEMENT DU COURS D'EAU DE L'OUED BÉCHAR ET
PROTECTION DE LA VILLE CONTRE L'INONDATION****1. Introduction**

La morphologie de tous nos paysages est marquée par les cours d'eau. D'un point de vue fonctionnel, le réseau hydrographique est aussi la colonne vertébrale de notre paysage. Ces dernières décennies, les cours d'eau ont perdus beaucoup de valeur en raison de rectifications, d'aménagements artificiels et de mises sous terre.

Des eaux naturelles ou proches de l'état naturel sont des milieux essentiels et la principale structure de mise en réseau des habitats. L'Oued Béchar a été dans un moment passé, un constituant d'un espace de détente et un élément d'identité. Leur revitalisation est donc une priorité de la protection de la nature et du paysage.

Donc dans ce contexte nous avons essayé dans ce chapitre de proposer un aménagement efficace de l'Oued Béchar d'une façon pour protéger la ville de Béchar contre les inondations et d'une autre de faire réhabiliter sa valeur touristique, on premier lieu d'élaborer une carte de vulnérabilité et en deuxième lieu de faire un diagnostic général sur l'Oued et enfin de proposer un aménagement à l'aide d'un logiciel HEC-RAS.

2. Aménagement du cours d'eau

La plupart des milieux aquatiques doivent être profondément aménagés par l'homme.

De nombreux aménagements de cours d'eau doit être réalisés selon le cas de cour d'eau on cite: le dragage (approfondissement du lit), la canalisation (bétonnage des berges et parfois du fond ce), l'endiguement (augmentation de la hauteur des berges pour éviter le débordement des eaux), aussi rectification du cours (recouplement des méandres) et recalibrage (augmentation de la capacité du lit en modifiant sa profondeur et sa largeur).

Ces aménagements répondaient souvent à des objectifs légitimes : protéger des inondations les terres cultivables (cas de OUAKDA) et les habitations (cas de CENTRE VILLE), lutter contre l'érosion des berges (cas de JARDIN PUBLIQUE et autre endroit sur les berges de l'Oued Béchar), faciliter la navigation fluviale, produire de l'énergie, irriguer, alimenter en eau potable les hommes et le bétail, et, beaucoup plus récemment, créer des bases de loisirs.

Avant d'entamer un aménagement, il est indispensable de procéder à une étude fiable, afin de déterminer les zones à risque d'inondation, et puis choisir le type d'aménagement correspondant au cas déterminé. Dans ce contexte, il est obligatoire d'élaborer une carte de vulnérabilité dans le but de localiser les zones vulnérables.

2.1 Cartographie de vulnérabilité

La cartographie est définie comme l'ensemble des études et des opérations scientifiques, techniques, et artistiques, intervenant à partir des résultats d'observations directes ou de l'exploitation d'une documentation, en vue de l'élaboration, de l'établissement et de l'utilisation de cartes, plans et autres modes d'expression (Chachoua 2010).

La complexité des problèmes liés à l'abondance des données dans un cadre de cartographie du risque inondation (topographie, hydrologie, hydraulique, occupation des sols), nécessite le développement d'interfaces évoluées pour aider l'utilisateur et rendre son intervention plus efficace afin de résoudre les problèmes issus du risque inondation (Chachoua 2010).

Outre les aléas, l'élément clé de l'analyse du risque est la vulnérabilité des espaces urbains et notamment des mégapoles.

La vulnérabilité est humaine, socioéconomique, institutionnelle. Elle inclut l'existence ou l'absence de mesures de protection que certains pays prennent et d'autres non.

Elle met en question la résilience de la société face à ces " crises " d'origine naturelle.

Le fait que la population de certaines villes des pays en développement continue à accepter le risque et la catastrophe encore largement considérés comme envoyés par Dieu ou le Diable, est un facteur supplémentaire de vulnérabilité.

La vulnérabilité implique une approche systémique, indispensable mais complexe notamment quand il s'agit d'analyser la ville et plus encore la mégapole. La ville multiplie, amplifie, diversifie les facteurs de vulnérabilité, laquelle découle du fonctionnement même de la ville, de ses logiques d'organisation spatiale et des dynamiques territoriales. Les aspects économiques, sociaux et organisationnels, le patrimoine, les éléments environnementaux peuvent être des facteurs de vulnérabilité comme l'indique le tableau V. 1.

Tableau V.1: Les facteurs de vulnérabilité

Quelques facteurs qui font de la ville un espace vulnérable
La densité de population, l'extension du bâti
Les facteurs techniques : - mauvaise qualité de la construction, mauvaise maîtrise de l'eau, - sous-dimensionnement des ouvrages d'évacuation et de traitement des eaux usées...
Les éléments sociaux-économiques : - ils définissent au moins pour partie les modes d'occupation des sols, la ségrégation sociale, la fragmentation spatiale.

<p>L'acceptation du danger :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le danger est parfois accepté contre un logement ou un emploi ; la pauvreté comme facteur de vulnérabilité.
<p>Les facteurs psychologiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> - ignorance du danger, absence de conscience du risque (risque banalisé, intégré au quotidien) ; - aspects religieux d'acceptation.
<p>Les facteurs politiques et ceux liés à l'histoire des sociétés : les facteurs institutionnels et politico-administratifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - absence de programme de prévention ; - législation laxiste ; - absence de réflexion sur les programmes de planification urbaine ; - absence d'une culture du risque au sein du groupe social ; - découpages administratifs : les territoires des risques, la multitude des acteurs, la dilution des responsabilités.
<p>Les facteurs structurels :</p> <ul style="list-style-type: none"> - localisation et moment précis de l'impact ; - dysfonctionnements fonctionnels et techniques imprévisibles.
<p>Les facteurs fonctionnels :</p> <ul style="list-style-type: none"> - mauvaise gestion des crises, mauvaise organisation des aspects techniques et humains ; - absence de système d'alerte, absence d'une prévision efficace.

2.1.1 Notions

L'inondation ne constitue pas un risque à elle seule. C'est l'implantation d'activités humaines vulnérables en zone inondable qui crée le risque. Le diagnostic du risque d'inondation consiste à confronter l'aléa et la vulnérabilité de l'occupation du sol (Chachoua 2010).

Chaque objet dans la zone inondée a une vulnérabilité à une fréquence déterminée de crue.

La vulnérabilité aux crues peut être décrite de manière simplifiée en considérant que toute construction ou toute infrastructure est sensible aux inondations (Chachoua 2010).

Cette approche peut sembler approximative, mais dans les faits, peu de constructions sont conçues pour supporter des hauteurs d'eau de plus d'une vingtaine de centimètres. La question est plus délicate en ce qui concerne l'agriculture. En effet, les prairies ne sont pas trop sensibles aux crues, mais les cultures sont vulnérables (Chachoua 2010).

- Vulnérabilité faible pour les prairies et les forêts
- Vulnérabilité moyenne pour les cultures
- Vulnérabilité forte pour les constructions et les infrastructures

Dans notre cas l'étude présente un risque dans un milieu urbain, la vulnérabilité est relativement forte. Cependant cette vulnérabilité peut être divisée en plusieurs niveaux selon le type, la localisation et la nature de l'usage de chaque objet.

2.1.2 Niveaux de vulnérabilité

La création de la carte de vulnérabilité se limite très souvent à une cartographie basée sur une distinction des différents modes d'occupation du sol en fonction de leur plus ou moins grande tolérance aux inondations. Deux grands types de recensement des enjeux peuvent être identifiés : l'approche zonale et l'approche par entité des biens (Chachoua 2010).

La première consiste à cartographier le territoire inondable selon une typologie d'occupation des sols puis à attribuer à chaque zone homogène une densité moyenne des biens. La seconde approche, moins répandue, consiste à recenser chaque enjeu. Elle est plutôt bien adaptée pour les zones faiblement urbanisées et pour les petits territoires.

La typologie la plus courante est la suivante :

- * L'habitat (ou biens des particuliers, intégrant l'immobilier et le mobilier) ;
- * Les activités (ou enjeux économiques) (entreprises commerciales, artisanales, industrielles ; l'enjeu concerne alors le bâtiment, l'outil de production ou le matériel, les stocks, l'activité en terme de chiffre d'affaire, ou bénéfice) ;
- * Les enjeux agricoles (terrains et sièges d'exploitation) ;
- * Les infrastructures (établissements et réseaux d'équipement publics) ;
- * Les enjeux humains.

Les constructions et les infrastructures de transport sont pour la plupart très sensibles à l'inondation, on cite le dégât du crue de 2008 sur la wilaya de Béchar pendant l'interruption des routes à cause de l'effondrement des ponts au niveau de la route nationale RN°6.

On peut aussi tenir compte de facteurs correctifs, par exemple, les écoles et les hôpitaux sont plus vulnérables (Chachoua 2010).

Dans notre cas les zones inondables ce sont généralement des zones urbanisées, car l'urbanisme de la région de Béchar est étalé sur le long de l'Oued Béchar avec une extension localisée à proximité du cours d'eau principale, ainsi qu'on trouve des zones d'agriculture on note OUAKDA, MER-NIGER, et au niveau de Béchar DJEDID dans la rive gauche (Bekhira et al 2019b).

Nous avons essayé d'illustrer les niveaux de vulnérabilité à la crue centennale sur la photo aérienne de la ville de Béchar.

Puisque la longueur de l'Oued Béchar est très long, nous avons essayé d'élaborer plusieurs cartes dissociées de la surface étudiée, les cartes sont représentées sur la figure V.1.

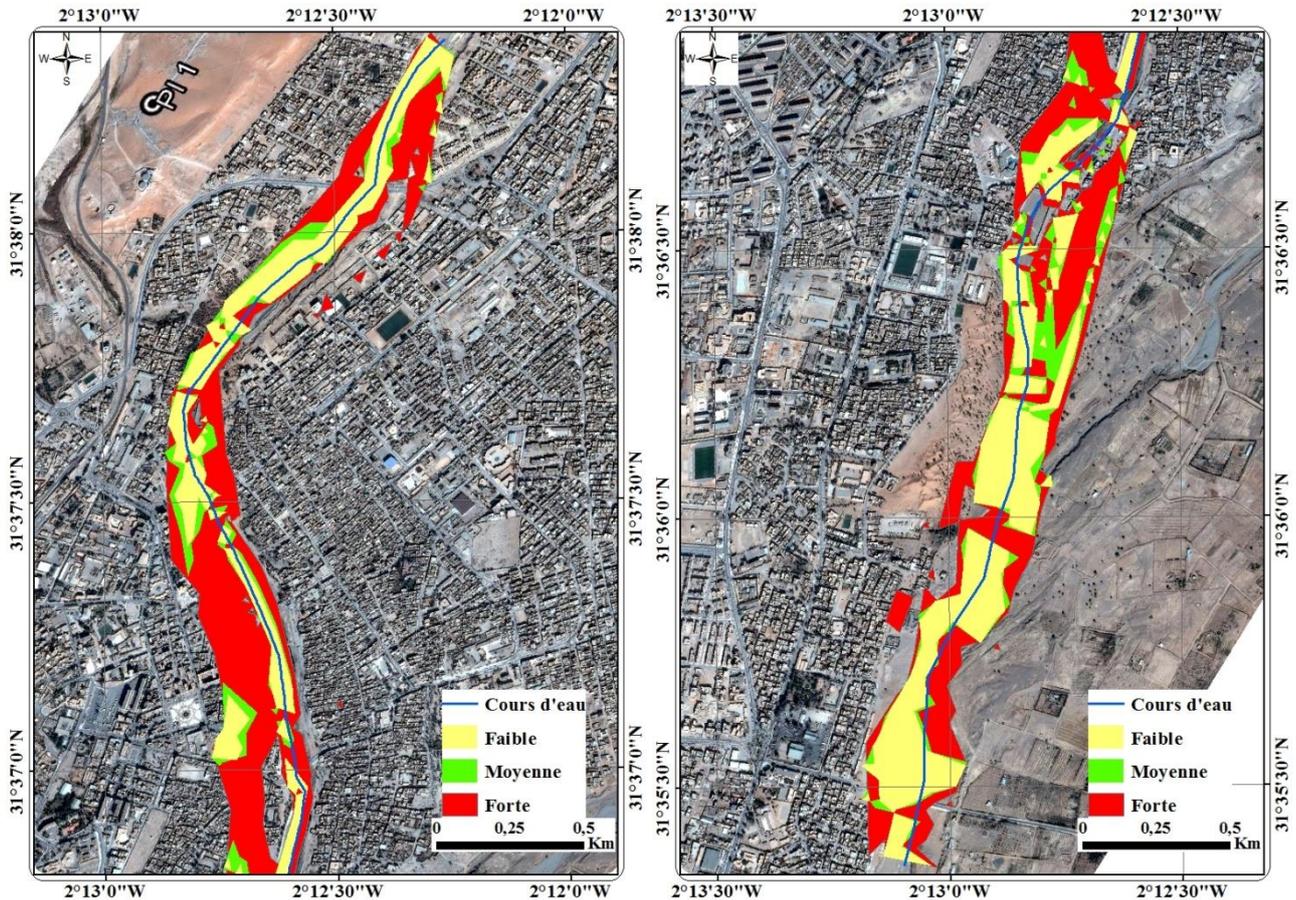


Figure V.1: Carte de vulnérabilité (Bekhira et al 2019b)

2.1.3 Analyse de risque

On distingue les approches qualitatives et des approches quantitatives. Ces dernières ont pour objectif de fournir une estimation économique des dommages potentiels.

L'approche semi-quantitative est une étape intermédiaire de l'approche quantitative.

2.1.3.1 Approche qualitative

L'approche qualitative la plus simple, et la plus utilisée, consiste à comparer point par point le niveau d'aléa et le la vulnérabilité. La grille d'analyse est obtenue en croisant deux niveaux d'aléa et deux niveaux de vulnérabilité. On peut définir deux niveaux de risque : faible et fort (Tableau V.2) (Chachoua 2010).

Tableau V.2: Grille simple d'analyse du risque

	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité forte
Aléa faible	Risque faible	Risque faible
Aléa fort	Risque faible	Risque forte

Cette approche peut être suffisante pour proposer aux acteurs une vision synthétique de la situation dans laquelle se trouve leur territoire. Il reste cependant à définir ce qu'on entend par aléa fort et vulnérabilité forte. C'est principalement sur ce point que porterons les discussions.

2.1.3.2 Approche quantitative

D'un point de vue économique, la détermination de l'objectif de protection devrait passer par une analyse coût / bénéfice de la protection contre les inondations.

Ainsi, certaines études visent à déterminer le coût moyen annuel des inondations pour un tronçon de cours d'eau. Le calcul du coût moyen annuel peut être réalisé à partir du coût de l'inondation C par la formule suivante (F est la fréquence) (Torterotot 1994):

$$CMA = \int_0^1 C(F) dF \quad (V.1)$$

Le coût potentiel des dommages dûs aux inondations est très difficile à établir car les impacts sont variés (Torterotot 1994). On distingue deux types de dommages :

* Les dommages intangibles sont ceux auxquels on ne peut pas attribuer de valeur économique. Par exemple les pertes de vies humaines, le traumatisme psychologique des victimes, la perte d'objets irremplaçables...

* Les dommages tangibles peuvent faire l'objet d'une estimation économique. On peut leur affecter une valeur monétaire : les dommages au bâti, aux véhicules, aux infrastructures...

L'approche quantitative du risque d'inondation porte sur les dommages tangibles, parmi lesquels on peut distinguer deux catégories :

* Les dommages directs qui sont liés à l'inondation du bien : dommages au bâti, aux appareils électriques, aux véhicules, aux chaussées...

* Les dommages indirects qui sont liés à l'impact de l'inondation à moyen terme : pertes d'exploitation, perte de valeur du bâti...

L'estimation de ces dommages est délicate, car elle dépend de nombreux facteurs comme la hauteur d'eau de l'inondation, la durée de la crue... Pour calculer le coût occasionné par chaque

inondation de référence, on peut utiliser des courbes d'endommagement. Il en existe un grand nombre dans la littérature (synthèse bibliographique de Torterotot [1994]).

Quelle que soit la méthode choisie, l'estimation quantitative du risque d'inondation est soumise à des incertitudes très importantes.

En général, l'estimation des dommages ne tient compte que des dommages tangibles directs au bâti. Ceux-ci peuvent représenter moins de 50 % du coût total des inondations (Bceom 2000).

Le coût moyen annuel doit être considéré comme une indication grossière de la charge financière que les inondations font peser sur la société.

2.1.3.3 Approche semi-quantitative

Lorsqu'on cherche à estimer quantitativement les dommages dus aux inondations, on est amené à recenser les biens exposés aux crues.

Cette première étape de l'approche quantitative est intéressante, car elle comporte moins d'incertitudes que le calcul du coût des dommages. On s'intéresse simplement au nombre de foyers touchés ou à la superficie de zones industrielles et commerciales inondées.

Les différentes méthodes d'évaluation du risque d'inondation ont toutes leur raison d'être.

Elles apportent une aide à la décision pour la mise en œuvre de mesures permettant de diminuer le risque. La mise au point d'une grille d'analyse du risque est incontournable pour proposer un diagnostic intégré et concerté du risque (Chachoua 2010)..

3. La protection contre les inondations

Selon le Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement, la démarche à utiliser dans la lutte contre les inondations se base sur trois principales démarches :

- Planifier pour Prévenir ;
- Veiller pour Prévoir ;
- Aménager pour Protéger.

3.1 Différents types de protection

Ne pouvant empêcher les inondations de se produire, il est cependant possible d'en atténuer les effets ou d'en diminuer la fréquence en priorité au niveau des zones les plus sensibles et les plus exposées.

Ces protections peuvent être réparties en deux groupes : directes et indirectes.

3.1.1 La protection directe

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

– Le 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 le débit.

– Le 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.

– Le renforcement des ouvrages de franchissements des Oueds et modification de leurs caractéristiques et des systèmes existants en cas de leur insuffisance (ponts, dalots, buses...).

– La réalisation de canaux permettant de régénérer le couloir initial de l'Oued.

Cette solution est indispensable dans le cas où le lit de l'Oued et son domaine hydraulique ont été complètement occupé par des bâtiments ou par la voirie.

– La 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.

– L'endigement 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 contre partie, 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.

3.1.2 La protection indirecte

La protection indirecte, consiste à intervenir plus loin des sites menacés c'est-à-dire, à l'extérieur du périmètre d'aménagement, en réalisant des ouvrages sur les cours d'eau responsables des inondations par :

– La création des canaux périphériques de dérivation des eaux vers les Oueds permettant de les restituer vers des zones situées en dehors des aires à protéger.

Cette déviation pourrait concerner une partie ou la totalité des eaux d'un Oued vers un autre.

- La réalisation des barrages ou seuils pour stockage et laminage des crues à l'amont des zones menacées. Le volume et la capacité de laminage du barrage devront être optimisés de manière à répondre au mieux à la protection envisagée.
- L'aménagement des bassins versants contre l'érosion par des méthodes biologiques et/ou par la construction de seuils en gabions qui permettent la réduction des vitesses d'écoulement et le dépôt des sédiments en amont.

4. Proposition d'aménagement du cours d'eau de la ville de Béchar

Pour cerner ce problème dans sa globalité, nous avons mené une étude de protection de la ville de Béchar contre les inondations

Avant d'entamer notre aménagement, il est nécessaire de faire diagnostic général sur l'Oued Béchar.

L'analyse des sites prioritaires a permis de déterminer les principales causes à l'origine des inondations :

- La morphologie des bassins versants caractérisée par des pentes fortes, une dégradation des sols et une perméabilité limitée favorisant la genèse des crues et l'amplification de leurs débits de pointe;
- Le rétrécissement des sections des cours d'eau par les dépôts de charriage solide et les décharges de tous genres qui font obstacle à l'écoulement des eaux ce qui ne favorise pas l'évacuation des crues dans des conditions hydrauliques normales et naturelles ;
- L'occupation du domaine public hydraulique par des constructions anarchiques et de la concentration des activités économiques aux abords des lits des Oueds par exemple au niveau de Debdaba et Béchar centre;
- La conception inappropriée de certains ponts et ouvrages de traversée des Oueds (réseaux d'assainissement) au niveau des quels les branchages apportés par les crues constituent un obstacle à l'écoulement normal des eaux;
- Le dimensionnement inapproprié des ouvrages de canalisation des cours d'eau à travers les centres urbains et les agglomérations.

Ces aménagements sont étudiés à court et à long terme.

4.1 A court terme

Ceux-ci sont destinés à la protection de la ville de Béchar contre un débit décennal. Parmi lesquels, on peut citer :

1) L'aménagement du bassin versant amont et cela par construction des banquettes dans les zones à forte pente (voir CH II), sauvegarde du patrimoine végétal naturel, et prévoir des reboisements dans les rives de l'Oued Béchar où nous avons une extension (la zone de Ouakda et la zone de Béchar Djedid).

2) L'augmentation de la capacité de transit des eaux dans la ville de Béchar; en réalité, il ne paraît pas intéressant de récalibrer l'Oued en élargissant sa section (emprise limitée du fait de l'urbanisation importante des berges), mais plutôt d'optimiser la capacité de l'Oued en limitant les interventions aux emprises actuelles afin d'obtenir une capacité homogène sur toute la longueur du tracé.

Les interventions sont principalement :

Suppression au maximum des ouvrages limiteurs (ponts, canalisations, habitations à protéger ou démolir,...), amélioration de l'état des surfaces du lit de l'Oued pour diminuer sa rugosité et favoriser les écoulements et rectification de la pente de l'Oued.

Ainsi que le dragage (approfondissement du lit) afin d'augmenter la hauteur de l'Oued Béchar, on peut permettre aux entreprises ou aux citoyens d'utiliser le sable d'Oued pour les constructions urbaines avec un planning bien organisé, cette méthode permet d'augmenter la profondeur de l'Oued d'une façon indirecte et rentable (prise en charge par les entreprises).

3) La création d'un ouvrage de dérivation des eaux depuis l'amont de Béchar

4) la réduction de la gravité des crues torrentielles

- La prévention en matière de crues torrentielles consiste à effectuer des travaux de correction active ou passive pour réduire le transport solide en provenance du lit et du bassin versant.
- La correction active comprend l'ensemble des dispositions visant à réduire les transports solides en agissant directement sur les processus d'érosion et leur cause (exemple : reforestation).
- La correction passive consiste seulement à se protéger du phénomène en contrôlant le déroulement et les conséquences de la crue (exemple : barrage-seuil, plage de dépôt).
- Prise en compte du risque d'inondation dans l'aménagement

Le moyen le plus efficace ayant fait ses preuves dans plusieurs pays est l'instauration d'une loi réglementaire qui imposerait la prise en compte des risques dans les documents d'urbanisme.

Ainsi, les plans locaux d'urbanisme (PLU) permettent de refuser ou d'accepter sous certaines conditions un permis de construire, notamment dans des zones inondables.

Dans une même optique, l'Etat se doit de définir des zones d'interdiction et des zones de prescription, constructibles sous réserve.

Il peut imposer d'agir sur l'existant pour réduire la vulnérabilité des biens. La loi réglementaire l'installation d'ouvrages susceptibles de provoquer une gêne à l'écoulement des eaux en période d'inondation.

L'objectif de cette approche est double :

- le contrôle du développement en zone inondable jusqu'au niveau de la crue de référence,
- la préservation des champs d'expansion des crues.

5) La réduction de la vulnérabilité

Face au risque d'inondation, les spécialistes préconisent d'agir sur la réduction de la vulnérabilité des enjeux, c'est-à-dire sur la limitation des éventuels dommages : on parle de mitigation.

Celle-ci concerne les biens économiques :

Les constructions (privées et publiques), les bâtiments industriels et commerciaux, ceux nécessaires à la gestion de crise, les réseaux de communication, d'électricité, d'eau, de communication, etc.

La mitigation suppose notamment la formation des divers intervenants (architectes, ingénieurs en génie civil, entrepreneurs etc.) en matière de conception et de prise en compte des phénomènes naturels (climatiques et géologiques), ainsi que la définition de règles de construction. Leur application doit par ailleurs être garantie par un contrôle des ouvrages.

Cette action sera d'autant plus efficace quand tous les acteurs concernés, c'est-à-dire également les intermédiaires tels que les assureurs et les maîtres d'œuvre, y seront sensibilisés.

Si l'État et les communes ont des responsabilités dans ce domaine, les propriétaires, locataires ou plus simples citoyens, peuvent contribuer à se protéger efficacement et diminuer leur propre vulnérabilité.

Pour cela, il est primordial que chacun connaisse au préalable le phénomène auquel il est exposé, en s'informant sur sa description, l'accident possible et les dommages potentiels.

4.2 A long terme

La variante la plus importante qui a été adoptée et qui constitue le plus important ouvrage de protection à moyen et à long terme, est la réalisation d'un barrage écrêteur (voire CHII) à l'amont de Béchar ; il s'agit d'un barrage supposé protégeant la ville d'un débit centennal.

Enfin, l'entretien des cours d'eau (curage régulier, entretien des rives et des ouvrages, etc.) est une nécessité pour éviter l'aggravation des inondations.

Cet entretien est à la charge de l'État ou les collectivités territoriales et leurs regroupements pour les cours d'eau domaniaux et les propriétaires riverains pour les cours d'eau non domaniaux.

Dans certains cas d'incapacités financières, la société civile à travers création d'associations regroupant les propriétaires est à encourager.

5. Simulations et scénarios selon l'aménagement proposé

Le but souligne dans cette étape de faire une comparaison entre les sections (profils) de l'Oued Béchar avant et après les aménagements dans une simulation proposée par la suite, afin de choisir le bon scénario adéquat d'une façon qualitative et quantitative.

Pour mieux gérer cette simulation, il est indispensable de décomposer l'Oued Béchar en trois zones, amont du centre ville de Béchar c'est la zone 01, centre ville de Béchar c'est la zone 02 et aval du centre ville de Béchar c'est la zone 03.

- La zone 01 de la digue d'Ouakda au pont Bazaid.
- La zone 02 du pont Bazaid ou pont quartier Huit.
- La zone 03 du pont du quartier Huit au pont d'Aissaboras.

En note que les sections (profils) de comparaison notée par la suite, ils ont choisis selon l'état actuelle de l'Oued Béchar après la simulation avec un débit centennale, ainsi que on est basée sur les sections (profils) qui vu une inondation.

Pour chaque zone nous avons trois profils de comparaison (Bekhira et al 2019a):

- La zone 01 porter les profils (103, 98, 79).

Profile 103 : près de la digue d'Ouakda.

Profile 98 : centre d'Ouakda.

Profile 79 : en amont du pont de Djneyien.

- La zone 02 porter les profils (69, 45, 42).

Profile 6 : au niveau de jardin publique.

Profile 45 : au niveau de vieux Ksar.

Profile 42 : au niveau de quartier huit.

- La zone 03 porter les profils (25, 20, 04).

Profile 25 : en amont du pont de Gharassa.

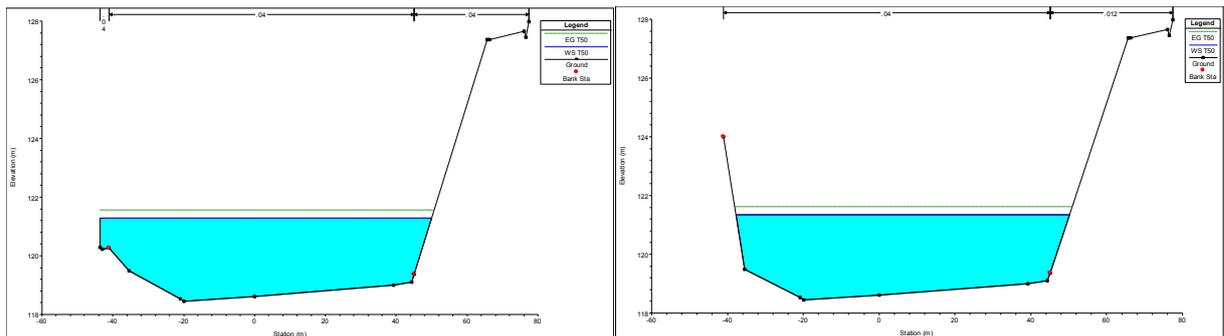
Profile 20 : au niveau de Béchar Eldjdide.

Profile 04 : en amont du pont de d'Aissaboras.

5.1 Simulation N°01 (aménagement en génie civil)

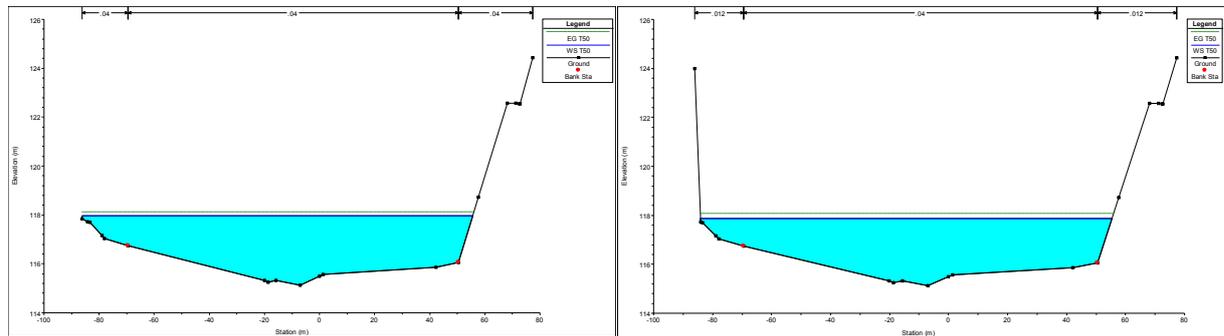
5.1.1 Scénario d'aménagement

Dans ce cas nous avons fait un aménagement en génie civil en béton cyclopien avec revêtement en ciment lisse ($n = 0.012$) sur les berges de l'Oued Béchar en amont (zone 01) et en aval (zone 03) de centre ville, en gardant les aménagements existant au centre ville de Béchar (zone 03), les résultats obtenus d'après ces aménagements sont représentée sur la figure V.2.



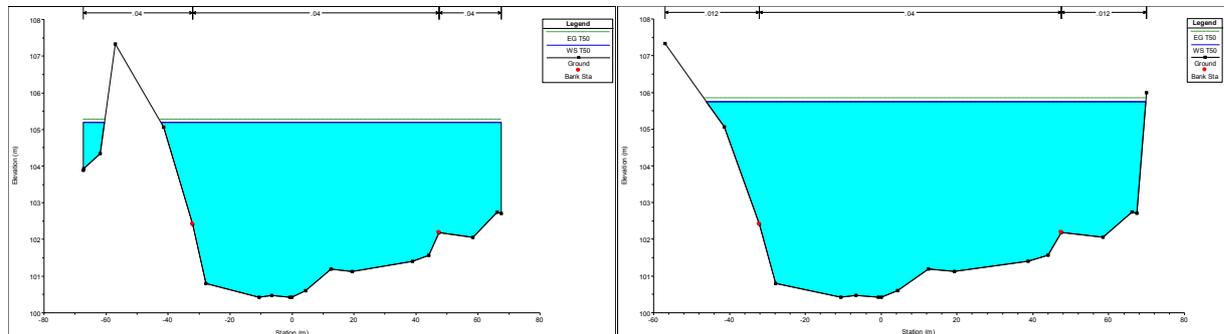
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

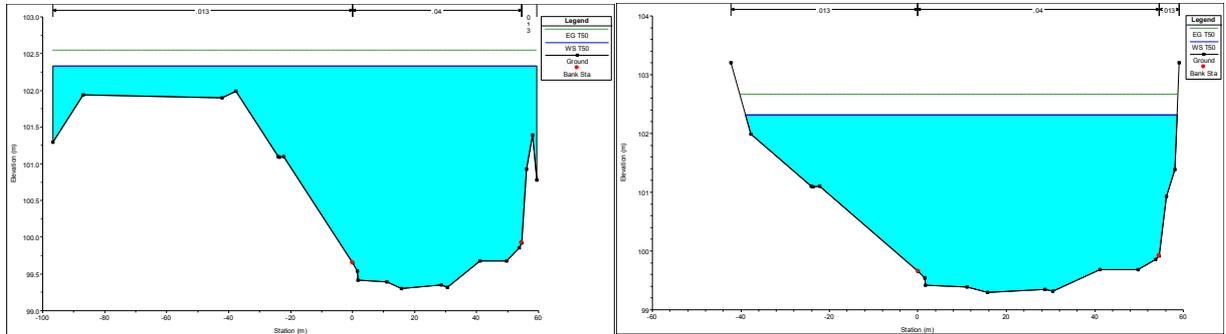
Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

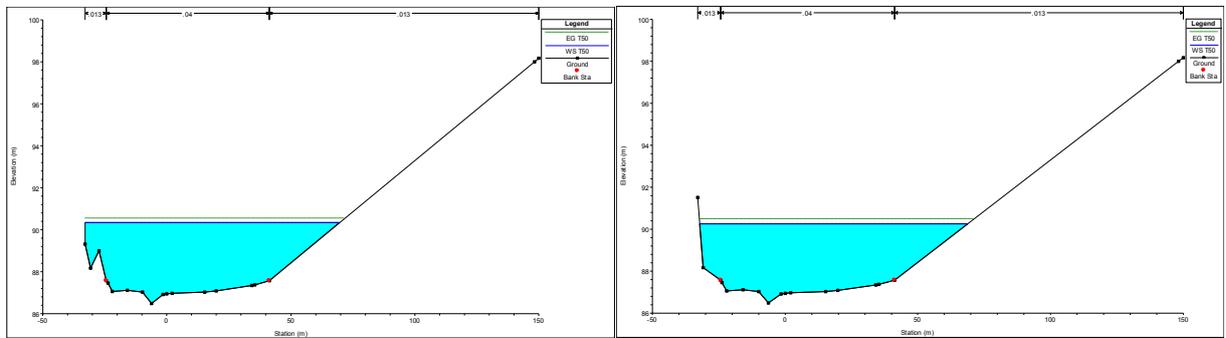
Section transversale 79 après aménagement

Figure V.2.a: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 01 (Bekhira et al 2019a)



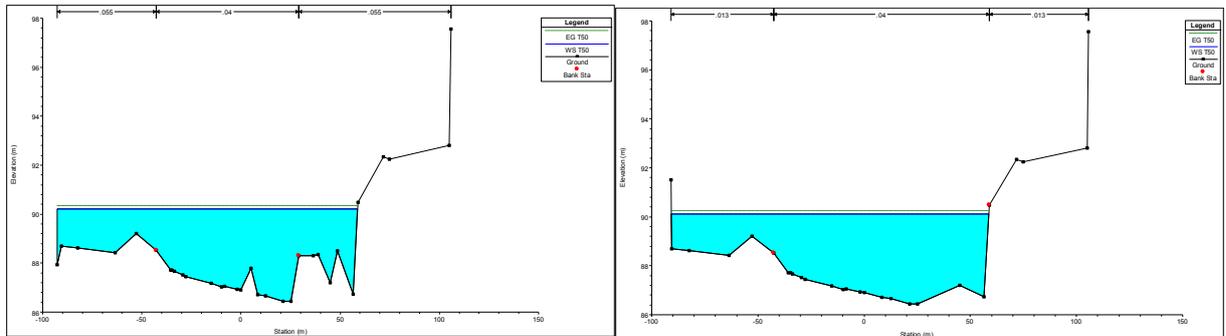
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

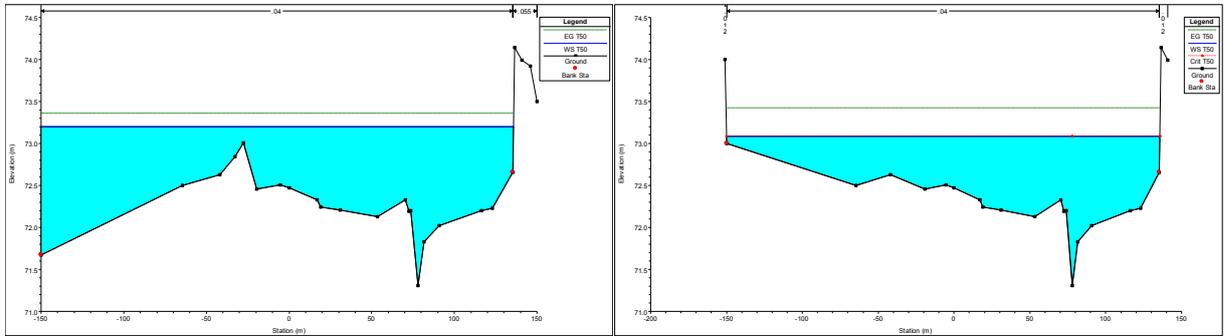
Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

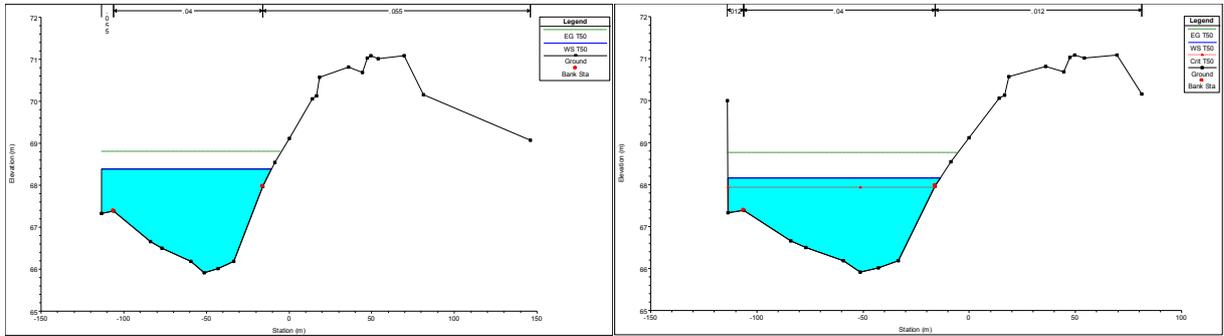
Section transversale 79 après aménagement

Figure V.2.b: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 02 (Bekhira et al 2019a)



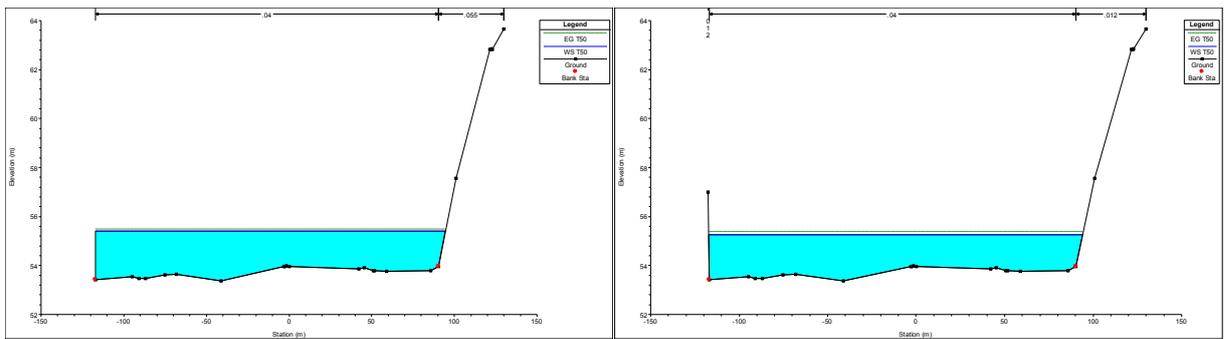
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

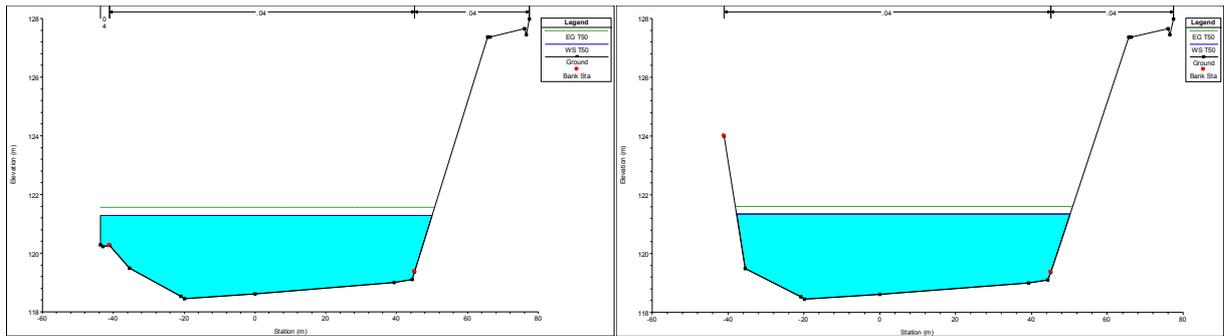
Section transversale 79 après aménagement

Figure V.2.c: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 03 (Bekhira et al 2019a)

5.2 Simulation N°02 (aménagement avec suppression de tous les ponts existants)

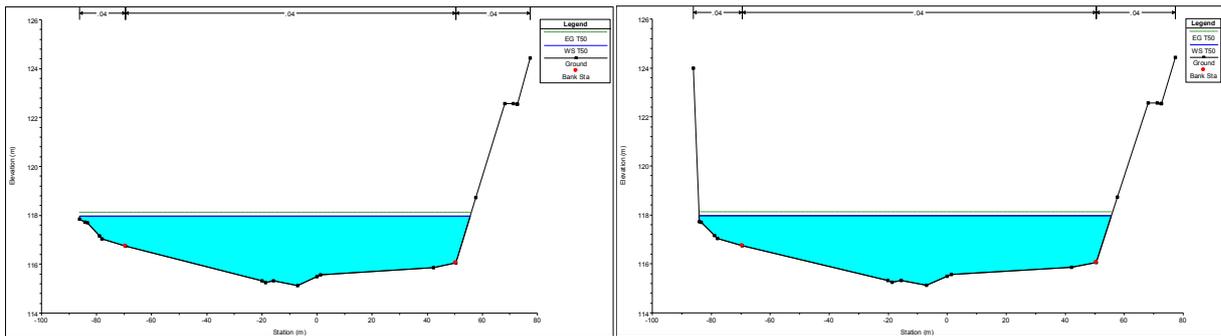
5.2.1 Scénario d'aménagement

Dans ce cas on garde le scénario d'aménagement précédent mais avec suppression de tous les ponts existants dans l'Oued Béchar, les résultats obtenus d'après ces aménagements sont représentées sur la Figure V.3.



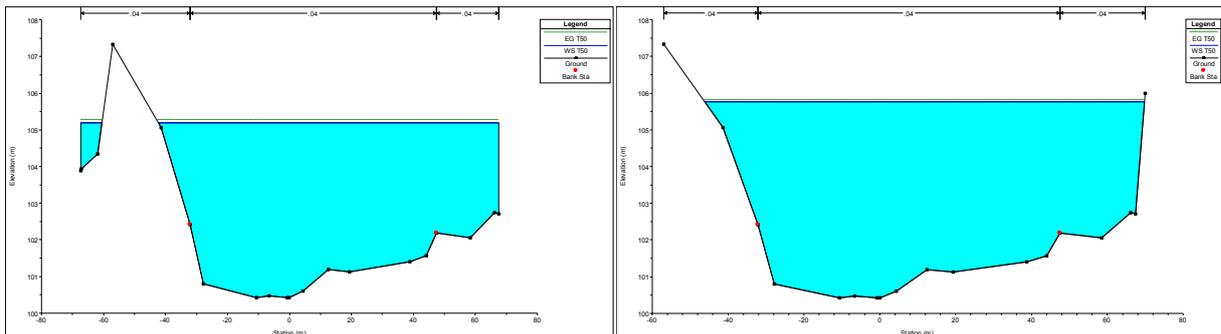
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

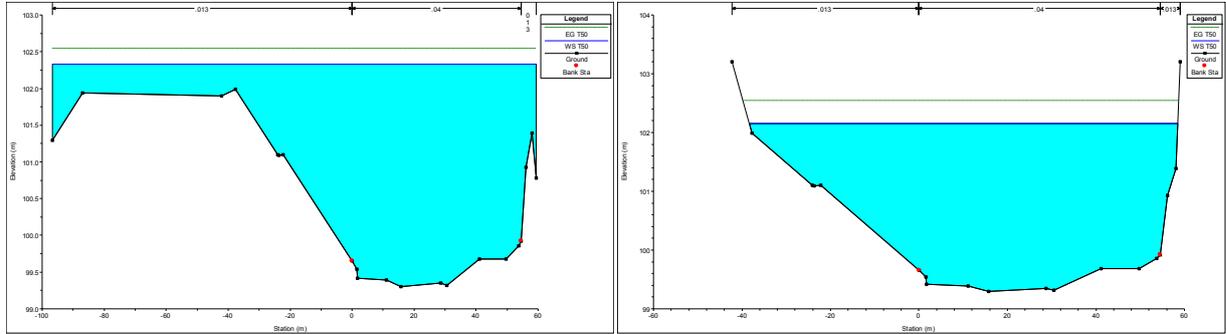
Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

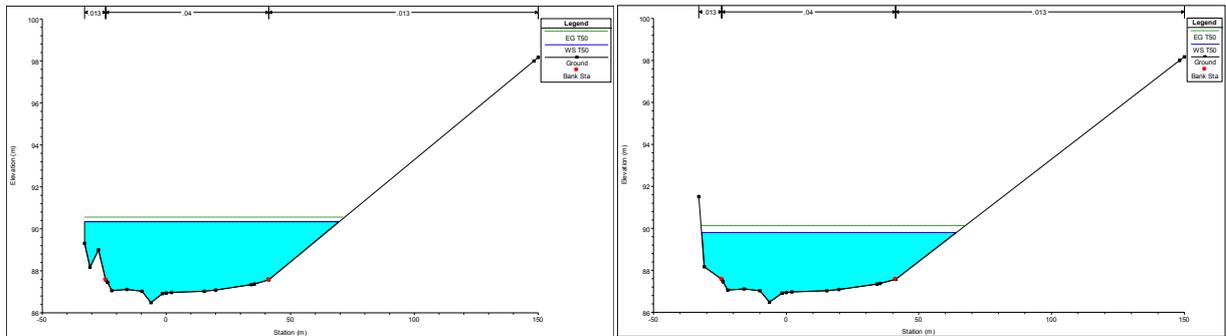
Section transversale 79 après aménagement

Figure V.3.a: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 01 (Bekhira et al 2019a)



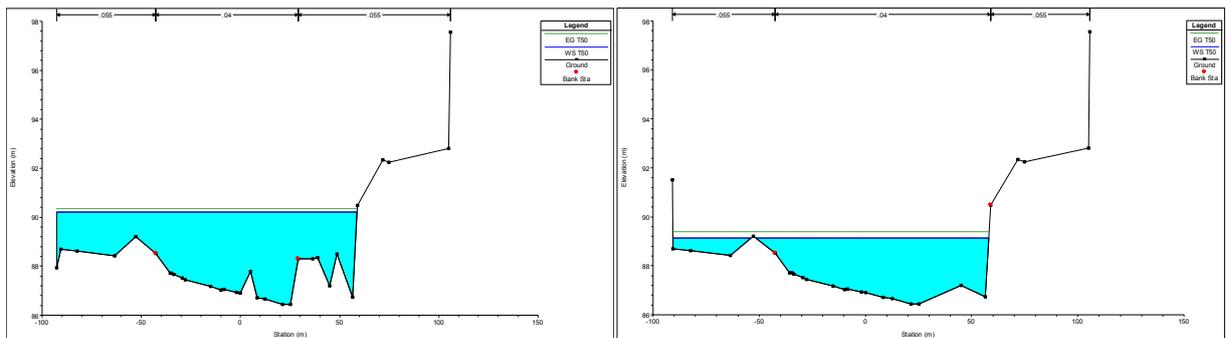
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

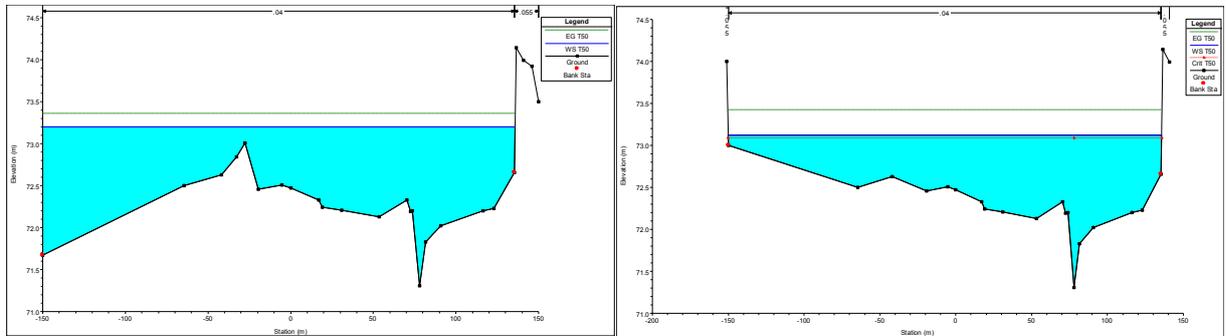
Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

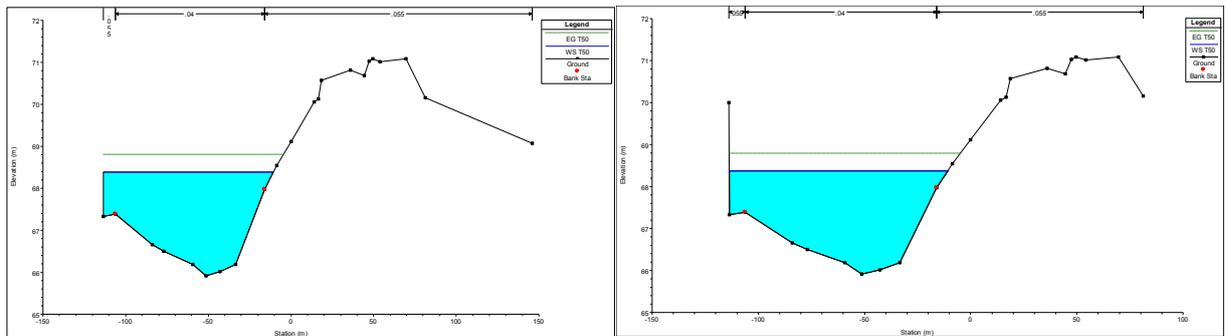
Section transversale 79 après aménagement

Figure V.3.b: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 02 (Bekhira et al 2019a)



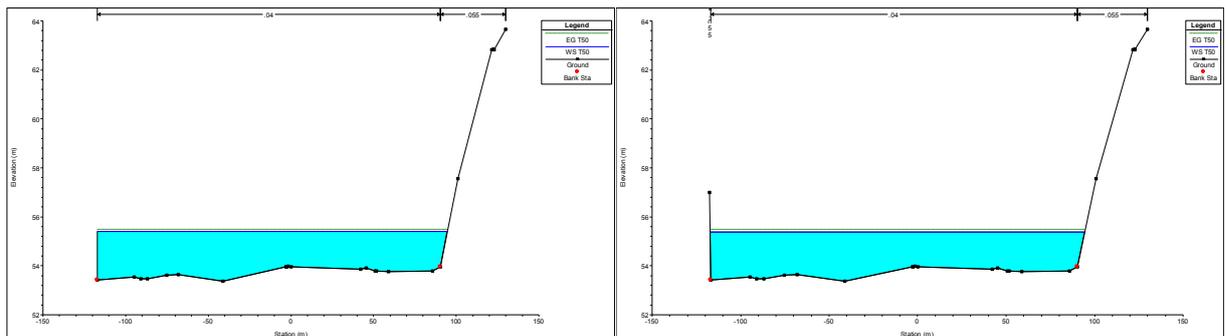
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

Section transversale 79 après aménagement

Figure V.3.c: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 03 (Bekhira et al 2019a)

5.3 Simulation N°03 (aménagement avec réalisation d'un canal en béton à ciel ouvert)

5.3.1 Scenario d'aménagement

On garde le scenario précédent avec réalisation d'un canal en béton à ciel ouvert de 1m/2m sur le lit de l'Oued Béchar seulement au centre ville de Béchar, les résultats obtenus d'après ces aménagements sont représentées sur la Figure V.4.

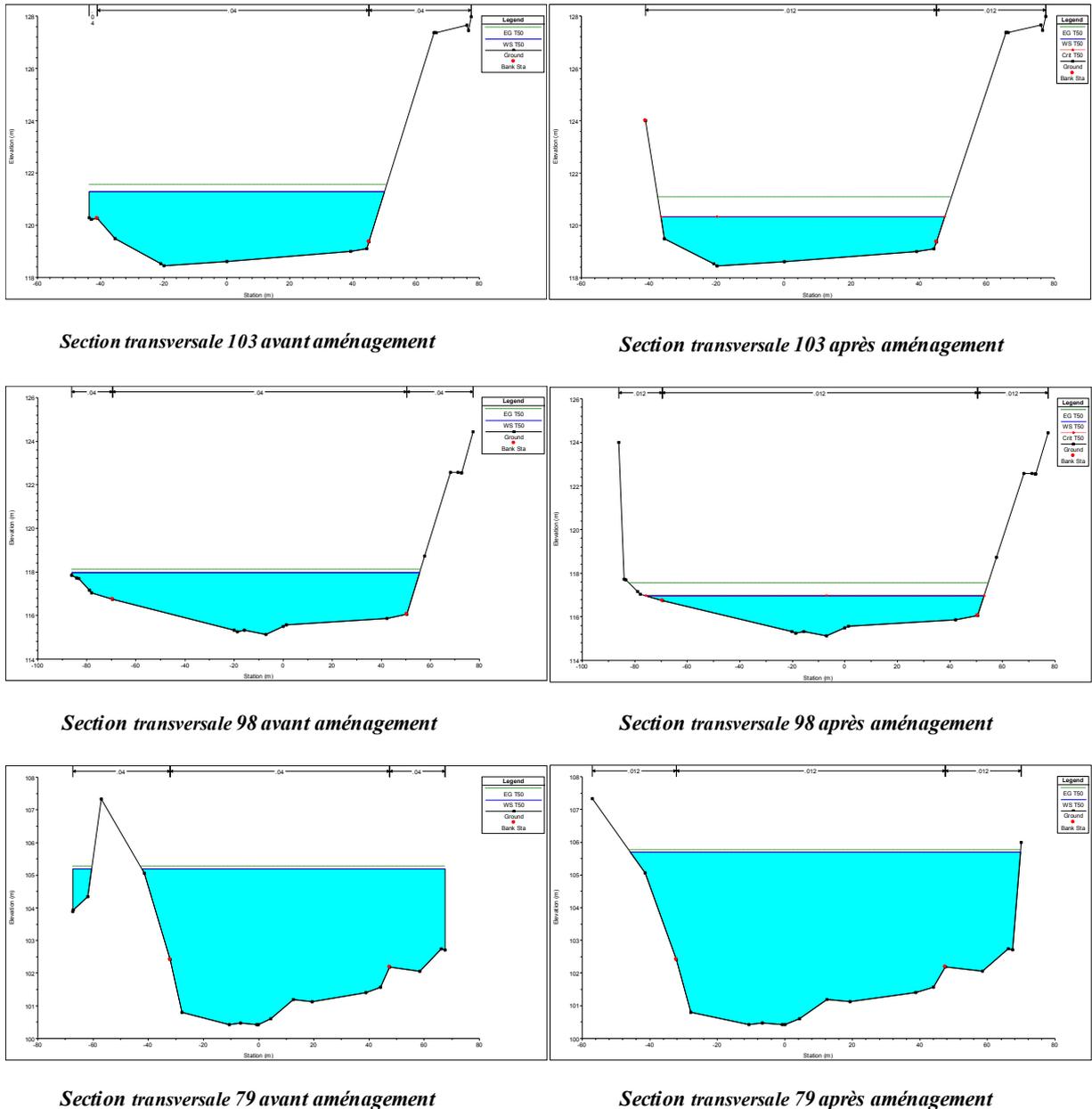
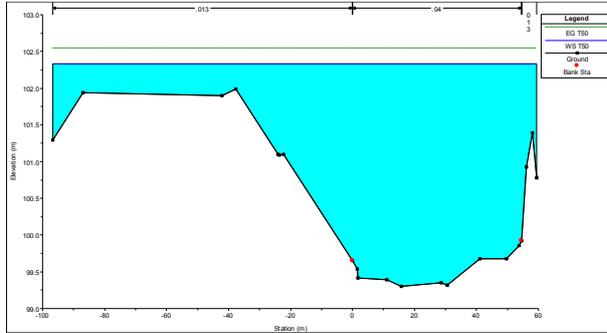
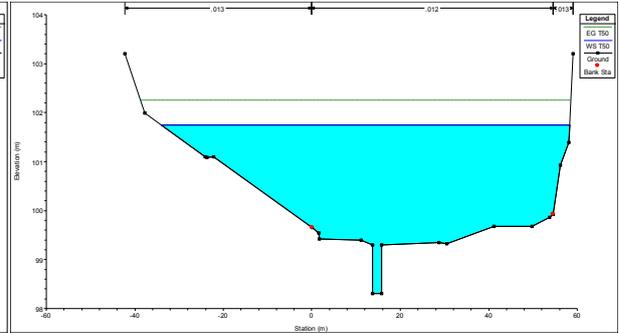


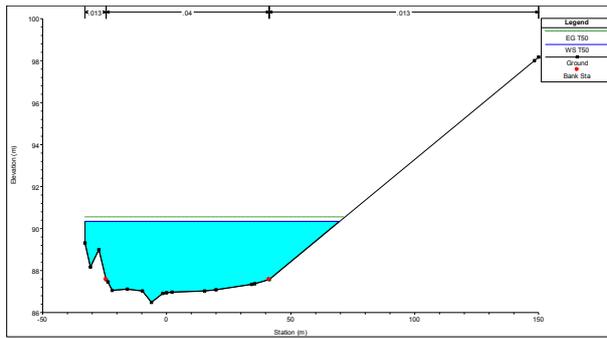
Figure V.4.a: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 01 (Bekhira et al 2019a)



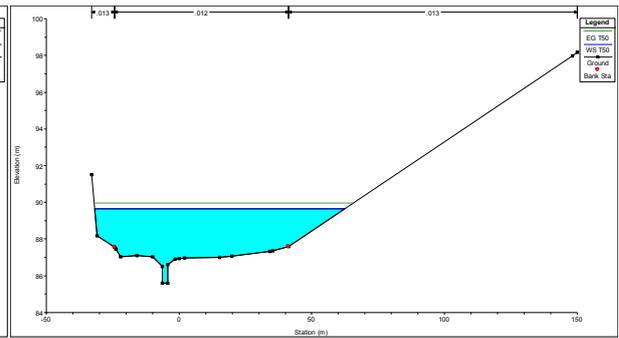
Section transversale 103 avant aménagement



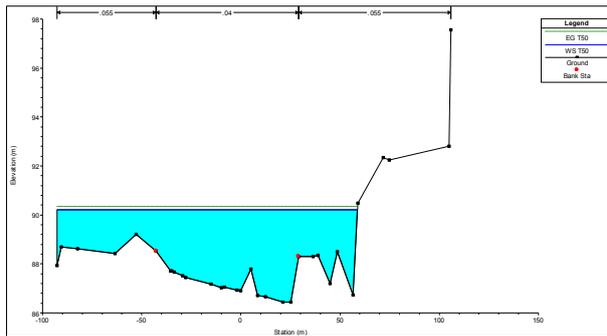
Section transversale 103 après aménagement



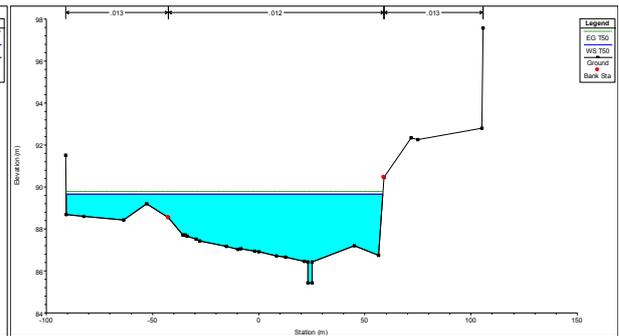
Section transversale 98 avant aménagement



Section transversale 98 après aménagement

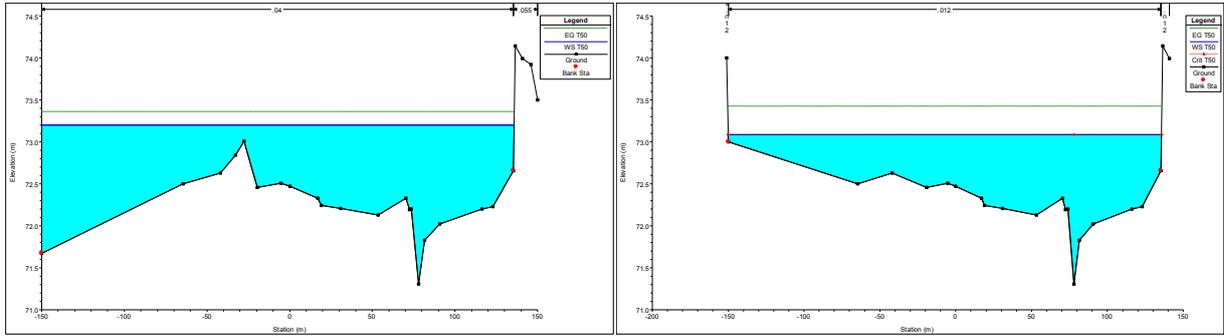


Section transversale 79 avant aménagement



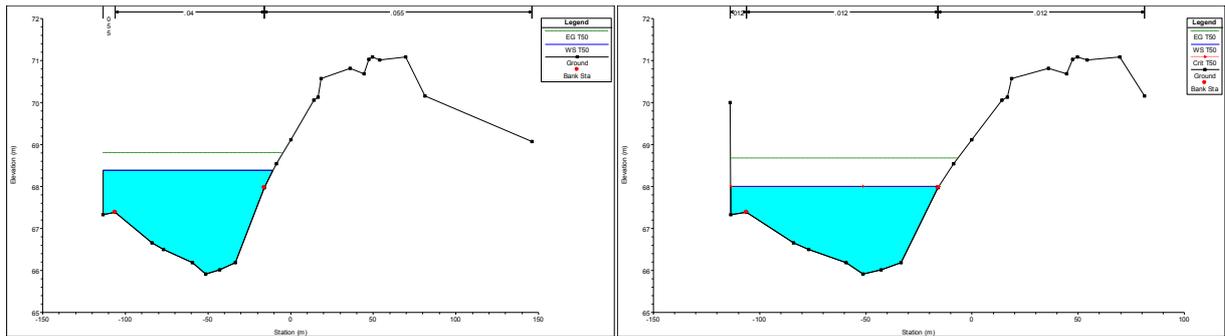
Section transversale 79 après aménagement

Figure V.4.b: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 02 (Bekhira et al 2019a)



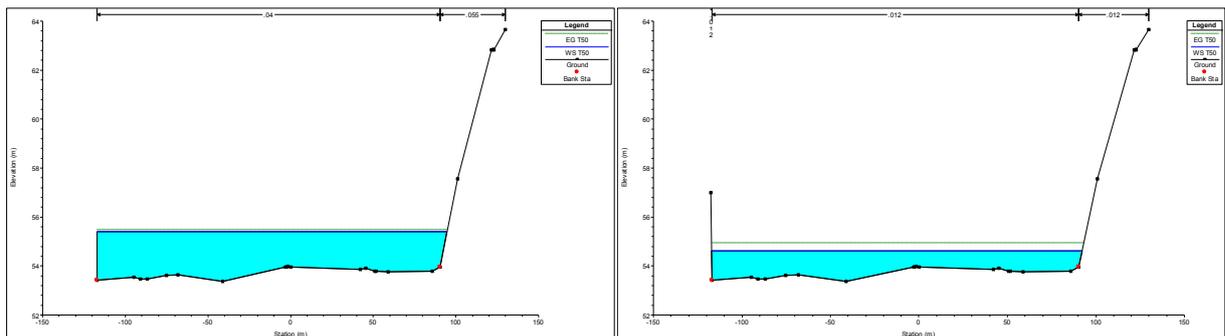
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

Section transversale 79 après aménagement

Figure V.4.c: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 03 (Bekhira et al 2019a)

5.4 Simulation N°04 (aménagement en génie végétal)

5.4.1 Scénario d'aménagement

Dans les ce cas en utilise l'aménagement en génie végétal en amont et aval du centre ville de Béchar (aménagement mixte), les résultats obtenus d'après ces aménagements sont représentées sur la Figure V.5.

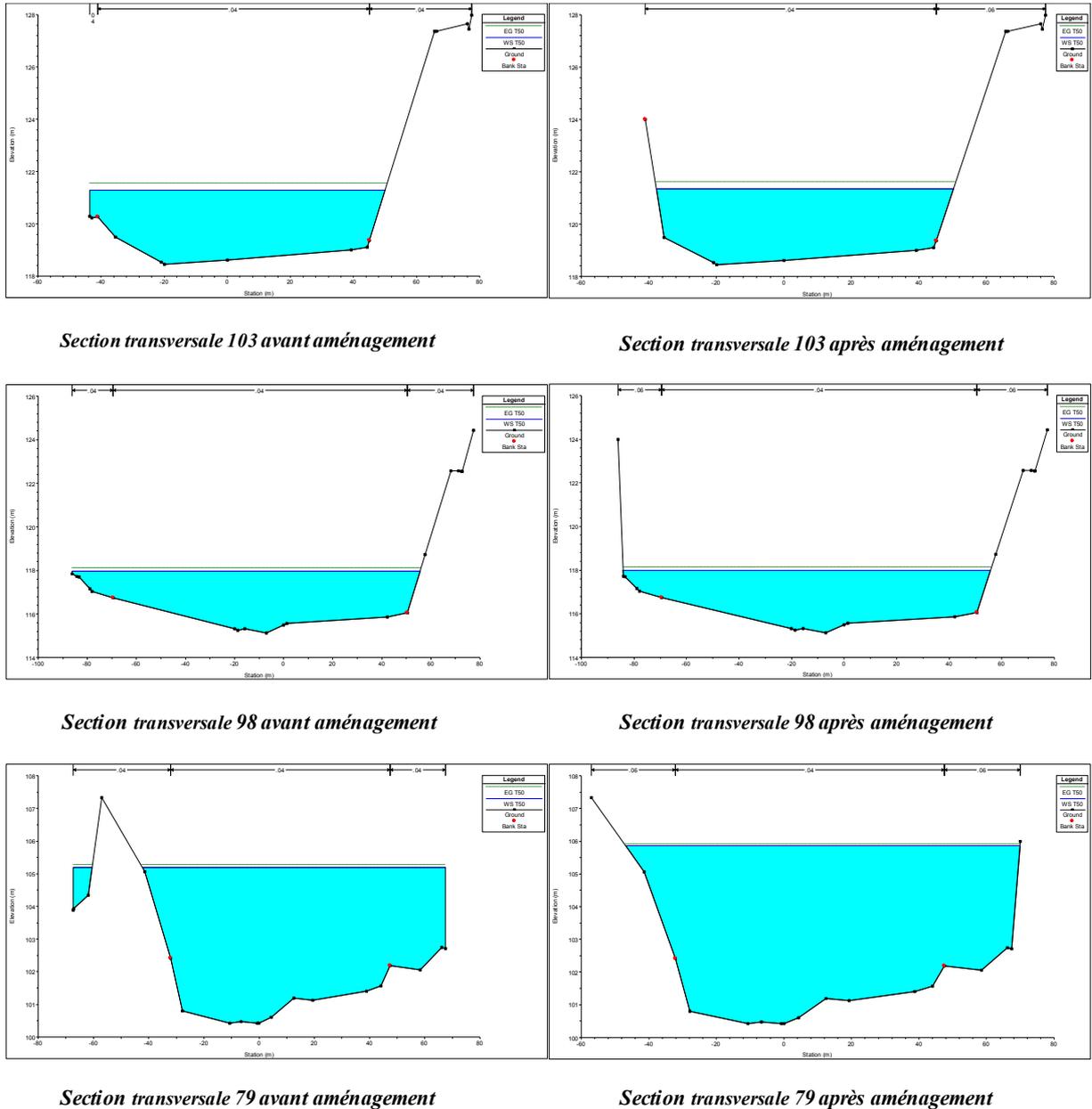
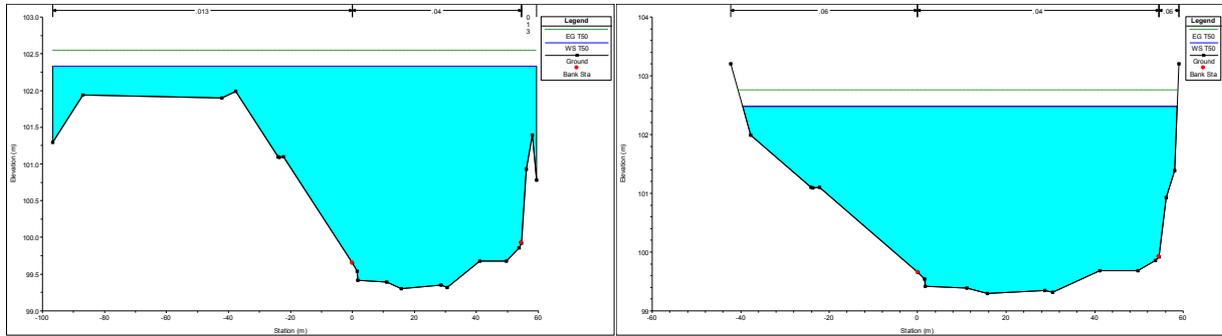
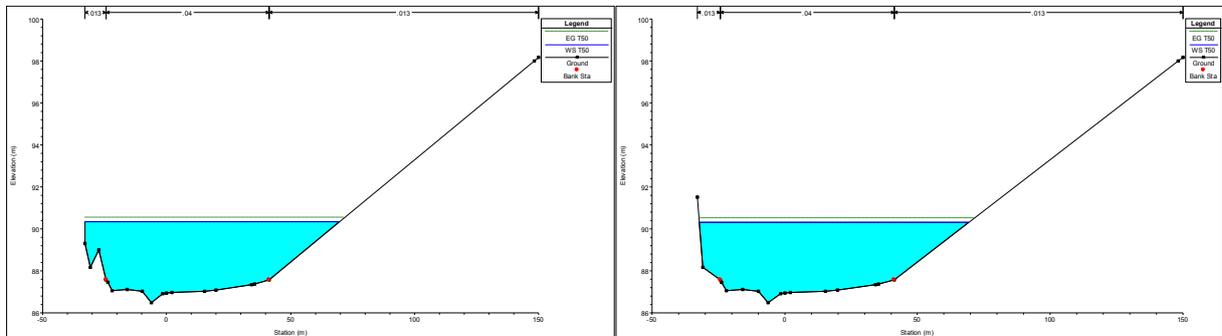


Figure V.5.a: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 01 (Bekhira et al 2019a)



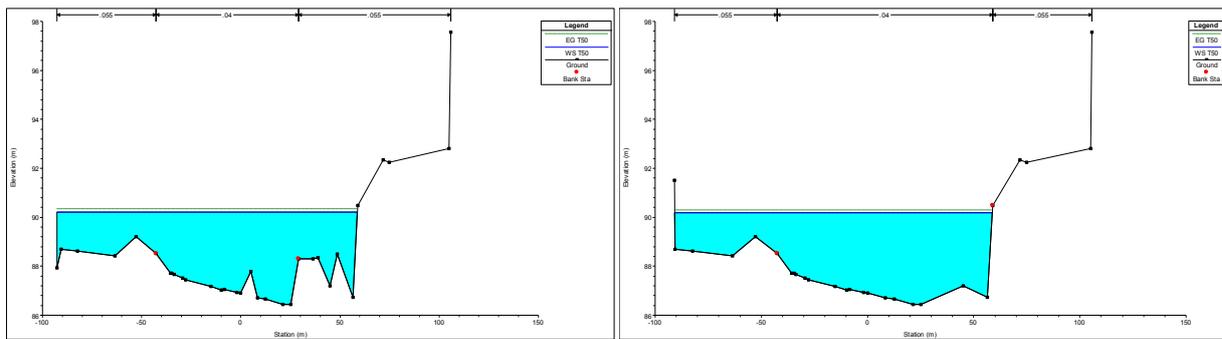
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

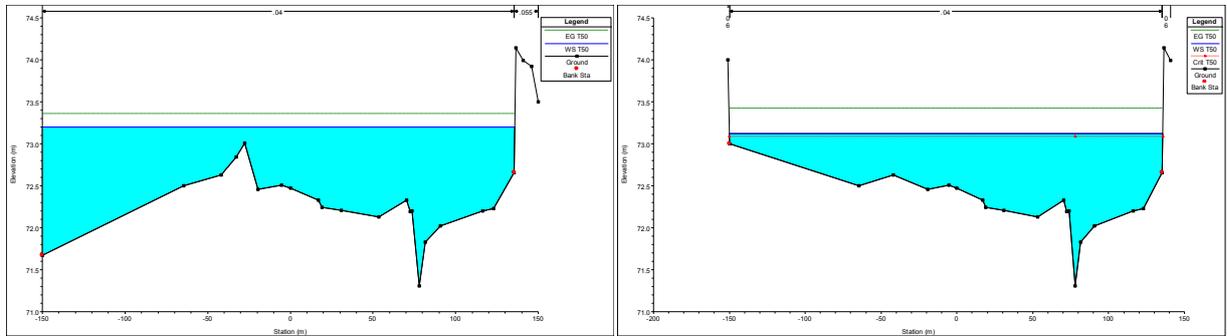
Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

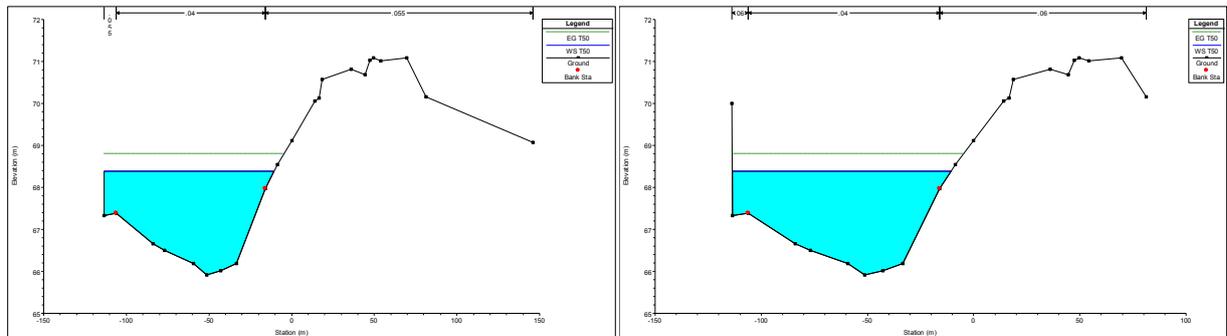
Section transversale 79 après aménagement

Figure V.5.b: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 02 (Bekhira et al 2019a)



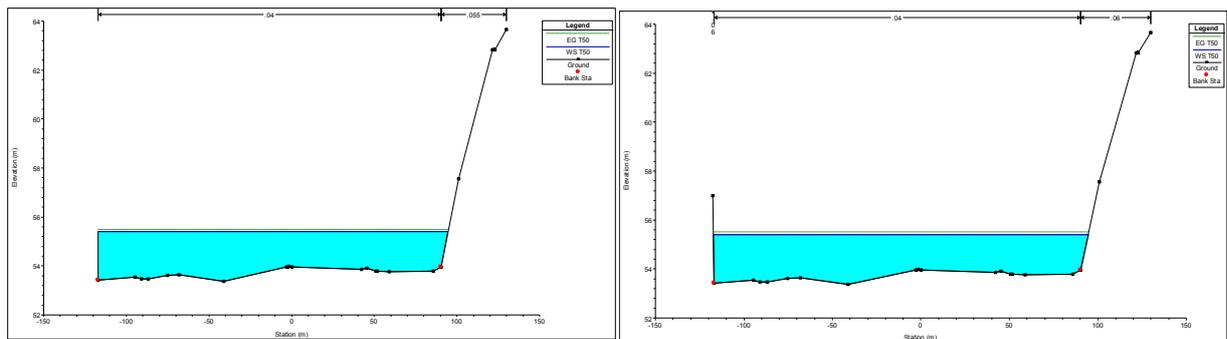
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

Section transversale 79 après aménagement

Figure V.5.c: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 03 (Bekhira et al 2019a)

5.5 Simulation N°05 (aménagement avec gabionnage sur les berges)

5.5.1 Scenario d'aménagement

Dans ce cas nous avons fait un aménagement en gabionnage sur les berges de l'Oued Béchar en amont et en aval de centre ville, en gardant les aménagements existants sur le centre ville de Béchar, les résultats obtenus d'après ces aménagements sont représentés sur la Figure V.6

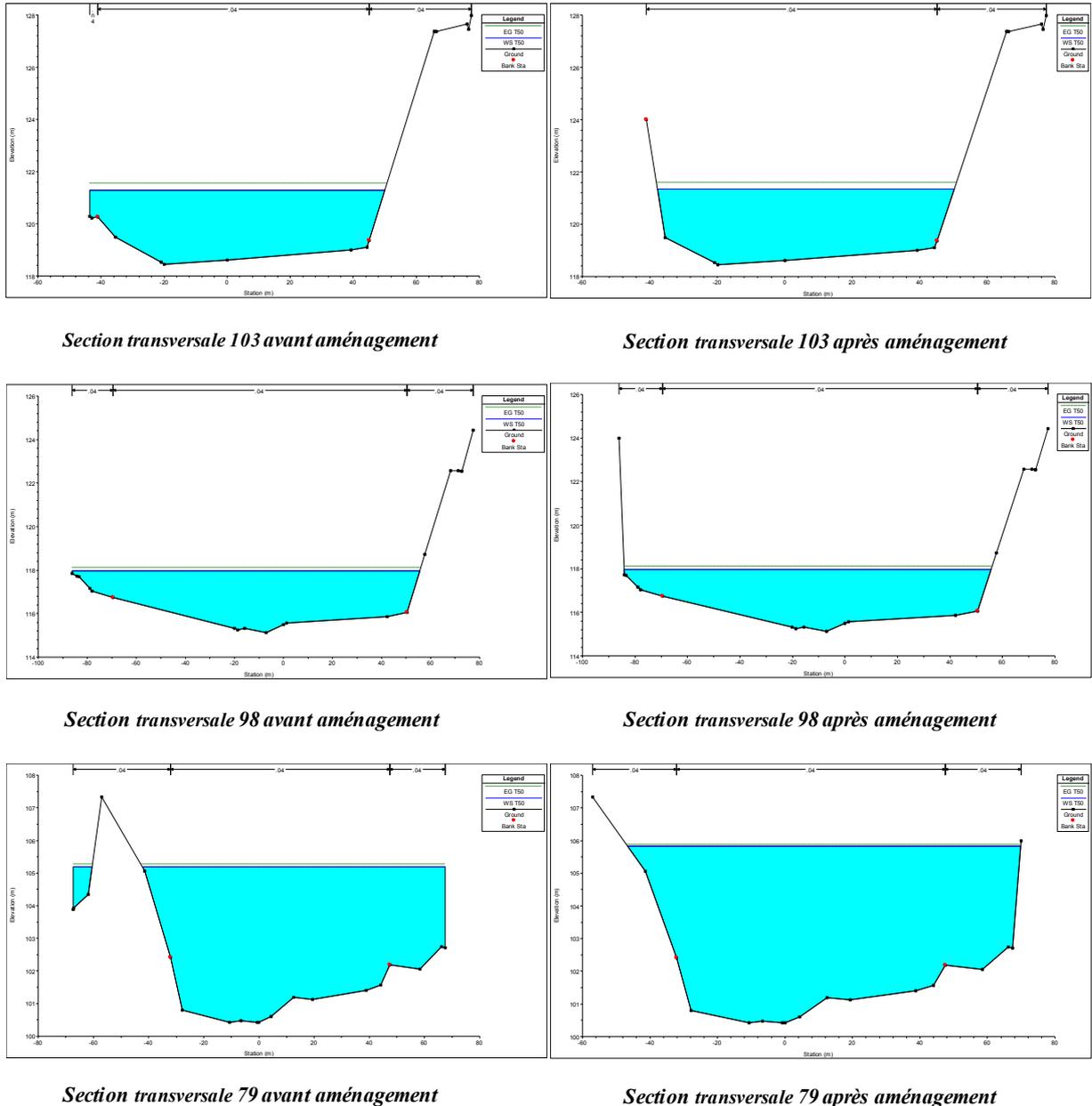
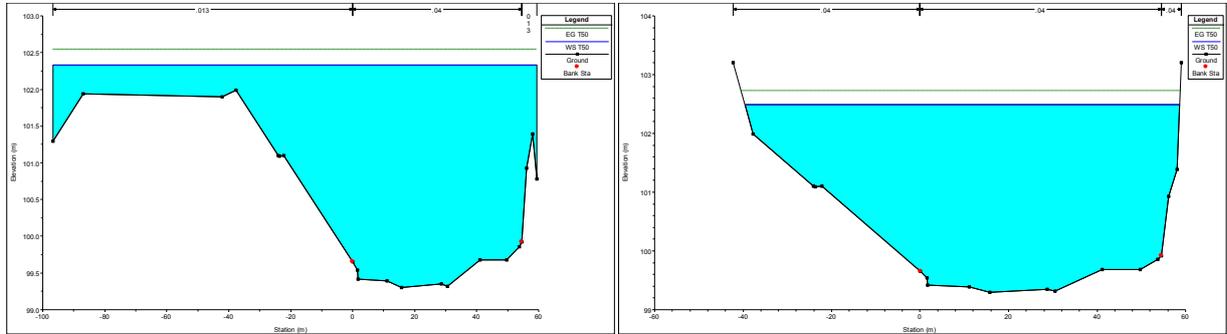
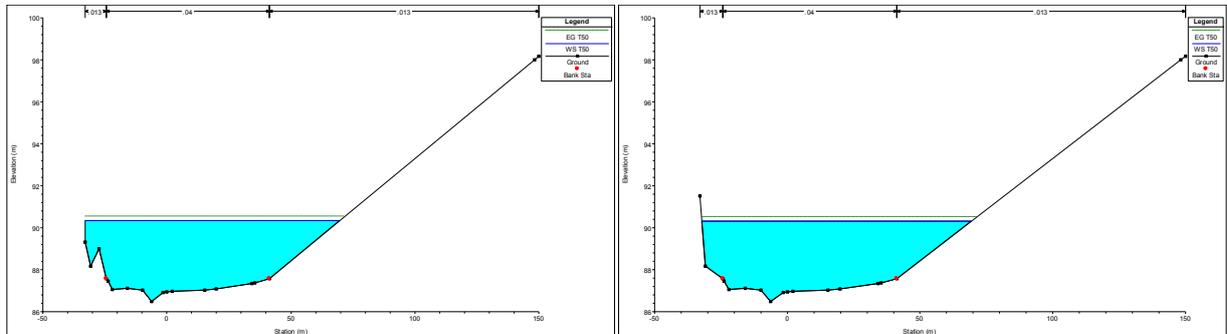


Figure V.6.a: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 01 (Bekhira et al 2019a)



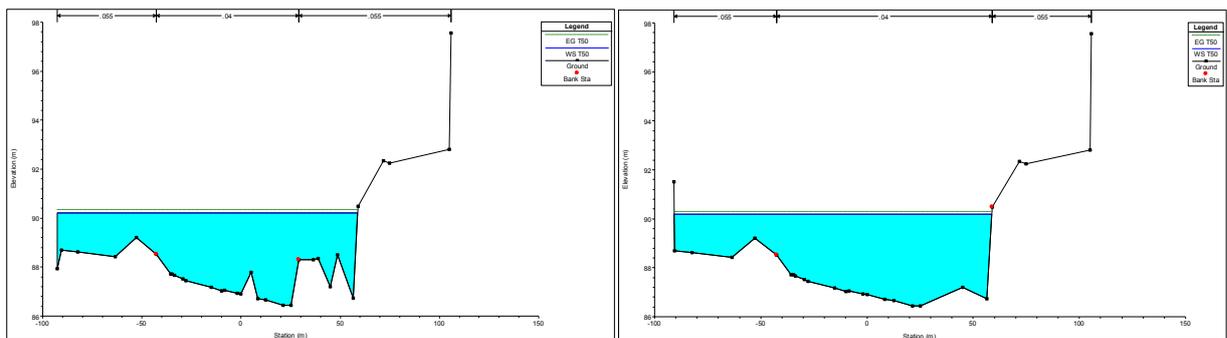
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

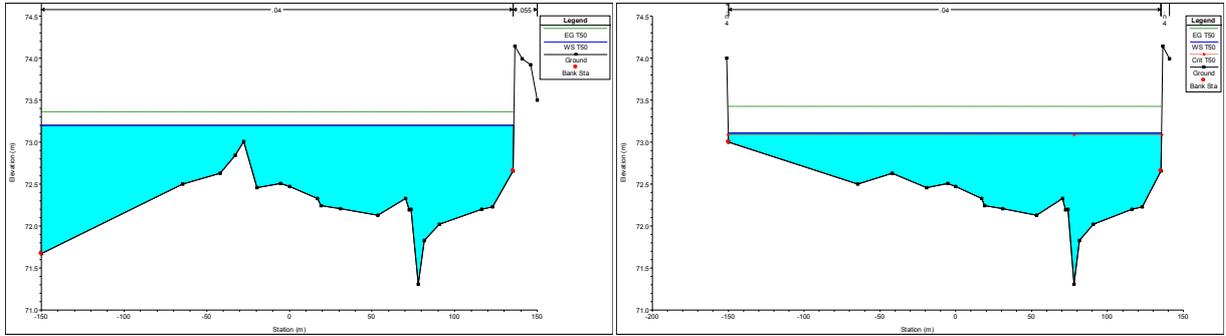
Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

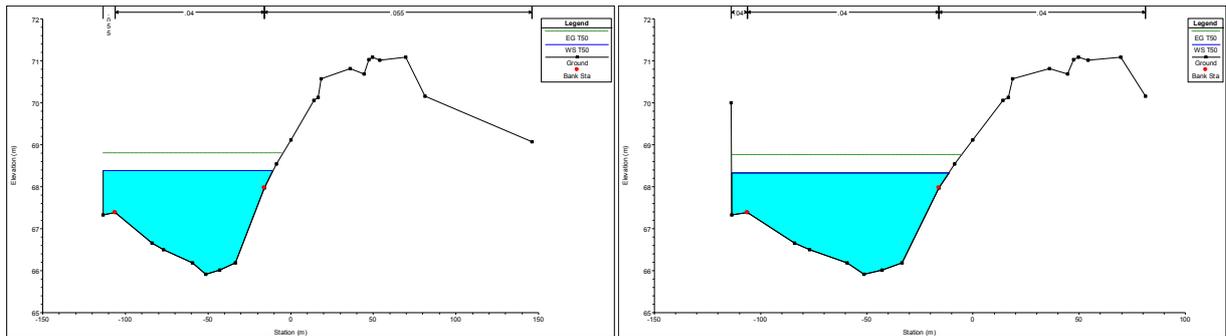
Section transversale 79 après aménagement

Figure V.6.b: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 02 (Bekhira et al 2019a)



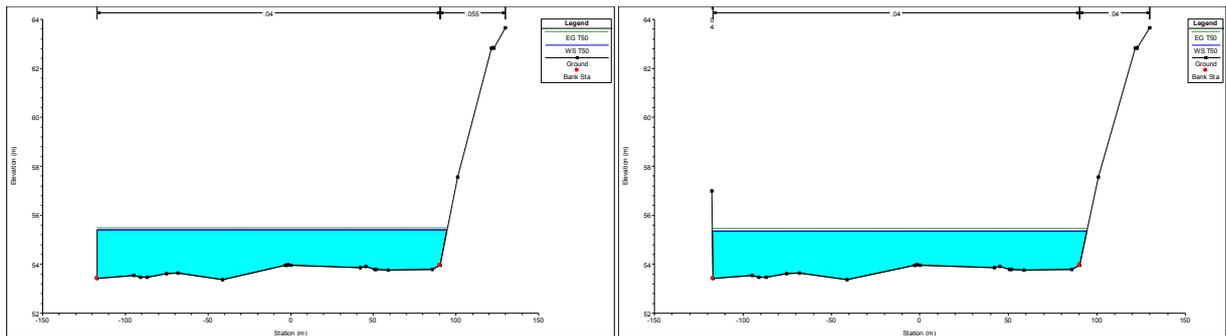
Section transversale 103 avant aménagement

Section transversale 103 après aménagement



Section transversale 98 avant aménagement

Section transversale 98 après aménagement



Section transversale 79 avant aménagement

Section transversale 79 après aménagement

Figure V.6.c: Comparaison des sections avant et après aménagement d'après le scénario d'aménagement pour la zone 03 (Bekhira et al 2019a)

5.6 Résultats et Discussions

Les résultats obtenus selon les différentes simulations sont représentés sur le tableau V.3:

Tableau V.3: Résultats des simulations d'après les scénarios d'aménagement proposés de l'Oued Béchar

	N° de profils	Côte d'eau de Simulation actuel	Côte d'eau de Simulation N°01	Côte d'eau de Simulation N°02	Côte d'eau de Simulation N°03	Côte d'eau de Simulation N°04	Côte d'eau de Simulation N°05
(Zone 01) Amont de la ville de Béchar	103	121.29	121.34	121.34	120.32	121.35	121.34
	98	117.79	117.88	117.97	116.96	117.99	117.97
	79	105.79	105.75	105.76	105.70	105.86	105.82
(Zone 02) Centre ville de Béchar	69	102.33	102.32	102.15	101.75	102.48	102.49
	45	90.33	90.25	89.79	89.64	90.30	90.30
	42	90.21	90.12	89.13	89.05	90.19	90.19
(Zone 03) Aval de la ville de Béchar	25	73.20	73.09	73.12	73.09	73.12	73.11
	20	68.38	68.35	68.38	68.31	68.39	68.33
	4	55.27	55.27	55.39	54.63	55.40	55.35

D'après les résultats obtenus (Tableau V.3), représentés dans le tableau ci-dessus, qui résume les différents résultats des scénarios des simulations selon les aménagements proposés, car nous avons constaté que toutes les simulations d'aménagement ayant un petit décalage de quelque centimètre dans la côte d'eau, sauf que dans le scénario de simulation N°03 qu'est présente des grandes valeurs, on constate un décalage important sur la cote d'eau, ce qui nous permet d'adopter ce simulation comme support d'aménagement pour Oued Béchar (Bekhira et al 2019a).

Conclusion

Ce chapitre nous a facilité de constater que les inondations sont devenues également un grand risque dans la ville de Béchar, qui doivent être traitées dans les programmes de planification en déterminant les zones à risque et le classer en fonction de la hauteur des eaux de la crue, pour minimiser les dégâts des catastrophes naturelles et de réduire les impacts d'inondation dans la zone d'étude afin de protéger la ville de Béchar et les agglomérations exposées face à ce risque.

Des aménagements sont hautement recommandés pour une gestion des risques d'inondation au niveau du cours d'eau de l'Oued Béchar et de proposer un schéma de prévention contre les inondations.

Les stratégies de lutte contre les risques d'inondation à Béchar correspondent à un ensemble d'actions :

- La cartographie du risque d'inondation;
- La prévision, la surveillance et l'alerte;
- L'intervention, le secourisme et la réhabilitation.

Les outils mis en œuvre au cours de ce travail, GR et HEC-RAS, nous ont permis de déterminer les aménagements nécessaires à la lutte contre les crues. Nous avons ainsi proposé des ouvrages de retenue d'eau destinés à écrêter les crues centennales et évacuer les crues centennales.

Au niveau local, c'est à dire aux abords des biefs de l'Oued Béchar, nous avons proposé des aménagements plus restreints (endiguement, élévation des berges...) pour supporter une crue centennale.

Nous avons aussi proposé quelques conseils quant à la mise en œuvre des services de lutte contre les inondations.

Il serait intéressant dans l'avenir de pouvoir intégrer d'autres profils en travers en aval afin de pouvoir connaître la réaction de notre cours d'eau sur une plus grande surface et d'intégrer également la réaction de l'Oued Béchar face à des crues extrêmes dans le modèle HEC-RAS.

Avec des données plus précises sur les caractéristiques du débit de l'Oued Béchar (morphologie exacte...), une simulation plus précise sera élaborée dans les prochaines études.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a permis de mieux appréhender le risque d'inondation. Il a permis l'étude des caractéristiques et de l'ampleur de l'impact du phénomène d'inondation dans la zone de Béchar, zone aride de l'extrême sud-ouest algérien.

Dans ce travail, nous avons développé une méthodologie qui englobe toutes les composantes de la gestion intégrée du risque d'inondation.

Dans l'état de l'art de la modélisation pluie débit, nous avons présenté une synthèse bibliographique sur les modèles hydrologiques les plus utilisés dans le domaine de la modélisation. Ensuite nous avons présenté une description du modèle génie rurale (GR1A) et enfin, une présentation générale du bassin versant de l'Oued Béchar.

Par l'étude climatique nous avons analysé les données (précipitations, les apports ou lame d'eau écoulé, et même Evapotranspiration potentiel), l'étude des ajustements des précipitations nous a permis à déterminer les débits des périodes de retour de 25ans ($Q_{25} = 388.6 \text{ m}^3/\text{s}$), 50ans ($Q_{50} = 478.3 \text{ m}^3/\text{s}$) et 100ans ($Q_{100} = 567.3 \text{ m}^3/\text{s}$).

La modélisation hydrologique de bassin versant s'est avérée nécessaire surtout dans notre cas, où nous avons des problématiques liée à la gestion des ressources en eau dans l'aménagement du bassin versant. L'application du modèle génie rural (GR) qui a été faite suivant les deux pas du temps annuel et mensuel a permis d'approcher la modélisation hydrologique.

L'étude hydrologique nous a consisté à introduire les conditions aux limites nécessaire dans le modèle hydraulique. La modélisation hydraulique a permis de faire une simulation nécessaire afin de déterminer les zones vulnérables qui correspondent aux périodes de retours, 25 ans ($Q_{25}=388.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $heau=3.5 \text{ m}$, $b=200\text{m}$, $Stache=55.35\text{ha}$), 50ans ($Q_{50}=478.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $heau=5 \text{ m}$, $b=200\text{m}$, $Stache=66.48\text{ha}$) et 100ans ($Q_{100}=567.3$, $heau=7 \text{ m}$, $b=200\text{m}$ $Stache=133\text{ha}$). L'application du logiciel de modélisation hydraulique HEC-RAS a permis aussi de bien connaître le comportement du cours d'eau et le cas échéant de prévoir les inondations et de pouvoir prévenir les éventuels dégâts qui permettent d'approcher la modélisation du cours d'eau de l'Oued Béchar.

L'exploitation du modèle hydraulique, est faite par plusieurs simulations différentes sur le tronçon du cours d'eau étudié de l'Oued Béchar.

Les résultats de la simulation ont été utilisés pour fournir les moyens et suggérer des ménagements pour répondre aux besoins de protection et de gestion des inondations.

La carte des risques d'inondation devrait être utilisée comme base de connaissances pour développer un système de soutien à la gestion afin que les développements recommandés puissent être testés et analysés dans le contexte global du bassin versant.

Un aménagement de l'Oued Béchar à été réalisé afin de concrétiser la méthodologie de cartographie de l'impact des interventions sur la réduction du risque, et de présenter les résultats d'une façon simple et claire pour comparer les différents projets susceptible à être réaliser. Cette méthodologie peut aussi présenter un outil au profit des projeteurs pour convaincre les décideurs.

Pour rester dans ce contexte, nous recommandons l'application d'autres modèles hydrologiques tels que le modèle HMS, et d'approfondir la modélisation hydraulique.

Nous avons essayé de valider d'autres simulation très complexes intégrant plusieurs facteurs tel que les changements climatiques, l'évolution de l'occupation du sol, les aménagements à grand échelle, l'application des différentes lois juridiques existantes, ainsi que l'introduction de plus de techniques informatiques telle que l'imagerie spatiale, la télédétection et le système d'information géographique en utilisant les logiciels, tel que l'ArcGis, HecGeo RAS, MapInfo et ArcView, afin que les résultats soient plus précis.

Des recherches supplémentaires sont encore nécessaires pour améliorer les méthodes hydrologiques et hydrauliques de stabilisation, mieux définir le concept de système hydrologique et améliorer la connaissance du processus à l'origine des inondations et l'intégration des données socio-économiques et juridiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Andréassian. V., 2002.** Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Cemagref (Antony), 276p.
- Andréassian. V., Parent. E., et Michel. C., 2003,** A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior, *Water Resources Research* 39(9), 1252, doi:10.1029/2003WR002081.
- ANRH 2011,** Rapport globale sur la région Sud Ouest [Global report on the South West region [National Agency for Hydraulic Resources]]. [02.03.2011 Bechar].
- Ashkar F., Bobée B., 1987,** The generalized method of moments as applied to problems of flood frequency analysis : some practical results for the log-Pearson type 3 distribution. *Journal of Hydrology*, 90, p. 199 - 217.
- Bceom. A., 2000,** Inondations de Novembre 1999 dans le Sud de la France. Estimation des dommages des crues et cartographies des zones inondées, rapport inédit, MATE, 24p.
- Bekhira A., Habi M., Morsli B., 2019a,** La gestion des risques d'inondations et aménagement des cours d'eaux dans les zones urbaines: cas de la ville de Béchar, *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°37, Mars 2019, pp. 75-92.
- Bekhira A., Habi M., Morsli B., 2019b,** Management of hazard of flooding in arid region urban agglomeration using HECRAS and GIS software: The case of the Bechar's city, *Journal of Water and Land Development*, No. 42 (VII-IX) p. 21-32, DOI: 10.2478/jwld-2019-0041.
- Bekhira A., Habi M., Morsli B., 2018,** Hydrological modeling of floods in the Wadi Bechar watershed and evaluation of the climate impact in arid zones (southwest of Algeria). *Applied Water Science*. Vol. 8. Iss. 6 p. 1-8.
- Bekhira A., Nebou M., Merzougi T., 2014,** Gestion des crues dans le bassin versant de l'Oued Béchar: etude hydrologique et aménagement [Flood management in the Wadi Bechar watershed: hydrological study and development]. MSc Thesis. Bechar. Tahri Mohammed University pp. 159.
- Benaradj A., Boucherit. H., Bouazza. M., Baghdadi. D., Aibout. F., 2012,** Particularité géologique de l'atlas saharien oranais (Béchar), CU Nâama, CI, Ouargla, 19-24.
- Benmechernane N., 2013,** Etude de protection de la ville de bensekrane (w.tlemcen) contre les inondations, Mémoire. Tlemcen Master en Hydraulique, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 136p.
-

- Benzater, B., Elouissi, A., Benaricha, B., Habi, M., 2019**, Spatio-temporal trends in daily maximum rainfall in northwestern Algeria (Macta watershed case, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* 12 (11):1-18. DOI 10.1007/s12517-019-4488-8.
- Benzater, B., Elouissi, A., Benaricha, B., 2020**, Hausse significative des pluies maximales journalières dans le bassin versant de la Macta (nord-ouest de l'algerie). Conférence: changement climatique et territoires at: Septembre 2020, Rennes, France.
- Birnbaum ZW., 1952**, Numerical tabulation of distribution of Kolmogorov-Smirnov's statistic for finite sample size. *Journal Ameri. Statistic Associat.* p. 425 - 441.
- Blahsaini M., Tabyaoui H., 2018**, Modelisation Hydraulique Mono Dimensionnel Par HEC RAS, Application Sur L'oued Aggay (Ville De Sefrou), *European Scientific Journal*, Vol.14, n° 18, pp. 110-121, Issn: 1857-7881.
- Bobée B., 1999**, Estimation des événements extrêmes de crue par l'analyse fréquentielle : une revue critique, *la Houille Blanche* (7/8), p. 100 - 105.
- Bobée B., Ashkar F., 1991**, The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology. *Water Resources Publications*, pp 203.
- Boulghobra N., 2006**, Protection de la ville de Skikda contre l'inondation. Essai de PPRI. Th Magister Aménagement Des Milieux Physiques, Université De Batna.
- Bouanani. R., 2010**, Modélisation de la fonction pluie - débit. Application au bassin versant de la Tafna (NW Algérien). *Mém. Magister, Univ. Tlemcen*, 109 p.
- Boulanouar. S., 2007**, Caractérisation hydrologique du bassin versant d'Oued Saoura (Sud Ouest Algérien). *Mémoire de fin d'étude, université de Béchar*, 11-32.
- Bruijnzel. L., 1999**, Structures gestionnaires de digues de protection contre les inondations, Th Doctorat. Université De Joseph Fourier.
- Cosandey. C., Robinson, 2000**, *Hydrology and hydraulic*, 2nd, edition armand colin, paris, 200p
- Chachoua. A., 2010**, Gestion de crue dans un bassin versant étude hydrologique, hydraulique et aménagement, mémoire de magister écoulement et transport solide, université Aboubakr Belkaid Tlemcen, 41-45.
- Deleau, 1952**, La région de Colomb-Béchar
- Directive n° 2007/60/CE** du 23/10/07 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, https://aida.ineris.fr/consultation_document/891.
- Duglas. A., 2004**, Caractérisation du régime des crues le modèle débit-durée-fréquence convergent Approche locale et régionale. Th Doctorat. Institut national polytechnique de Grenoble.
-

- Elhoussaoui A., Baba-Hamed K., Bouanani R., 2015**, Hydrology and modeling of the rainfall-runoff function: case of the Wadi Tamanrasset watershed South-Algeria. Dissertation of master, University of Tlemcen.
- Elhoussaoui A., Baba-Hamed K., Bouanani A., Amours K., 2016**, Hydrology and rainfall-runoff modeling: case of Tamanrasset Wadi watershed South-Algeria. In: 2nd international conference on water resources (ICWR).
- Elouissi, A., Habi, M., Benaricha, B., Boualem, S.A., 2017**, Climate change impact on rainfall spatio-temporal variability (Macta watershed case, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* (2017) 10:496. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3264-x>.
- Elouissi, A., 2016**. Changement climatique, impacts et vulnérabilité. Cas du bassin versant de la Macta. Doctoral thesis. Abou Bakr Belkaid University of Tlemcen. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/15065/1/Doc.Hyd.Elouissi.pdf>
- Elouissi, A., Şen, Z. & Habi, M., 2016**, Algerian rainfall innovative trend analysis and its implications to Macta watershed. *Arabian Journal of Geosciences*. DOI 10.1007/s12517-016-2325-x.
- Filliben J.J., 1975**, The Probability Plot Correlation test for normality. *Technometrics*, p. 111-117.
- Fourmigué. P. et Lavabre. J., 2005**, Prévision de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. *Revue des Sciences de l'Eau* 18(1), 87-102.
- Ghazi M.A., 2009**, Risque des inondations dans la wilaya de Béchar, Mémoire d'ingénieur en géographie, Université d'Oran (en langue arabe).
- Greenwood, J.A. et al., (1979)**. Probability Weighted moments : definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resource Research* 15 (5), p. 1049 - 1054.
- Gumbel E.J., 1942**, On the frequency distribution of extreme values in meteorological data, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 23-95.
- Gumbel. E.J., 1958**, The statistics of extremes, Columbia University Press, New York, 371p.
- Hafnaoui M.A., Hachemi A., Ben Said M., Noui A., Fekraoui F., Madi M., Mghezzi A., Djabri L., 2013**, Vulnérabilité aux inondations dans les régions sahariennes – cas de Doucen [Vulnerability to floods in the Saharan regions – Case of Doucen]. *Journal Algérien des Régions Arides*. No. 12 p. 148–155.
- Halilou M.A., 2011**, Historique et impact des inondations de l'Oued Béchar dans la ville de Béchar [History and impact of the floods of Oued Bechar in the city of Bechar]. MSc Thesis. Oran. University of Oran pp. 156.
- Hec-Ras**, Manuels d'utilisation et Guide.
-

- Hec-Ras, 2010**, River analysis system, version 4.1, 16-350.
- Henry. J.B., 2004**, Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine, Thèse de Doctorat, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 238p.
- Houbib. H., 2013.**, Analyse Multicritères des composantes du Milieu à l'aide des techniques de la géomatique pour un aménagement intégré de la vallée de Oued Mellagou- Bouhmama W. KHENCHELA-, Thèse de Magister en Aménagement de Territoire, Université El Hadj Lakhdar –Batna, 210p.
- Hoegh-Guldberg O., Bruno J.F., 2010**, The impact of climate change on the world's marine ecosystems. Science. Vol. 328. Iss. 5985 p. 1523–1528.
- Houze Jr R.A., Rasmussen K.L., Medina S., Brodzi K S.R., Omatschke U., 2010**, Anomalous Atmospheric Events Leading to the Summer 2010 Floods in Pakistan, American Meteorological Society, Vol.92, n° 3, pp. 291-298.
- Kabour. A., Hani. A., Mekkaoui. A., Chebbah. L., 2011**, Evaluation et gestion des ressources hydriques dans une zone aride. cas de la ville de BECHAR (sud ouest algérien), 10-11.
- Kabouya. M., 1990**, Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347p.
- Kabouya. M et Michel. C., 1991**, Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. Revue des Sciences de l'Eau 4(4), 569-587.
- Karim. M. D. et Chowdhury. J.U., 1995**. A comparison of four distributions used in flood frequency analysis in Bangladesh. Hydrological Sciences Journal 40. February, 55 - 66.
- Khentouche. A., 2005**, Contribution à l'étude quantitative et qualitative de l'érosion dans le bassin versant d'oued Nafla (w. de Batna), mémoire de magister en aménagement des milieux physique, université El Hadj Lahkdar, Batna, 119p.
- Kouakou KE., Kouassi AM., Kouadio ZA., Goula BTA., Savane I., 2016**, Modeling hydrological watershed of Comoe in climate change context. Int J Innov Appl Stud 15:799
- Kreis. N., 2004**, Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d'inondation application a la vallée de la Thur (Haut-Rhin) ; thèse de doctorat Spécialité : Sciences de l'Eau à l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 350p.
- Lyon SW., King K., Polpanich OU., Lacombe G., 2017**, Assessing hydrologic changes across the Lower Mekong Basin. J Hydrol Reg Stud.
-

- Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M., R.Kjeldsene T., 2014**, Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe, *Journal of Hydrology*, Vol.519, Issue D, pp. 3634-3650.
- Makhlouf. Z et Michel. C., 1994**, A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162, 299-318.
- Mathevet. T., 2005**, Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463p.
- Menchikoff. N., 1936**, Etude géologique sur les confins Algéro-Marocains du Sud. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5t. IV: 131-148.
- Mériaux. P., Royet. P., Folton. C., 2001**, Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations; Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires, Ministère de l'Environnement, Cemagref éditions, Antony, 192 p.
- Merzougui. T., Ghazli. M., Rezzoug. C., 2014**, Risque des inondations dans le bassin versant de la Saoura (Bechar, Sud Ouest algérien), *International Journal of Environment & Water*, Vol 3, Issue 2, 23-95.
- Michel. C., 1983**, Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*(1), 39-44.
- Miquel. J., 1984**, Guide pratique d'estimation de probabilités des crues, l'éreed, édition Eyrolles, Paris.
- Morsli. B., Habi M., 2012**, Risques d'inondation urbaine: cas d'une agglomération à l'aval de versants argileux terrassés dans l'Ouest algérien, IRD Éditions, Marseille, France, 758 p.
- Morsli. B., Halitim. A et Mazour. M., 2008**, Érosion et effet des techniques culturales sur les versants semi-arides de l'Algérie (Beni Chougrane). In : Efficacité de la GCES en milieux semi-arides, Édité. AUF-IRD-ENFI, Paris, 199-203.
- Mouelhi. S., 2003**, Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323.
- Mouelhi. S., Michel. C., Perrin. C et Andreassian. V., 2006a**, Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* 328, 283-296.
- Mouelhi. S., Michel. C., Perrin C., Andréassian V., 2006b**, Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* 318(1-4), p.200-214.
-

- Musy. A., Higy. C., 2004**, Hydrologie : une science de la nature, Presses polytechniques, Lausanne 302p.
- Nash. J.E et Sutcliffe. J.V., 1970**, River flow forecasting through conceptual models. Part I—a discussion of principals. Journal of Hydrology, 10, p 282-290.
- NERC. 1975**, Flood Studies Report, Hydrological Studies, National Environment Research Council London, Vols. 1-5. United Kingdom. 550 p.
- Niemi. T.J., Warsta L., Taka M., Hickman B., Pulkkinen S., Krebs G., Moisseev DN., Harri. K., Teemu. K., 2017**, Applicability of open rainfall data to event-scale urban rainfall-runoff modelling, Journal of Hydrology, Vol 547, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.056>, p 143-15.
- Nounangnonhou. TC., Fifatin FXN., Aza-Gnandji RM., Acakpovi A., Sanya EA., 2018**, Forecast of impacts of climate change on hydropower potential of Ouémériver at the 2040's horizon in Benin. Int J Energy Power Eng, Doi 10.11648/j.ijepe.20180701.12, p 6-18.
- ONM 2011**, Rapport globale sur la région de Béchar [Global report on the region of Bechar [National Metrological Office]]. [12.09.2011Bechar].
- Otmane. A., Baba-Hamed K., Bouanani A., Safa A., 2017**, Predetermination of extreme flood values and the contribution of the SidiBel-Abbès plain to the water balance of the oued Mekerra watershed. Revue des Techniques Sciences Méthodes.
- Pareyn. C., 1961**, Les massifs carbonifères du Sahara Sud oranais, (2 vol).
- Perrin. C., 2000**, Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony), 530p.
- Radia. G., 2012**, Hydrologie et modélisation pluie-débit cas du bassin versant de l'oued Lakhdar (ex : Chouly) Tafna-nw Algerien, mémoire de magister option ressources en eau dans leur environnement, université Aaboubakr Belkaid Telemcen, 13-42.
- Roux. H., 2004**, Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne. Th Doctorat. INP Toulouse.
- Schmidt. A., Ivanova A., Schäfer M.S., 2013**, Media attention for climate change around the world: A comparative analysis of newspaper coverage in 27 countries. Global Environmental Change. Vol. 23. Iss. 5 p. 1233–1248.
- Serre. D., 2005**, Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations, Th Doctorat. Université De Marne-La-Vallée.
- Tabet. A.M., 2008**, Changement Climatique et Agriculture au Maghreb. Communication, Agriculture et développement rural durables en Méditerranée, Institut agronomique méditerranéen de Bari.
-

- Tangara. M., 2005**, Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie débit global, Thèse de Doctorat, EPHE, Paris, 374 p.
- Torterotot. J.P., 1993**, Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes. CERGRENE. Thèse de Doctorat - PARIS, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 283p.
- Turc L., 1955**, Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement, Annales agronomiques, vol. 6, n°1, pp. 3-133.
- USACE 2010**. HEC-RAS River Analysis System: User's Manual. HEC-RAS User Manual. Washington, DC. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center pp. 790.
- Vidal. J., 2005**, Assistance au calage de modèle numérique en hydraulique fluviale. Thèse de Doctorat. L'institut national polytechnique de Toulouse.
- Vogel., R.M., 1986**, The Probability Plot Correlation coefficient test for the Normal, Log-Normal and Gumbel distributional hypothesis. Water Resource Research 22 (4), 587-590.
- Vogel. R.M., 1987**, Correlation to the Probability Plot Correlation test for the Normal, Log-Normal and Gumbel distributional hypothesis. Water Resource Research 23 (10).
- Walls. S.C., Barichivich W.J., Brown M.E., 2013**, Drought, Deluge and Declines: The Impact of Precipitation Extremes on Amphibians in a Changing Climate, Biology, Issue 2, pp. 399-418.
- Xiong. Y., 2011**, A Dam Break Analysis Using HEC-RAS, Journal of Water Resource and Protection, Vol.3, n° 6, pp. 370-379.
- Yahyaoui. A., 2012**, Inondations torrentielles cartographie des zones vulnérables en Algérie du nord (Cas de l'oued Mekerra, wilaya de Sidi bel abbes), mémoire de doctorat en hydraulique, école nationale polytechnique, laboratoire de mobilisation et valorisation des ressources en eau, Blida, Alger, 97-119.
- Yamani K., Hazzab A., Sekkoum M., Toumi S., 2016**, Mapping of vulnerability of flooded area in arid region. Case study: Area of Ghardaia-Algeria. Modeling Earth Systems and Environment. Vol. 2. Iss. 3 pp. 17.
- Yang. X., Parent. E., Michel. C et Roche. P.A., 1991**, Gestion d'un réservoir pour la régularisation des débits. La Houille Blanche(6), 433-440p.
- Yousfi. N et Ait-Ahmed. C., 1992**, Contribution à l'étude hydrogéologique de la Grande Source et de la palmeraie de Béni Abbès (Sahara occidental). Thèse Ing Etat, Univ Sci Tech d'Oran Algérie, 440p.
-

Zeggane. H., 2017, Étude de comportement hydrologique des cours d'eau en Algérie, cas du bassin versant Isser, Algérie. Thèse de docteur en sciences, Université Kasdi-Merbah, Ouargla, 186p.

ANNEXES

ANNEXE

Annexe 01 : Tableau de coefficient de Manninge en fonction de type de cours d'eau

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfaits	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,010	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,010	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,020	0,025	0,030
Pierres sèches	0,025	0,030	0,033	0,035
Moëllons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisses	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
B) Cours d'eaux naturelles				
1) propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
2) idem 1 avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
3) avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4) idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

Annexe 02: photo de la crue d'Octobre 2008



*La crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre
(Entre pont MIRASSOLI et pont CHAUFFANE)*



*La crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre
(L'amont du pont BAZID)*



*La crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre
(Aval du pont MIRASSOLI)*



*La crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre
(HAI NOUR ou quartier Huit)*



*La crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre
(HAI NOUR ou quartier Huit)*



*La crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre
(HAI GHARASSA)*

Annexe 03: les dégâts causés par la crue d'Octobre 2008



Le dégât causée par la crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre (NAI ELNOUR ou quartier Huit)



Le dégât causé par la crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre (En face CFPA DEBDABA)



Le dégât causé par la crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre (En face jardin publique)



Le dégât causé par la crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre (Au niveau de CFPA DEBDABA)



Le dégât causé par la crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre (En amant du pont BAZAID)



Le dégât causé par la crue d'Oct 2008 au niveau de Béchar centre (En amant du pont BAZAID)